Co-funded by the
European Union

DEBSEUz

“TIQXMMI” MILLIY TADQIQOT UNIVERSITETI

A.Mirzabayev, J.Izzatillayev, D.Qodirov, T.Mahkamov

MUQOBIL ENERGIYA MANBALARI ASOSIDAGI ENERGETIK QURILMALAR VA STANSIYALARNI LOYIHALASH

“TIQXMMI” MILLIY TADQIQOT UNIVERSITETI

A.MIRZABAYEV, J.IZZATILLAYEV, D.QODIROV, T.MAHKAMOV

MUQOBIL ENERGIYA MANBALARI ASOSIDAGI ENERGETIK QURILMALAR VA STANSIYALARNI LOYIHALASH

Oliy o‘quv yurtlari talabalari uchun o‘quv qo‘llanma

Toshkent - 2025

Ushbu o‘quv qo‘llanma “TIQXMMI” Milliy tadqiqot universiteti Ilmiy Kengashining 2025 yil “31” dekabrdagi “409-a/f” sonli buyrug‘iga asosan chop etishga tavsiya etilgan.

O‘quv qo‘llanma oliy ta’lim uchun xalqaro o‘quv rejalari va dasturlarini tahlil etish orqali ishlab chiqilgan yangi dastur asosida tayorlangan. “Muqobil energiya manbalari asosidagi energetik qurilmalar va stansiyalarni loyihalash” nomli kitob qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanadigan energetik qurilmalarni loyihalash, hisoblash va amaliy jihatdan o‘rnatish masalalariga bag‘ishlangan o‘quv-uslubiy qo‘llanma hisoblanadi. Ushbu kitob asosan energetika, elektrotexnika hamda muqobil energiya yo‘nalishida ta’lim olayotgan talabalar, magistrantlar va soha mutaxassislari uchun mo‘ljallangan. Kitobda muqobil energiya manbalarining turlari, ularning ishlash prinsiplari hamda zamonaviy energetika tizimlarida tutgan o‘rni haqida batafsil ma’lumot beriladi. Unda quyosh, shamol, biogaz, biomassa va kichik gidroenergetika kabi energiya manbalaridan foydalanish imkoniyatlari, ularning afzalliklari va iqtisodiy samaradorligi ko‘rib chiqiladi. Shuningdek, muqobil energiya qurilmalarini loyihalashda qo‘llaniladigan muhandislik hisoblari, texnik talablar va loyihalash bosqichlari ham yoritilgan.

O‘quv qo‘llanma Evropa Ittifoqining “Erasmus+” dasturi doirasida “O‘zbekistonda quyosh energetikasi bo‘yicha maqsadli muhandislar tayorlash o‘quv dasturini ishlab chiqish” (101128871 - DEBSEUz - ERASMUS-EDU-2023-CBHE) loyihasida ko‘zda tutilgan amaliy natijalardan biri sifatida tayyorlangan.

Mualliflar: **A.Mirzabayev** – “TIQXMMI” MTU “Elektr ta’minoti va qayta tiklanuvchan energiya manbalari” kafedrasi professori.

J.O. Izzatillayev – “TIQXMMI” MTU “Elektr ta’minoti va qayta tiklanuvchan energiya manbalari” kafedrasi mudiri.

D.B. Qodirov – “TIQXMMI” MTU Energetika fakulteti dekani.

T.A. Mahkamov– “MIR SOLAR” MCHJ direktor o‘rinbosari.

Taqrizchilar: **M.Murodov** - Namandan davlat texnika universiteti, Energetika fakulteti, Energetika muhandisligi kafedrasi dotsenti, t.f.n.

O.Matchonov - “TIQXMMI” MTU “Elektrotexnologiya va elektr uskunalar ekspluatatsiyasi kafedrasi” kafedrasi mudiri, t.f.f.d.

© TIQXMMI - Milliy tadqiqot universiteti 2025 yil

MUNDARIJA

KIRISH 7
1-BOB. QUYOSH ENERGIYASINING ASOSLARI 76
§1.1. Quyosh nurlanishi 76
§1.2. Anallemma 82
§1.3. Quyosh nurlanishi spektri 86
§1.4. Atmosfera massasi 88
§1.5. Fotoelektrik effect 91
2-BOB. QUYOSH ELEKTR STANSIYASI VA UNING ASOSIY ELEMENTLARI 98
§2.1 Fotovoltaik modullar 98
§2.2. Sinov sharoitlari (STC, NOCT va NMOT). 109
§2.3. Fotovoltayik modulning elektr parametrlari va Volt-Amper xarakteristikasi 113
§2.4. Fotoelektr modulining texnik spetsifikatsiyasining ko‘rib chiqilishi 119
§2.5. Fotoelektr modullarini o‘rnatish 124
§2.6. Fotovoltaik modullarga texnik xizmat ko‘rsatish 139
3-BOB. INVERTORLAR 251
§3.1. Keng impulsli modulyasi 251
§3.2. Invertorning asosiy sxemasi 254
§3.3 Modullar va invertorning texnik mosligi 260
§3.4. Invertorning foydali ish koeffitsienti (samaradorligi) 272
§3.5. Gibrid va avtonom invertorlar 277
§3.6. Invertorni o‘rnatish talablari va tavsiyalari 281
§3.7. Invertor arxitekturalari va himoya tizimlarining evolyutsiyasi 283
4-BOB. FOTOELEKTRIK STANSIYALARINI LOYIHALASH 289
§4.1. Fotoelektrik stansiyalarining muhandislik amaliyotida asosiy geometriya. 289
§4.2. Fotoelektrik stansiyalarning klassifikatsiyasi 297
§4.3. Fotoelektrik stansiyalarini loyihalashning asosiy prinsiplari va ko‘rsatmalari 302

§4.4. Amaliy tajriba asosida loyiha yechimlarini tahlili 322
§4.5. Kabel tanlash 339
§4.6. Yerlashtirish 350
§4.7. Chaqmoqdan himoya..... 353
5-BOB. SHAMOL ELEKTR STANSIYALARINI LOYIHALASH..... 257
§5.1. Shamol va uning padyo bo‘lishi. 257
§5.2. O‘zbekiston sharoitida shamol energiyasidan foydalanish istiqbollari..... 261
§5.3 Shamol turbinalari uchun Xalqaro Elektrotexnik Komissiya (IEC) tomonidan nashr etilgan xalqaro standartlar..... 263
§5.4 Shamol turibinasining qismlari 266
§5.5. Shamol elektr stansiyasining minora..... 277
§5.6 Shamol elektr stansiyasining parraklari 282
§5.7 Shamol energetik qurilmalari sonini hisoblash. 300
6-BOB. GIDRO ELEKTR STANSIYALARNI LOYIHALASH 305
§6.1 Past bosimli suv oqimlari energiyasidan foydalanish yo‘llari 305
§6.2 Gidroenergetik resurslarni aniqlash 313
§6.3. Gidroelektr stantsiyaning tuzilishi va ishlash printsipi 316
§6.4. GESni qurish uchun loyihalashtirish bosqichlari 324
7-BOB. BIOGAZLI ELEKTR STANSIYALARINI LOYIHALASH..... 330
§7.1. Biogaz olish qurilmalari va ulardan foydalanish jarayoni. 330
§7.2. Organik biomassani anaerobik parchalash jarayoni..... 334
§7.3. Biogaz, uning tarkibi, hosil bo‘lish jarayoni va miqdori. 347

KIRISH

So‘nggi yillarda O‘zbekiston Respublikasi hamda butun dunyoda quyosh energetikasi sohasida jadal rivojlanish kuzatilmoqda. O‘zbekiston Respublikasining 2030 yilgacha bo‘lgan Rivojlanish strategiyasiga muvofiq, umumiy o‘rnatilgan quvvati 12 GW dan ortiq bo‘lgan fotoelektrik stansiyalarni (FES) ishga tushirish va umumiy elektr energiyasi ishlab chiqarishda qayta tiklanadigan energiya manbalari (QTEM) ulushini 54% ga etkazish rejalashtirilgan [1], [2], [3]. Ushbu quvvatning muhim qismi – 1,2 GW dan ortiq – quvvati 1 MW dan kam bo‘lgan kichik va o‘rta hajmdagi fotoelektrik stansiyalar hisobiga ta’minlanadi, bular esa tarqatilgan va mahalliy elektr ta’minoti ob’ektlari uchun mo‘ljallangan.

Quyosh energetikasiga investitsiyalarning jadal o‘sishi ushbu sohada faoliyat yuritayotgan kompaniyalar sonining sezilarli darajada ko‘payishiga, shuningdek, muhandislar, qarashli soha mutaxassislari va texnik yo‘nalishdagi oliy o‘quv yurtlari talabalari orasida qiziqishning ortishiga olib keldi. Bunday sharoitda fotoelektrik stansiyalarni loyihalashtirish, qurish va ekspluatatsiya qilish bo‘yicha amaliy ko‘nikmalarni tez va sifatli egallashga yordam beradigan malakali kadrlar va qulay o‘quv materiallariga talab keskin oshdi.

Ushbu o‘quv qo‘llanma O‘zbekistonda quyosh elektr stansiyalari loyihalarini amalga oshirish jarayonida to‘plangan amaliy tajribaga asoslanadi va hozirda ushbu sohada faoliyat yuritayotgan muhandislar, loyihachilar va texnik mutaxassislarning malakasini oshirishga qaratilgan. Shu bilan birga, u qayta tiklanadigan energiya manbalari sohasida martaba qurmoqchi bo‘lgan energetika va elektrotexnika yo‘nalishidagi talabalar uchun ham foydali bo‘lishi mumkin.

Quyosh energetikasi sohasi jadal rivojlanmoqda: qo‘llanilayotgan texnik yechimlar, jihozlar va normativ-huquqiy baza doimiy ravishda takomillashtirib borilmoqda. Shunga ko‘ra, ushbu qo‘llanmaning asosiy maqsadi muayyan loyiha yechimlarini oddiy taqdim etish emas, balki ular asosida yotuvchi mantiqiy va fizik prinsip va qonuniyatlarni tushuntirishdan iborat. Bunday yondashuv o‘quvchida jarayonlarning mohiyatini chuqur tushunishni shakllantiradi hamda kelajakda yangi

texnologik yutuqlar va normativ talablar bo‘yicha mustaqil yo‘l topish imkonini beradi.

Shuni ta’kidlash joizki, qo‘llanmada keltirilgan raqamli ko‘rsatkichlar taxminiy xarakterga ega bo‘lib, texnik misollar asosan muhandislik yondashuvlarning mohiyatini ochib berish uchun ishlatilgan, ular muammolarga yakuniy yechim sifatida qabul qilinmasligi kerak. Ushbu qo‘llanma materialini to‘liq o‘zlashtirgan o‘quvchi o‘zini qiziqtirgan mavzularni ishonch bilan chuqurroq o‘rganish imkoniyatiga ega bo‘ladi, chunki u fotoelektrik stansiyalarni loyihalashtirish va ekspluatatsiya qilishdagi asosiy prinsiplar va yondashuvlarni tizimli tushunadi.

Ushbu o‘quv qo‘llanmada PVSyst yoki PV*Sol kabi maxsus dasturiy ta’minotlarda modellashtirish bo‘yicha ko‘rsatmalar keltirilmagan, chunki ushbu dasturlar uchun batafsil foydalanuvchi qo‘llanmalari va o‘quv materiallari ochiq manbalarda mavjud. O‘quvchi ushbu dasturlardan foydalanish ko‘nikmasini mavjud resurslar asosida mustaqil ravishda egallaydi deb hisoblanadi.

1-BOB. QUYOSH ENERGIYASINING ASOSLARI

Ushbu bobda Quyosh bilan bog‘liq fizik hodisalar yoritiladi va ular fotoelektr tizimlarning ishlashiga asos bo‘ladi. Bo‘limda quyosh nurlanishining intensivligi, spektral tarkibi, Quyoshning osmon sferasidagi trayektoriyasi, analemma, shuningdek atmosfera bosimi va nurlanishning sochilishi kabi omillarning ta’siri haqida zarur ma’lumotlar beriladi.

Shuningdek, quyosh energiyasini elektr energiyasiga aylantirishning asosiy fizik jarayoni hisoblangan fotoelektr effektning asoslari ham ko‘rib chiqiladi. Ushbu fundamental masalalarning puxta o‘zlashtirilishi fotoelektr stansiyalarini loyihalash va ularning ish samaradorligini baholashda muhandislar uchun nihoyatda muhimdir.

Bo‘limda yoritilmagan qo‘shimcha mavzular mustaqil o‘rganish uchun maxsus adabiyotlar va professional manbalarni qo‘llash tavsiya etiladi.

§1.1. Quyosh nurlanishi

Yerda mavjud bo‘lgan energiyaning deyarli barchasi bir yo‘li bilan bo‘lsa ham Quyoshdan kelib chiqadi. Quyosh nurlanishi sayyoraning iqlimiy va biologik jarayonlarini ta’minlovchi asosiy energiya manbaidir. Masalan:

Shamol. Yer yuzasining Quyosh nurlaridan notekis qizishi natijasida hosil bo‘ladi. Bu jarayon harorat va bosim gradiyentlarini yuzaga keltirib, havo massalarining harakatiga sabab bo‘ladi.

Gidroenergetika suvning potensial energiyasini elektr energiyasiga aylantirishga asoslangan bo‘lib, bu potensial energiya Quyosh energiyasi hisobiga hosil bo‘ladi. Quyosh nurlanishi suvni bug‘lantiradi, bug‘ keyinchalik yog‘in sifatida balandliklarga tushadi. Ushbu suv pastga oqarkan, o‘z potensial energiyasini avval kinetik energiyaga, so‘ng GES turbinalari orqali elektr energiyasiga aylantiradi.

Biomassa energiyani fotosintez jarayoni orqali to‘playdi, fotosintez esa to‘g‘ridan-to‘g‘ri quyosh nuriga bog‘liq.

Qazib olinadigan yoqilg‘ilar — neft, gaz, ko‘mir — aslida Quyosh energiyasi bilan to‘yingan qadimgi biomassa bo‘lib, millionlab yillar davomida bosim va harorat ta’sirida o‘zgarishga uchragan.

Istisnolarga geotermal va yadro energiyasi kiradi, ularning kelib chiqishi Yerning ichki issiqligi va radioaktiv parchalanish jarayonlari bilan bog‘liq. Yana bir qisman istisno — to‘lqin energiyasi**,** u asosan Oy tortish kuchiga bog‘liq. Quyoshning ta’siri ham mavjud, biroq ikkinchi darajali bo‘lib, faqat to‘lqin amplitudasini kuchaytiradi yoki kamaytiradi.

Fotoelektrik elektr stansiyalarini loyihalash nuqtayi nazaridan, bizning asosiy e’tiborimiz Quyosh energiyasini to‘g‘ridan-to‘g‘ri elektr energiyasiga aylantirish jarayoniga qaratiladi.

Quyosh nurlanishi — bu Quyosh tomonidan chiqariladigan elektromagnit energiya toki bo‘lib, fotoelektr modullar (PV-modullar) tomonidan to‘g‘ridan-to‘g‘ri elektr energiyasiga aylantiriladi. Quyosh nurlanishining intensivligi — nurlanish toki zichligi bilan aniqlanadi.

Quyosh nurlanishi toki zichligi — bu 1 m² perpendikulyar sirtga 1 soniya davomida tushayotgan Quyosh energiyasining miqdorini bildiruvchi fizik kattalikdir. Ushbu parametr fotoelektr stansiyalarining samaradorligi va quvvatini aniqlashda asosiy omildir. O‘lchov birligi-W/m².

Quyosh doimiysi — bu Yer atmosferasining tashqi chegarasida, Quyosh nurlariga perpendikulyar joylashgan birlik yuzaga tushadigan Quyosh nurlanishi toki zichligi bo‘lib, Yer–Quyoshning o‘rtacha masofasida o‘lchanadi.

Nomidan qat’i nazar, Quyosh doimiysi haqiqiy qiymatda doimiy emas, balki taxminan 1320–1410 W/m² oralig‘ida o‘zgaradi. Buning sababi — Yerning Quyoshga nisbatan masofasining mavsumiy o‘zgarishi va Quyoshning faollik darajasidir.

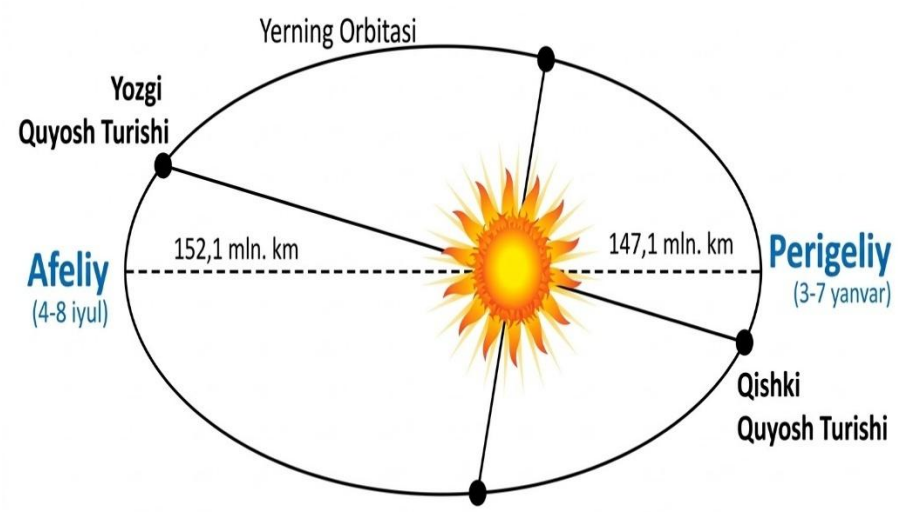
Hisob-kitoblarda odatda o‘rtacha qiymat — 1361 W/m² qabul qilinadi [13].

Izoh. Yer Quyosh atrofida elliptik orbitada harakatlanadi (3.1-rasmga qarang) va Quyoshga eng yaqin nuqtaga — perigeliyga — taxminan 3–7 yanvar kunlari yaqinlashadi. Eng uzoq nuqta — apogeliy — esa taxminan 3–7 iyul kunlariga to‘g‘ri keladi.

Yanvar oyida Yer Quyoshga yaqin bo‘lgani uchun quyosh doimiysi qiymati biroz yuqoriroq bo‘ladi, biroq shu davrda Yer yuzasiga, ayniqsa shimoliy yarimsharda (jumladan O‘zbekistonda), tushadigan real quyosh nurlanishi darajasi past bo‘lib qoladi.

Buning sababi — mavsumiy noqulay geometrik va iqlimiy sharoitlar: Quyoshning ufqdan ko‘tarilish burchagi juda past; kun davomiyligi qisqa; bulutlilik yuqori.

Shu omillar qish oylarida yuzaga etib keladigan real quyosh radiatsiyasining kamayishiga olib keladi.



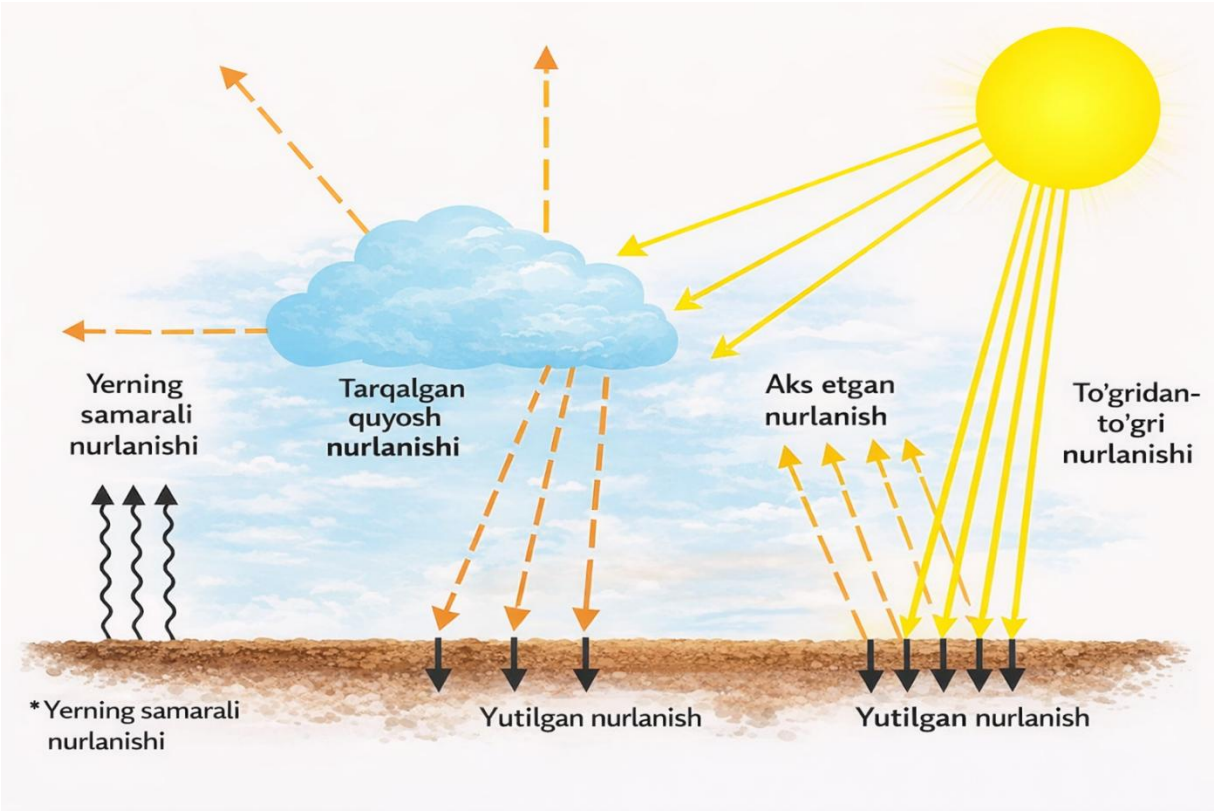
1.1-rasm. Yerning orbitasi.

Quyosh doimiysi - bu atmosferaning umuman mavjud emasligi sharoitida, Quyosh nurlariga mutlaqo perpendikulyar joylashgan sirtga tushadigan nazariy maksimal quyosh nurlanishi miqdoridir. Biroq real sharoitlarda bu qiymatga hech qachon erishilmaydi, chunki Quyosh nurlari atmosferadan o‘tayotganda uning sezilarli qismi yutiladi, sochiladi va qaytariladi. Hatto musaffo ob-havo sharoitida

ham energiyaning bir qismi havo molekulalari, suv bug‘i, chang zarralari va bulutlar bilan o‘zaro ta’sirlashish tufayli yo‘qoladi.

Natijada Yer yuzasiga to‘g‘ri, tarqalgan (diffuz) va qaytgan nurlanish komponentlaridan iborat aralash quyosh nurlanishi toki (3.2-rasm) etib keladi.

Eng qulay sharoitlarda — masalan, baland tog‘ hududida tush paytida — ham to‘g‘ridan-to‘g‘ri quyosh nurlanishining miqdori odatda 1000 W/m² dan oshmaydi. Bu qiymat quyosh doimiysidan ancha pastdir.



1.2-rasm. Quyosh nurlanishining tarkibiy qismlari.

To‘g‘ridan-to‘g‘ri quyosh nurlanishi (DNI — Direct Normal Irradiance) — atmosferadan sochilmasdan o‘tib, Quyosh diskidan Yer yuzasiga to‘g‘ri chiziq bo‘ylab keladigan nurlanish komponentidir. U Quyosh nurlariga perpendikulyar joylashgan sirtga o‘lchanadi va eng yuqori qiymatga musaffo ob-havo sharoitida erishiladi.

Tarqalgan (diffuz) nurlanish (DHI — Diffuse Horizontal Irradiance) — havo molekulalari, suv bug‘i, chang, bulutlar va boshqa aerozollar tomonidan

atmosferada sochiladigan va osmon yarimsharining turli nuqtalaridan Yer yuzasiga tushadigan quyosh nurlanishidir. To‘g‘ri nurlanishdan farqli o‘laroq, diffuz nurlanish hatto bulutli ob-havoda ham mavjud bo‘ladi va Quyosh diski ko‘rinmaydigan sharoitda ham sirtga energiya etkazadi.

Qaytgan (albedo) nurlanish (RHI — Reflected Horizontal Irradiance) — Yer yuzasi, suv, qor, binolar va boshqa obyektlardan qaytgan quyosh nurlanishi bo‘lib, qiya joylashgan fotoelektr modullarga qo‘shimcha ravishda tushishi mumkin. Ushbu komponent ayniqsa **ikki tomonlama (bifacial) modullar**da muhim ahamiyatga ega, chunki ular orqa tomon orqali ham nurlanishni qabul qiladi. Qaytgan nurlanish miqdori albedo koeffitsienti bilan aniqlanadi — ya’ni sirtning qaytaruvchanlik qobiliyati.

Ba’zi keng tarqalgan sirtlar uchun albedo qiymatlari: yangi qor ~ 0,8–0,9; qora asfalt ~ 0,05–0,10; och beton ~ 0,25–0,35; engil rangli (galvanizli) metall tom ~ 0,35–0,55; bitumli qoramtir tekis tom ~ 0,05–0,10; oq “sovutuvchi tom” (cool roof) ~ 0,65–0,85; qizil keramika plitka tom ~ 0,30–0,45.

Agar fotoelektr modullar statsionar o‘rnatishda aniq janubga qaratilmagan bo‘lsa, bifacial modullardan foydalanish va sirtning albedo qiymatini oshirish choralarini qo‘llash fotoelektr stansiyaning elektr energiyasi ishlab chiqarish samaradorligini sezilarli darajada oshiradi.

Global (umumiy) quyosh nurlanishi.

GHI (Global Horizontal Irradiance) — gorizontal sirtga tushadigan umumiy quyosh nurlanishi.

GTI (Global Tilted Irradiance) — qiya (egilgan) sirtga tushadigan umumiy quyosh nurlanishi. Global nurlanish o‘z ichiga quyidagilarni oladi: to‘g‘ridan-to‘g‘ri nurlanish, diffuz nurlanish, zarur bo‘lgan hollarda qaytgan (albedo) nurlanish.

Bu ko‘rsatkich fotoelektr stansiyalarining potensiali va elektr ishlab chiqarish samaradorligini baholashda asosiy parametr hisoblanadi.

Amaliyotda, ma’lum hudud uchun **optimal qiyalik burchagi va azimut** bo‘yicha global nurlanish parametri ham qo‘llaniladi — **GTI OPTA (Global Irradiance at Optimal Tilt and Azimuth)**.

Bu parametr fotoelektr modullarning o‘rnatilishi uchun mintaqaga xos maksimal yillik nurlanish darajasini baholashga yordam beradi.

Izoh. Azimut — fotoelektr modullarining geografik shimolga nisbatan qaysi yo‘nalishga qaratilganini ifodalovchi gorizontal burchakdir. U soat mili bo‘yicha quyidagicha o‘lchanadi: **0°** - PV modullar shimolga yo‘naltirilgan; **90°** - PV modullar sharqqa yo‘naltirilgan; **180°** - PV modullar janubga yo‘naltirilgan; **270°** - PV modullar g‘arbga yo‘naltirilgan.

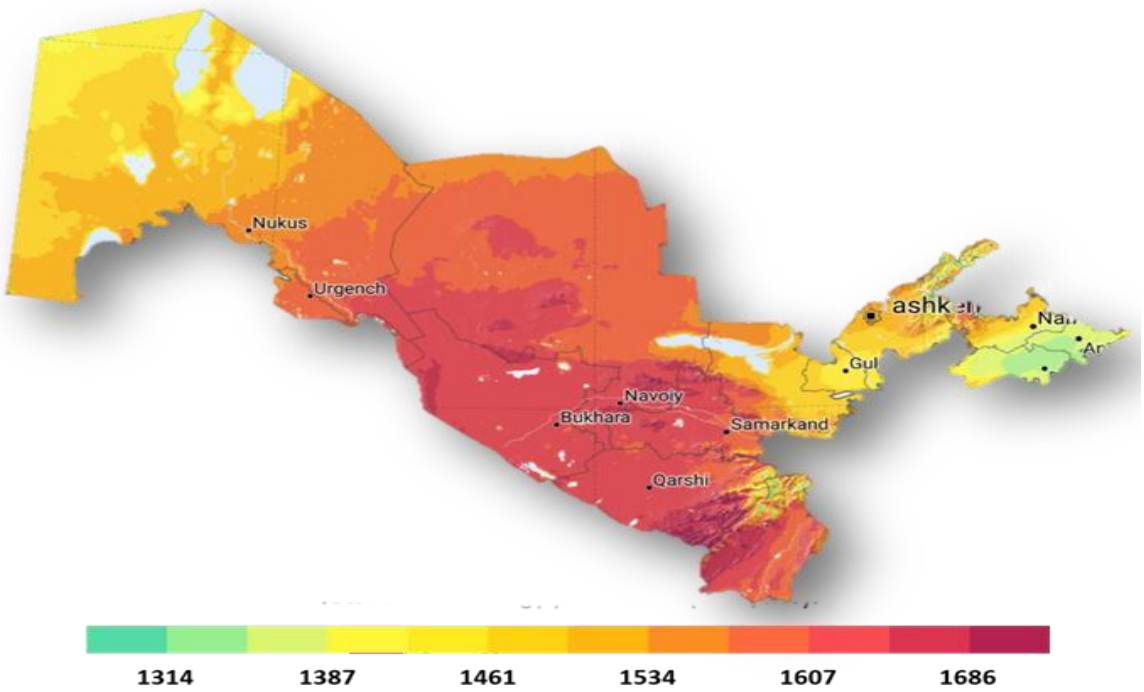
Shimoliy yarimsharda, jumladan O‘zbekistonda ham, fotoelektr modullar yil davomida maksimal energiya ishlab chiqarilishini ta’minlash uchun odatda **janubga (azimut 180°)** qaratib o‘rnatiladi.

1.1-jadval. O‘zbekistonda quyosh nurlanishi va fotoelektr stansiyaning yillik o‘rnatilgan quvvatga nisbatan elektr energiyasi ishlab chiqarish ko‘rsatkichlari.

Shahar	**DNI** kW/m²	**DHI** kW/m²	**GHI** kW/m²	**GTI OPTA** kW/m²	**OPTA** degrees	**PV Gen** kWh/kW
Toshkent	1663	655	1670	1918	33/180	1544
Namangan	1296	765	1579	1792	32/180	1433
Farg‘ona	1173	781	1524	1713	32/180	1380
Andijon	1223	773	1543	1744	32/180	1398
Guliston	1440	722	1629	1841	32/180	1471
Jizzax	1547	694	1664	1881	32/180	1509
Samarqand	1809	648	1753	2013	33/180	1616
Buxoro	1809	681	1778	2057	34/180	1639
Navoiy	1857	655	1776	2057	34/180	1642
Qarshi	1824	677	1800	2062	33/180	1641
Termiz	1665	757	1811	2042	31/180	1614
Urganch	1680	692	1689	1984	35/180	1606
Nukus	1593	700	1641	1930	36/180	1571

1.1-jadvalda O‘zbekistondagi turli shaharlar uchun to‘g‘ridan-to‘g‘ri, diffuz va global quyosh nurlanishi qiymatlari hamda fotoelektr stansiyaning o‘rnatilgan quvvat birligiga nisbatan taxminiy yillik elektr energiyasi ishlab chiqarish ko‘rsatkichi keltirilgan.

Ushbu ma’lumotlar faqat **ma’lumot berish maqsadida** taqdim etilgan bo‘lib, o‘rnatilgan quvvatga bog‘liq holda statsionar fotoelektr stansiyaning quyosh resursi darajasi va potentsial ishlab chiqarish imkoniyatini umumiy tushunishga yordam beradi [14].



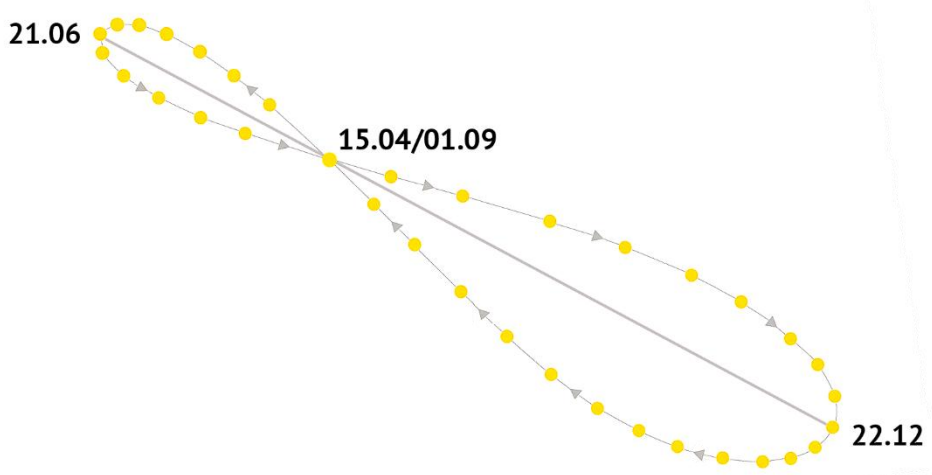
1.3-rasm. O‘zbekistonda fotoelektr stansiyalarning o‘rnatilgan quvvat birligiga nisbatan o‘rtacha yillik elektr energiyasi ishlab chiqarishi.

1.3-rasm O‘zbekistonda fotoelektr stansiyaning o‘rnatilgan quvvat birligiga nisbatan yillik o‘rtacha elektr energiyasi ishlab chiqarishini ko‘rsatadi. Ushbu qiymatlar 1999–2018 yillar oralig‘idagi quyosh nurlanishi ma’lumotlari asosida hisoblangan [14].

§1.2. Anallemma

Anallemma — yil davomida bir vaqtning o‘zida (masalan, Quyosh soatiga ko‘ra tush payti) Quyoshning osmondagi ko‘rinadigan pozitsiyasini ifodalovchi egri

chiziqdir. Grafik jihatdan u odatda cho‘zilgan sakkiz shaklida ko‘rinadi (3.4-rasmga qarang), biroq uning aniq shakli kuzatuvchining kenglik darajasi va koordinata sistemasiga bog‘liq.



1.4-rasm. Anallemma.

Anallemma hosil bo‘lishi ikki asosiy astronomik omil bilan bog‘liq:

Yer o‘qi qiyaligi, yil davomida Quyoshning ufqdan balandligini o‘zgartiradi;

Yer orbitasining elliptikligi, natijada Yer Quyosh atrofida o‘zgaruvchan tezlikda harakatlanadi.

Anallemma yil davomida bir vaqtning o‘zida (masalan, har kuni bir vaqt) Quyoshning pozitsiyasini bir joydan muntazam suratga olish orqali chizilishi mumkin. Anallemma fotoelektr stansiyalarini loyihalashda muhim ahamiyatga ega. U fotoelektr modullarning optimal qiyalik burchagini aniqlashning asosini tashkil qiladi, bunda tizimning maqsadi, turi va yuklamalamaning mavsumiy o‘zgarishi hisobga olinadi. Shuningdek, anallemma fotoelektr modullari qatordagi bir-birini soyaga olmasligi uchun ularning orasidagi masofani belgilashda ham to‘g‘ridan-to‘g‘ri ta’sir ko‘rsatadi.

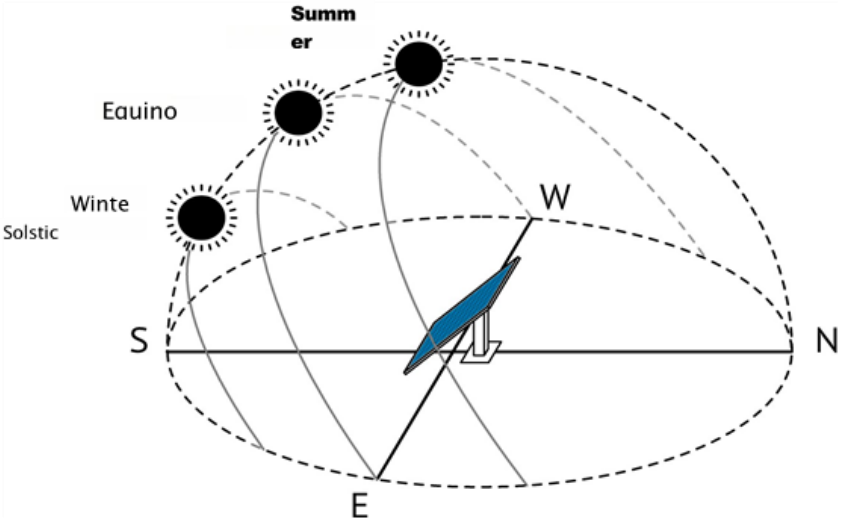
1.4-rasmda kuzatuv nuqtasidagi ufqqa nisbatan Quyoshning ko‘rinadigan trayektoriyasi ko‘rsatilgan. Shimoliy yarimsharda Quyosh maksimal balandlikka **yozgi quyosh to‘qimi kuni (21 iyun)** etadi, va minimal balandlikka **qishki quyosh to‘qimi kuni (22 dekabr)** etadi.

Quyoshning ufqdan balandligi geografik kenglikka bog‘liq:

Ekvator yaqinida Quyosh kun davomida balandroq ko‘tariladi;

Qutblarga yaqin hududlarda uning maksimal balandligi pastroq bo‘ladi.

Masalan, Toshkentda yozgi quyosh to‘qimi kuni tush paytida Quyoshning maksimal balandligi taxminan **72°** dan biroz yuqoriroq, ekvator hududida esa shu paytda Quyosh deyarli zenitda, ya’ni **90°** balandlikda bo‘ladi.



1.5-rasm. Kuzatuv nuqtasidagi ufqqa nisbatan Quyoshning trayektoriyasi.

Izoh. Zenit — bu osmon sferasidagi nuqta bo‘lib, u to‘g‘ridan-to‘g‘ri kuzatuvchining boshining ustida joylashgan, ya’ni Yer yuzasidagi kuzatuvchi pozitsiyasidan vertikal chiziq bo‘ylab yuqoriga cho‘zilgan nuqtadir.

Quyoshning balandligi geografik kenglik va mavsumga bog‘liq bo‘lgani sababli, fotoelektr modullarning **optimal qiyalik burchagi** belgilangan maqsadlar asosida hisob-kitoblar va simulyatsiyalar yordamida aniqlanadi.

Shunga qaramay, O‘zbekistondagi kabi **o‘rta kengliklar** sharoitida soddalashtirilgan baholash uchun taxminiy tavsiyalar quyidagicha berilishi mumkin:

Qish/yaz energiyasini muvozanatlash: φ = kenglik darajasi;

Yillik maksimal ishlab chiqarish: φ = kenglik darajasi – 10°;

Yozgi maksimal ishlab chiqarish: φ = kenglik darajasi – (15°…20°);

Qishki maksimal ishlab chiqarish: φ = kenglik darajasi + (10°…20°).

Izoh. Geografik kenglikka teng burchak bilan o‘rnatilgan fotoelektr modullar yil davomida barqaror va muvozanatli elektr energiyasi ishlab chiqarilishini ta’minlaydi.

Biroq yoz oylarida Quyosh ufqdan balandroq ko‘tariladi, bu esa quyosh nurlanishi darajasining oshishiga olib keladi. Natijada, modul qiyalik burchagini taxminan 10° ga kamaytirish yil davomida umumiy ishlab chiqarishni oshirish imkonini beradi, chunki bahor–yoz davrida energiya ishlab chiqarish samaradorligi yuqori bo‘ladi va bu yilning energiya balansidagi asosiy ulushni tashkil etadi.

Qish oylarida Quyosh balandligining pasayishi fotoelektr modullar sirtida soyalanish xavfini yuzaga keltiradi, bu esa aynan energiya tizimi Quyosh resurslariga juda muhtoj bo‘lgan paytda ishlab chiqarishning sezilarli darajada kamayishiga olib kelishi mumkin.

Shuning uchun loyiha bosqichida **minimal quyosh balandligini hisobga olish**, modul qatorlari orasidagi mos masofani hisoblash va tashqi obyektlar sabab bo‘ladigan soyalanish ta’sirini aniqlash muhimdir.

Shuni ham ta’kidlash kerakki, kun davomida Quyosh albatta ufq ostiga tushadi (quyosh botishidan quyosh chiqishigacha); shuning uchun hisob-kitoblarda **quyosh soatiga yaqin minimal balandlikka** asoslanish tavsiya etiladi — masalan, quyosh soatidan ikki soat oldin va keyin oralig‘ida.

Masalan, Toshkent shahrida **qishki quyosh to‘qimi kuni** quyidagi balandliklar kuzatiladi: 10:20 da — Quyosh balandligi 19,5°; 12:20 da — Quyosh alandligi 25,3°; 14:20 da — Quyosh balandligi 19,7°.

Shu sababli, Toshkent shahrida fotoelektr stansiya loyihalashda modullarni **quyosh balandligi 20° dan past bo‘lmagan sharoitlarda soyalanish yuz bermasligi**ni hisobga olgan holda joylashtirish tavsiya etiladi.

Izoh. Geografik (haqiqiy) tush — bu Quyosh ufqdan eng baland nuqtaga etib, janub yo‘nalishida bo‘lgan lahza (shimoliy yarimsharda). U har doim standart **12:00** vaqti bilan mos kelavermaydi, chunki bu aniq joyning geografik uzunligiga bog‘liq.

Masalan, **qishki quyosh to‘qimi kuni** geografik tush quyidagi vaqtlarda sodir bo‘ladi: Andijon — 12:10; Toshkent — 12:20; Nukus — 13:00

Bundan tashqari, Yer orbitasining elliptikligi va Yer o‘qining qiyaligi tufayli geografik tush vaqti yil davomida o‘zgaradi — masalan, Toshkentda qishki quyosh to‘qimi kuni 12:20 da, yozgi quyosh to‘qimi kuni esa 12:25 da sodir bo‘ladi.

§1.3. Quyosh nurlanishi spektri

Quyosh nurlanishi spektri — bu Quyosh energiyasining turli to‘lqin uzunliklari (λ) yoki chastotalari (ν) bo‘yicha taqsimlanishi. Soddalashtirilgan tushuntirishda, u Quyoshdan Yerga qaysi turdagi yorug‘lik va qaysi moddalar qaysi miqdorda etib kelishini ko‘rsatadi.

Quyosh nuri — bu fotonlar toki, ya’ni elektromagnit nurlanishning elementar zarralari. Fotonlarning dam olish massasi yoki zaryadi yo‘q, lekin ular energiya va impul’sga ega bo‘lib, yorug‘lik energiyasini tashiydilar. Har bir foton yorug‘likning kvanti sifatida tasavvur qilinishi mumkin — ya’ni moddalar tomonidan yutilishi yoki chiqarilishi mumkin bo‘lgan eng kichik energiya qismi.

Bitta fotonning energiyasi quyidagi formulaga ko‘ra aniqlanadi:

$$\boldsymbol{E = h \cdot v}$$

bu yerda: E-foton energiyasi, Joullarda (J); h-Plank doimiysi ($h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ J·s); ν — nurlanish chastotasi, Gerts (Hz).

Chastota (ν**)** va to‘lqin uzunligi (**λ**) o‘rtasida aniq bog‘liqlik mavjud:

$$\boldsymbol{v = \frac{c}{\lambda}}$$

bu erda: ν-nurlanish chastotasi, gertslarda (Hz); c-yorug‘lik tezligi vakuumda ($c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s); **λ** — to‘lqin uzunligi, metrlarda (m).

Shunday qilib, **to‘lqin uzunligi qanchalik qisqa bo‘lsa** (va chastota shuncha yuqori bo‘lsa), foton energiyasi shuncha katta bo‘ladi. Aksincha, **to‘lqin uzunligi qanchalik uzun bo‘lsa** (va chastota shuncha past bo‘lsa), foton tashiydigan energiya shuncha kam bo‘ladi.

1.2-jadvalda quyosh spektrining asosiy to‘lqin uzunligi diapazonlari keltirilgan.

Nurlanish turi	**To‘lqin uzunligi**	**Foton energiyasi (taxminan)**
Gamma nurlanishi (γ)	< 0,01 nm	> 100 000 eV
Rentgen nurlanishi	0,01 – 10 nm	124 – 100 000 eV

Uzoq ultrabinafsha (UV-C)	10 – 280 nm	4,5 – 124 eV
O‘rta ultrabinafsha (UV-B)	280 – 315 nm	3,9 – 4,5 eV
Yaqin ultrabinafsha (UV-A)	315 – 400 nm	3,1 – 3,9 eV
Ko‘rinadigan yorug‘lik	400 – 700 nm	1,8 – 3,1 eV
Yaqin infraqizil (IR-A)	700 – 1400 nm	0,9 – 1,8 eV
O‘rta infraqizil (IR-B)	1400 – 3000 nm	0,4 – 0,9 eV
Uzoq infraqizil (IR-C)	3000 nm – 1 mm	0,001 – 0,4 eV
Mikto to‘lqinlar	1 mm – 10 sm	< 0,001 eV
Radio to‘lqinlar	> 10 sm	<< 0,001 eV

Izoh. An’anaviy birliklarda foton energiyasi elektronvolt (eV) da ko‘rsatiladi. Elektronvoltni (eV**)** joullarga (J**)** o‘tkazish uchun quyidagi formula ishlatiladi:

$$\boldsymbol{1eV = 1,602 \cdot 10^{-19} J}$$

1.1-jadvalga ko‘ra, ultrabinafsha nurlanish fotonlari infraqizil diapazondagi fotonlarga qaraganda ko‘proq energiyaga ega, chunki ularning to‘lqin uzunligi qisqa va chastotasi yuqori.

Biroq yorug‘likning intensivligi **yagona foton energiyasi bilan emas**, balki **bir birlik maydonga bir vaqtning o‘zida tushayotgan fotonlar soni bilan** belgilanadi. Bir soniyada sirtga tushadigan fotonlar soni qanchalik ko‘p bo‘lsa, yorug‘lik toki shunchalik yuqori va nurlanish intensivligi ham shunchalik katta bo‘ladi. Hamma fotonlarning energiyasi bir xil bo‘lsa (ya’ni to‘lqin uzunligi bir xil bo‘lsa) ham, yorug‘lik toki zichroq bo‘lgan joyda yorug‘lik ko‘proq porloq ko‘rinadi.

1.6-rasmda quyosh nurlanishi spektrining nisbiy intensivligi to‘lqin uzunligiga bog‘liq grafi sifatida ko‘rsatilgan. Eng kichik energiya ulushi quyidagilarga to‘g‘ri keladi:

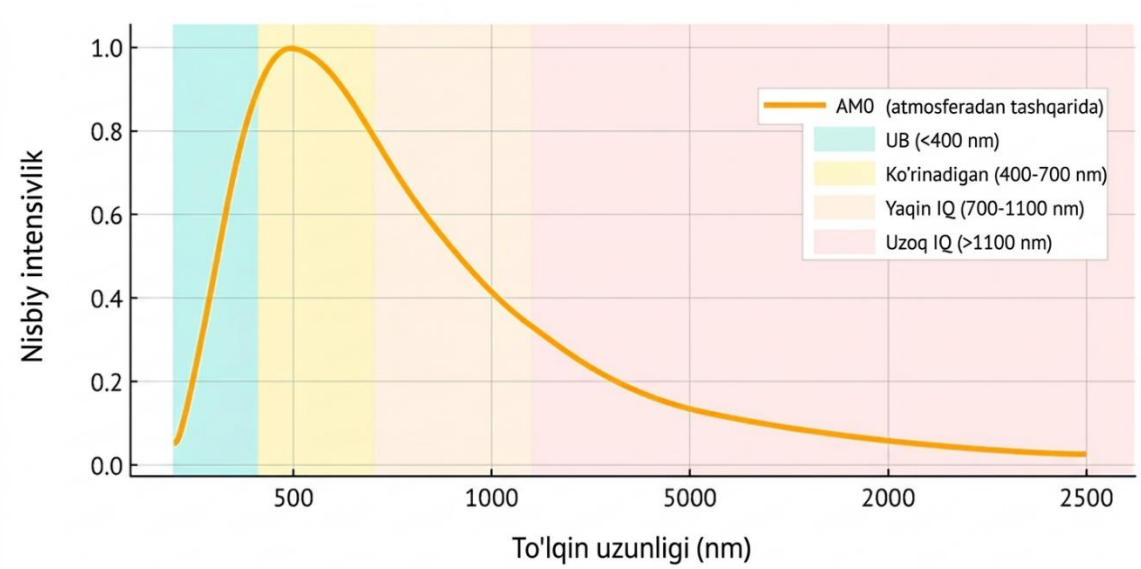
Ko‘rinadigan yorug‘lik — taxminan 43%

Yaqin infraqizil yorug‘lik — taxminan 49%

Ultrabinafsha yorug‘lik — taxminan 7%

Boshqa diapazonlar (rentgen nurlari, gamma nurlari, radio to‘lqinlar va boshqalar) — 1% dan kam

Izoh. Quyosh nurlanishining maksimal spektral zichligi taxminan 500 nm to‘lqin uzunligida sodir bo‘ladi, bu esa ko‘rinadigan spektrning yashil-ko‘k hududiga to‘g‘ri keladi. Inson ko‘rish sezgirligi ham aynan shu diapazonda maksimal bo‘ladi, bu esa tabiiy quyosh yorug‘ligiga evolyutsion moslashuv natijasi bo‘lishi mumkin.



1.6-rasm. AM0 sharoitida (atmosfera tashqarisida) quyosh nurlanishi spektri.

Quyosh nurlanishi spektri atmosfera orqali o‘tishda o‘zgaradi:

Qisqa to‘lqinli qismlar (ayniqsa ultrabinafsha va ko‘k yorug‘lik) havo molekulalari va aerozollar tomonidan tarqalish sababli zaiflashadi;

Infraqizil diapazonda suv bug‘i va karbonat angidrid sababli xos singdirish cho‘kmalari kuzatiladi.

Quyosh nurlanishi atmosferadan qancha uzoq yo‘l bosib o‘tadigan bo‘lsa, uning spektr tarkibidagi buzilish shuncha katta bo‘ladi.

§1.4. Atmosfera massasi

Atmosfera massasi (yoki **Havo massasi**, qisqartma **AM**) — bu o‘lchovsiz kattalik bo‘lib, Quyosh nurlanishi Yer atmosferasidan o‘tadigan yo‘lning vertikal

yo‘lga (ya’ni Quyosh zenitda, to‘g‘ridan-to‘g‘ri ustimizda bo‘lgan holat) nisbatan necha marta uzunroq ekanligini ko‘rsatadi.

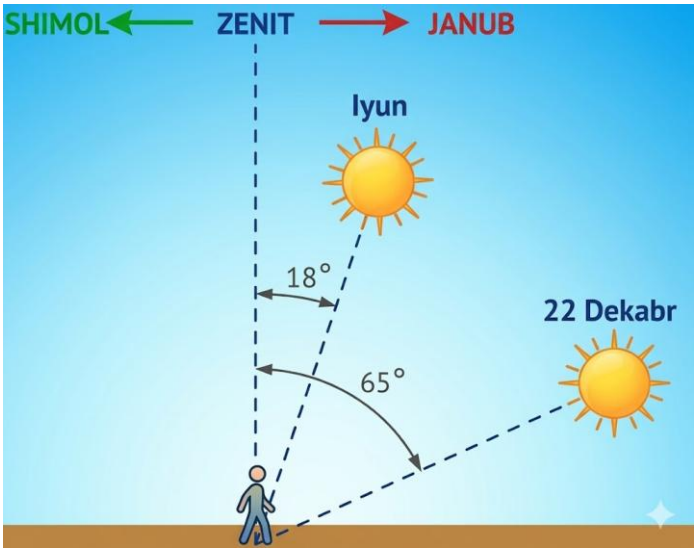
Havo massasini hisoblash formulasi quyidagicha soddalashtirilishi mumkin:

$$AM = \frac{1}{cos\emptyset}$$

bu yerda: **AM** — havo massasi; **∅** — zenit burchagi, ya’ni Yer yuzasidagi ma’lum nuqtada ufqqa perpendikulyarga nisbatan Quyoshga qarab o‘lchangan burchak.

Izoh: Havo massasini hisoblashning soddalashtirilgan formulasi **quyosh balandligi 15° dan yuqori bo‘lgan hollarda** etarlicha aniq natija beradi, shuning uchun u O‘zbekistondagi kabi **o‘rta kenglik sharoitlarida** qo‘llanilishi mumkin.

Aniqroq tahlil uchun **empirik modellardan** foydalaniladi, ularni o‘quvchi mustaqil ravishda o‘rganishi mumkin.



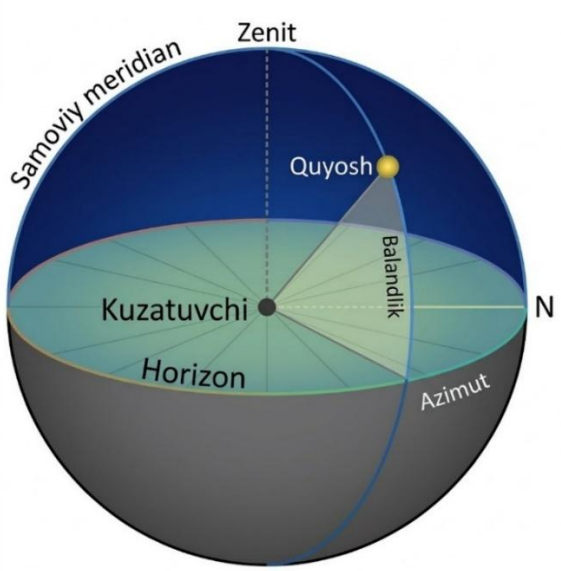
1.7-rasm. Toshkent shahrida zenit burchagi misolida ko‘rsatildi.

AM qiymati qanchalik katta bo‘lsa, Quyosh nurlanishining atmosfera orqali o‘tadigan yo‘li shuncha uzun bo‘ladi va natijada sirtga tushadigan quyosh toki intensivligi shuncha kamayadi. Bu ayniqsa ertalab va kechqurun, AM maksimal bo‘lgan paytlarda fotoelektr stansiya ishlab chiqarishiga bevosita ta’sir qiladi. Tush paytida AM minimal bo‘ladi; ertalab va kechqurun esa AM cheksizga yaqinlashadi.

Atmosfera massasi — fotoelektr modullar uchun standart sinov sharoitlari (**STC — Standard Test Conditions**) ga kiritilgan uchta asosiy parametrning biri bo‘lib, u bilan birga quyosh nurlanishi va modul harorati ham hisobga olinadi. Atmosfera massasining qiymati Yer yuzasidagi quyosh nurlanishining spektr tarkibiga ta’sir ko‘rsatadi, bu esa modullarning samaradorligiga bevosita ta’sir qiladi, chunki ularning sezgirligi yorug‘likning to‘lqin uzunligiga bog‘liq (batafsil ma’lumot uchun 3.5-bo‘limga qarang).Shunday qilib, fotoelektr modullar xarakteristikalarini baholashda faqat nurlanish toki zichligini emas, balki uning spektr tarkibini ham hisobga olish zarur. Atmosfera tashqarisida (AM=0) quyosh spektri nisbatan barqaror bo‘lib qoladi; ammo atmosfera orqali o‘tishda u o‘zgaradi — bu o‘zgarish atmosfera massasi ortishi bilan kuchayadi.

STC sharoitida AM1.5 Global (AM1.5G) nomli standartlashtirilgan quyosh spektri ishlatiladi — bu zenitdan 48,2° burchakda Quyosh pozitsiyasiga mos keladigan 1,5 atmosfera massasidagi referens spektr hisoblanadi. Belgilangan spektr IEC 60904-3 xalqaro standarti bilan tartibga solingan.

Izoh: Toshkentda maksimal quyosh nurlanishi davrida o‘rtacha zenit burchagi taxminan 41°, bu esa atmosfera massasiga AM1.41 ga mos keladi. Ushbu qiymat STC sharoitida qabul qilingan standart AM1.5 ga yaqin.



1.8-rasm. Azimut, balandlik va zenit burchagi.

Xulosa 1.8-rasmda ko‘rsatilgan bo‘lib, unda bir sxemada azimut**,** quyosh balandligi va zenit burchagi aniq ko‘rsatilgan.

Izoh: Osmon meridianasi — bu shimoldan janubga zenit orqali uzatilgan vertikal tekislik bo‘lib, osmonni sharqiy va g‘arbiy yarimlarga bo‘ladi.

§1.5. Fotoelektrik effect

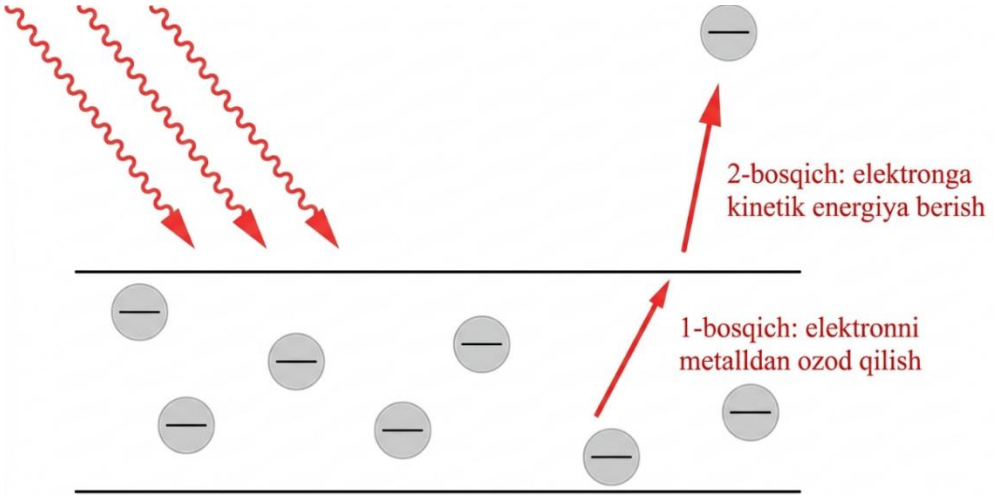
Fotoelektrik effekt yoki **fotoeffekt** — bu yorug‘lik (elektromagnit nurlanish) ta’sirida moddadan elektronlarning chiqarilishi bilan bog‘liq fizik hodisa.

Fotoeffektning ikki asosiy turi mavjud:

Tashqi fotoeffekt — elektronlar foton energiyasini so‘rib olib, moddadan, odatda metaldan chiqib ketadigan jarayon;

Ichki fotoeffekt — yorug‘lik ta’sirida yarimo‘tkazgich ichidagi elektronlar valentlik tasmadan o‘tkazuvchanlik tasmaga o‘tadi, materialdan chiqmasdan elektron-teshik juftlarini hosil qiladi va ularning harakati elektr tokini hosil qiladi.

Fotoeffekt mexanizmini tashqi fotoelektr effekt misolida ko‘rib chiqamiz. Metal ichida doimiy ravishda erkin elektronlar mavjud bo‘lib, ular struktura ichida erkin harakatlana oladi.



1.9-rasm. Tashqi fotoeffect.

Agar energiyasi $E=h\cdot\nu$ bo‘lgan foton metallga urilsa, bu energiya elektronni metall tarkibidan chiqarish uchun ishlatiladi — ya’ni elektron bilan metall atomlari orasidagi tortishish kuchini engib, unga ma’lum kinetik energiya beradi (1.9-rasm).

Metaldan elektronni chiqarish uchun zarur bo‘lgan energiya **ish funksiyasi** deb ataladi. Ish funksiyasi moddaga xos xususiyat bo‘lib, yorug‘likning chastotasi yoki intensivligiga bog‘liq emas.

Fotoeffekt uchun **Eynshteyn tenglamasi**, energiya saqlanish qonuniga asoslanib, quyidagicha ifodalanadi:

$$h \cdot v = h \cdot \frac{c}{\lambda} = A + E$$

bu yerda: A — ish funksiyasi, J; E — elektronning kinetik energiyasi, J.

Shuni ta’kidlash kerakki, faqat ma’lum energiyaga ega fotonlar (ya’ni to‘lqin uzunligi yoki chastotasi ma’lum bo‘lganlar) metall elektronini chiqarishi mumkin. Avval energiya ish bajarishga sarflanadi (elektronni metaldan ajratish uchun) va keyin unga kinetik energiya beriladi. Shu sababli, fotoelektr effekt sodir bo‘ladigan ma’lum bir **to‘lqin uzunligi** mavjud. Bu to‘lqin uzunligida foton energiyasi elektronni metall tarkibidan chiqarish uchun etarlidir (ya’ni ish funksiyasini engadi), ammo kinetik energiya bera olmaydi. Fotoelektr effekt to‘xtaydigan to‘lqin uzunligi **fotoeffektning qizil chegarasi** deb ataladi.

Izoh: Agar foton energiyasi ish funksiyasidan yuqori bo‘lsa (ya’ni fotoelektr effektning qizil chegarasidan oshsa), bitta foton faqat bitta elektronni chiqarishi mumkin. Shu bilan, chiqarilgan elektronlar soni tushayotgan fotonlar soniga proporsional bo‘ladi va yorug‘lik chastotasi chegara qiymatdan yuqori bo‘lsa, yorug‘lik intensivligiga bog‘liq bo‘ladi.

Metall ichida fotoeffekt sodir bo‘lganda, elektron tashqariga chiqariladi, shuning uchun uni foydali tok hosil qilishda ishlatish qiyin, chunki elektr sxemasining ishlashi uchun zaryad tashuvchi elementlarning yo‘naltirilgan toki yopiq tizimda talab etiladi. Bundan tashqari, metallarning ish funksiyasi yuqori, ko‘rinadigan yorug‘lik fotonlarining energiyasi esa infraqizil diapazonda — quyosh spektrining asosiy qismi — ko‘pincha metall sirtida samarali fotoeffekt hosil qilish uchun etarli emas. Shu sababli, **fotoelektrik modullarda** yarimo‘tkazgichlarning ichki fotoeffekti ishlatiladi: elektronlar materialni tark etmaydi, balki ichki elektr maydon ta’sirida struktura ichida yo‘naltiriladi va tashqi zanjirda tok hosil bo‘ladi.

Quyosh elementi (fotoelement) — bu ikki turdagi doplangan silikon qatlamidan tashkil topgan yarimo‘tkazgich qurilma:

n-turi — erkin elektronlari ortiqcha bo‘lgan qatlam (masalan, fosfor bilan doplangan);

p-turi — teshiklari ortiqcha bo‘lgan qatlam (masalan, bor bilan doplangan).

Izoh: Doplash — bu sof yarimo‘tkazgich materialiga (masalan, silikon) elektr xususiyatlarini o‘zgartirish maqsadida oz miqdorda ifloslantiruvchi element kiritish jarayoni. Kiritilgan dopant turiga qarab, ikki asosiy yarimo‘tkazgich turi farqlanadi:

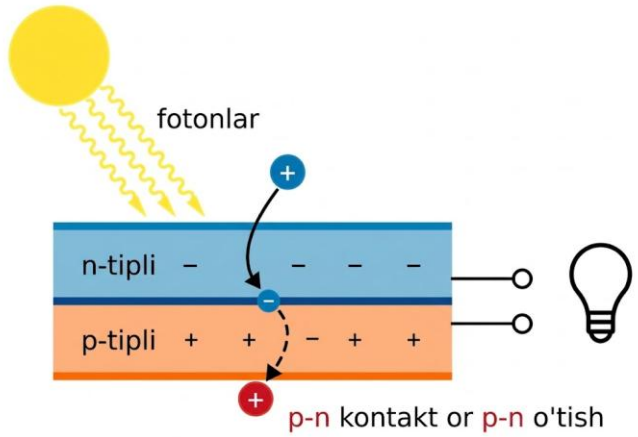
N-turi (negative — manfiy) — silicium atomlaridan bir elektron ko‘p bo‘lgan elementlar kiritilganda hosil bo‘ladi. Masalan, fosfor yoki arsen. Bunday dopantlar **donorlar** deb ataladi, chunki ular qo‘shimcha elektronlar — zaryad tashuvchilar beradi.

P-turi (positive — musbat) — silicium atomlaridan bir elektron kam bo‘lgan elementlar kiritilganda hosil bo‘ladi. Masalan, bor yoki indiy. Bunday ifloslantiruvchilar teshiklar hosil qiladi — elektron yetishmovchiligi bo‘lgan bo‘shliq, ular ham musbat zaryad tashuvchilar sifatida harakat qiladi.

Bu ikki qatlam uchrashgan joyda **p-n birikma** hosil bo‘ladi — bu yerda ichki elektr maydon yuzaga keladi. Ushbu maydon juda muhim: u zaryad tashuvchilarni yo‘naltiradi — elektronlarni **n-qismga**, teshiklarni **p-qismga**, shuningdek, ularning tez qayta birlashishining oldini oladi.

p-n birikma ichida depleksiya qatlami hosil bo‘ladi — bu erkin zaryadlar deyarli yo‘q bo‘lgan hudud. Bu potensial to‘siq yaratadi va zaryad tashuvchilarni teskari yo‘nalishda harakat qilishdan saqlaydi. Ichki elektr maydon tufayli elektronlar va teshiklar qayta birlashish sodir bo‘lishidan oldin qarama-qarshi yo‘nalishlarga ajraladi.

Ushbu ajralish **quyosh elementining terminalida elektr kuchlanishini** hosil qiladi. Tashqi yuklamalama ulanganda yo‘naltirilgan tok paydo bo‘ladi va fotoelektr elementning asosiy vazifasi — yorug‘likni elektr energiyasiga aylantirish boshlanadi (1.10-rasmga qarang).



1.10-rasm. Ichki fotoeffect.

Kristalning atom tuzilishida elektron faqat ikkita energiya tasmasidan birida mavjud bo‘lishi mumkin:

Valentlik tasmasi — elektronlar atomlarga mahkam bog‘langan va o‘tkazuvchanlik jarayonida qatnashmaydigan hudud;

O‘tkazuvchanlik tasmasi — elektronlar kristal ichida erkin harakatlana oladigan va elektr tokini hosil qiladigan hudud.

Bu ikki tasma orasida **taqiqlangan tasma (forbidden band)** mavjud — bu elektronlar mavjud bo‘la olmaydigan energiya oralig‘i. Elektron yoki valentlik tasmasida qoladi, yoki o‘tkazuvchanlik tasmasiga o‘tadi; oraliq holatlar mavjud emas.

Yarim o‘tkazgichda tok paydo bo‘lishi uchun ba’zi elektronlar valentlik tasmasidan o‘tkazuvchanlik tasmasiga o‘tish uchun etarli energiya olishi kerak, shu bilan taqiqlangan energiya oralig‘ini engadi. Bu o‘tish sodir bo‘lishi uchun, masalan, tushayotgan yorug‘lik foton energiyasi ushbu oraliq kengligiga teng yoki undan yuqori bo‘lishi lozim. O‘tkazuvchanlik tasmasiga kirganda, elektron erkin zaryad tashuvchiga aylanadi va elektr maydon ta’sirida harakatlanib, elektr tokining hosil bo‘lishiga hissa qo‘shadi.

Silikonning taqiqlangan tasma kengligi taxminan 1,1 elektronvolt (eV). Bu shuni anglatadiki, silikon kristalidagi elektron valentlik tasmasidan o‘tkazuvchanlik tasmasiga o‘tishi va tok hosil qilish jarayonida qatnashishi uchun kamida 1,1 eV

energiya olishi kerak. Foton energiyasi, elektronvolt (eV)da ifodalangan, uning to‘lqin uzunligi orqali quyidagi formula yordamida hisoblanadi:

$$\boldsymbol{E = \frac{1240}{\lambda}}$$

bu yerda: E — foton energiyasi elektronvolt (eV) da, λ — to‘lqin uzunligi nanometr (nm) da.

Agar E=1,1 eV deb olsak, quyidagicha qiymat olinadi: $\boldsymbol{\lambda = \frac{1240}{1{,}1} = 1127\ nm}$

Shunday qilib, taxminan 1100-1127 nm dan uzun to‘lqin uzunliklariga ega fotonlar silikonning taqiqlangan tasmasini engish uchun etarli energiyaga ega emas. Bunday fotonlar yarimo‘tkazgichdagi elektronlarni qo‘zg‘ata olmaydi va shu sababli elektr tokini hosil qilishda qatnashmaydi-ularning energiyasi asosan issiqlikka aylanadi. Natijada, taxminan 1100 nm dan uzun infraqizil fotonlar element orqali o‘tadi yoki issiqlikka aylanadi, lekin elektr energiyasini hosil qilmaydi. Bu shuni ko‘rsatadiki, faqat umumiy quyosh nurlanishi emas, balki uning to‘lqin uzunlik tarkibi, ya’ni spektral taqsimoti ham muhimdir.

Silikon quyosh elementlari uchun optimal nurlanishni so‘rilishi: 300–1100 nm oralig‘ida. Turli spektral mintaqalarning energiya hosil qilishga hissasi quyidagicha: Ultrabinafsha (300–400 nm) – taxminan 5%; Ko‘rinadigan yorug‘lik (400–700 nm) – taxminan 50–55%; Yaqin infraqizil (700–1100 nm) – taxminan 40–45%.

280 dan kichik to‘lqin uzunliklariga ega fotonlar:

- Shisha yoki himoya qoplamasi tomonidan so‘riladi, yarimo‘tkazgichga etib bormaydi;
- Agar etib kelsa, ortiqcha energiyasi issiqlik sifatida tarqaladi;
- Ultrabinafsha fotonlar materialga zarar etkazishi mumkin, shuning uchun panellar odatda bu diapazonni bloklovchi filtrlar bilan jihozlanadi.

1100 nm dan uzun to‘lqinli fotonlar (uzoqqa infraqizil diapazon):

Ularning energiyasi elektronlarni qo‘zg‘atish uchun etarli emas;

Bunday fotonlar so‘rilmaydi va hosil qilishda qatnashmaydi, balki tarqaladi yoki issiqlik sifatida so‘riladi.

Shockley–Queisser chegarasi. Fotoelektr effekt tabiati va mexanizmi energiya yo‘qotishlari bilan birga keladi, bu esa jarayon samaradorligi, ya’ni uning ishlash koeffitsiyenti masalasini yuzaga keltiradi. Quyosh elementsi samaradorligi tushayotgan quyosh nurlanishining qaysi qismi elektr energiyasiga aylantirilishini ko‘rsatadi. Biroq, bu parametr quyosh nurlanishining xususiyatlari va yarimo‘tkazgich materialining xususiyatlari bilan cheklangan bo‘lib, **Shockley–Queisser chegarasi** bilan belgilanadi.

Shockley–Queisser chegarasi — bitta p-n qo‘shma (single-junction) quyosh elementsining fotoelektr effekt va energiya saqlanish qonuniga asoslangan nazariy maksimal samaradorligi. Standart quyosh nurlanishi (AM1.5) va 25°C haroratda bu chegarasi taxminan 33,7% ga teng. Bu kontseptsiya birinchi marta 1961-yilda Vilyam Shockley va Hans Queisser tomonidan tasvirlangan.

Ushbu limit nafaqat silikon, balki standart sharoitda ishlaydigan har qanday bitta qo‘shma quyosh elementsi uchun amal qiladi. Optimal bant kengligi taxminan 1,34 eV bo‘lishi kerak. Silikonning bant kengligi taxminan 1,1 eV, shuning uchun uning nazariy maksimal samaradorligi pastroq — taxminan 29–31%.

Shockley–Queisser limiti ideal bitta qo‘shma yarimo‘tkazgichning maksimal samaradorligini ifodalaydi, bunda optik yo‘qotishlar, refleksiya yoki rekombinatsiya mavjud emas.

Chegara mavjud bo‘lishining asosiy sabablarini ko‘rib chiqamiz:

Yetarli energiyasi bo‘lmagan fotonlar yo‘qotilishi Har bir yarimo‘tkazgichning o‘ziga xos bant kengligi mavjud. Masalan, silikon uchun bu energiya ~1,1 eV (taxminan 1100 nm). Ushbu energiyadan past fotonlar tok hosil qila olmaydi — ular materialdan o‘tadi yoki issiqlikka aylanadi. Natijada, infraqizil nurlanishning bir qismi elektr energiyasiga aylantirilmaydi.

Ortib qolgan foton energiyasining yo‘qotilishi Bant kengligini engish uchun kerakli minimal energiyadan yuqori energiyaga ega fotonlar ham samarali

ishlatilmaydi. Masalan, 500 nm to‘lqinli fotonning energiyasi 2,48 eV, lekin siliconda 1,1 eV ishlatiladi, qolgan 1,38 eV issiqlik sifatida yo‘qoladi.

Termodinamik muvozanat sababli yo‘qotishlar Ideal elementda ham zaryad tashuvchilar hosil bo‘lishi va radiatsion rekombinatsiya o‘rtasida muvozanat yuzaga keladi — ayrim elektronlar va teshiklar qayta birlashadi.

Issiqlik emissiyasi sababli yo‘qotishlar 25°C haroratda ba’zi zaryad tashuvchilar p-n qo‘shmasidan termal energiya ta’sirida chiqib ketadi — bu tok yo‘qotilishiga olib keladi. Harorat oshgan sari bu effekt kuchayadi va element chiqish kuchlanishini kamaytiradi. Shunday qilib, Shockley–Queisser limiti bitta p-n qo‘shma bilan ishlaydigan an’anaviy quyosh elementlari uchun tabiiy chegarani tashkil etadi. Bu limit faqat ko‘p qo‘shmali yoki tandem texnologiyalari orqali oshirilishi mumkin.

Kengaytirilgan samaradorlikni oshirish usullari:

Ko‘p qo‘shmali elementda har bir foton energiyasiga mos keladigan yarimo‘tkazgich material ishlatiladi;

Bu usul issiqlik yo‘qotishlarini kamaytiradi va spektrning turli qismlaridagi fotonlarni samarali ishlatadi;

Ideal sharoitda cheksiz p-n qo‘shmalari bilan nazariy maksimal samaradorlik ~86,8% ga etadi.

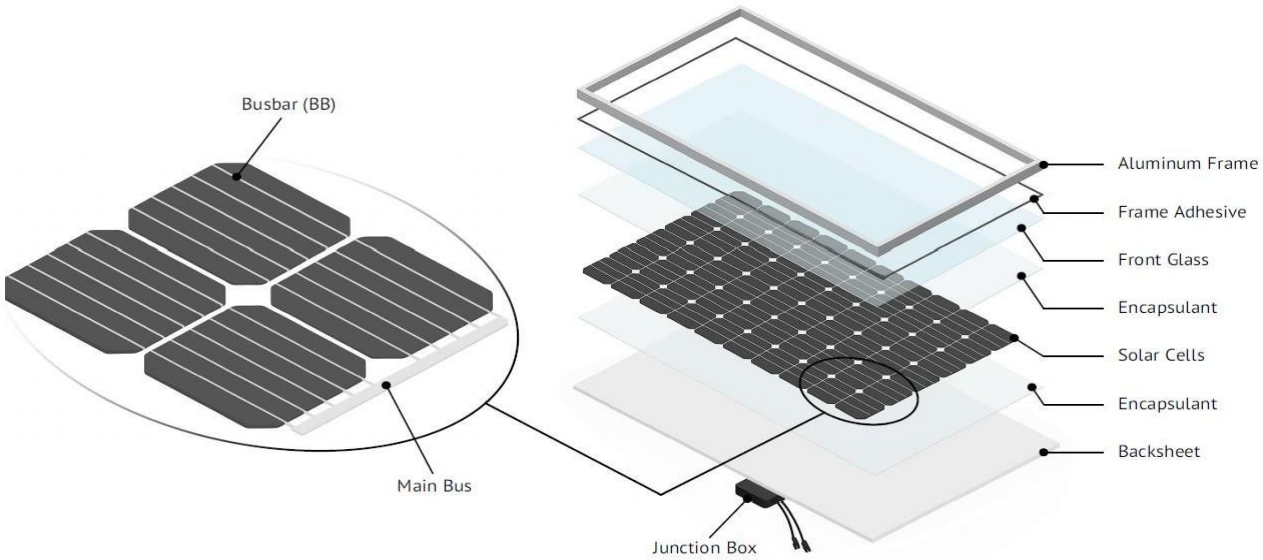
Silikon quyosh elementlaridagi energiya yo‘qotishlarning taxminiy taqsimoti: 1,1 eV dan past energiyali fotonlar tok hosil qilishda qatnashmaydi — yo‘qotish ~19–20%; 1,1 eV dan ortiq energiyali fotonlar issiqlik sifatida yo‘qoladi — yo‘qotish ~33–35%; Optik yo‘qotishlar (refleksiya, tarqalish, so‘rilish) — ~6–10%;

Elektr yo‘qotishlar (rekombinatsiya, kontakt qarshiligi, o‘tkazgich qarshiligi va boshqa ichki yo‘qotishlar) — ~10–15%.

2-BOB. QUYOSH ELEKTR STANSIYASI VA UNING ASOSIY ELEMENTLARI

§2.1 Fotovoltaik modullar

Fotovoltaik modul (PV modul), kundalik hayotda quyosh panellari deb ham ataladi, yarimo‘tkazgich materiallaridagi fotovoltaik effekt (ichki fotoeffekt) orqali quyosh nurini elektr energiyasiga aylantirish uchun mo‘ljallangan qurilma hisoblanadi. U bir-biriga ulangan bir nechta quyosh elementlaridan iborat bo‘lib, mustahkam mexanik tuzilma ichiga joylashtirilgan. Ushbu tuzilma modulga mustahkamlik, germetik muhrlanish va tashqi muhit ta’sirlariga nisbatan chidamlilikni ta’minlaydi.



2.1-rasm. Fotovoltaik modulning asosiy konstruktiv qismlari.

Fotovoltaik modulning (PVM) asosiy konstruktiv qatlamlari (elementlari), 2.1-rasmda ko‘rsatilgan, quyidagilardan iborat [15], [16]:

● **Alyuminiy ramka (Aluminum Frame)** — odatda anodlangan bo‘ladi, ya’ni uning yuzasi maxsus oksid qatlami bilan qoplangan. Bu qatlam korroziya, namlik, tuzlar va ultrabinafsha nurlanishiga yuqori darajada chidamlilikni ta’minlaydi. Anodlash shuningdek, ramka sirtining qattiqligini oshiradi va mexanik shikastlanishlarga nisbatan bardoshliligini kuchaytiradi.

● **Yelimli qistirma (Frame Adhesive)** — alyuminiy ramkani fotovoltaik modulning shisha yuzasiga mustahkam biriktirish uchun ishlatiladi.

● **Himoya oynasi (Front Glass)** — odatda temperlangan bo‘ladi; ikki tomonlama (bifacial) PV modullarida odatda 2 mm, bir tomonlama (monofacial) PV modullarida esa 3,2 mm qalinlikka ega. Ushbu oyna fotovoltaik elementlarni mexanik ta’sirlar, do‘l, chang, namlik va ultrabinafsha nurlanishidan himoya qiladi. Zamonaviy PV modullarda yuqori shaffoflikka ega yoki antirefleks (yorug‘likni qaytarmaydigan) oynalar qo‘llaniladi. Bunday oynalar past qaytish koeffitsientiga ega (ARC – Anti-Reflection Coating), bu esa modulning umumiy samaradorligini oshiradi. Oyna taxminan 300 nm dan past bo‘lgan ultrabinafsha nurlarni yaxshi susaytiradi; bunday nurlar elektr energiyasi ishlab chiqarishga hissa qo‘shmaydi, ammo polimer qatlamlarning degradatsiyasiga sabab bo‘lishi mumkin.

● **Yuqori kapsulyatsiya qatlami (Encapsulant)** — shisha va fotovoltaik elementlar orasida joylashgan, ularni himoya qiluvchi shaffof polimer materialdir. Odatda etilen-vinil-atsetat (EVA) asosida ishlab chiqariladi — bu maxsus termoreaktiv material hisoblanadi. U fotovoltaik elementlarni mahkamlash va germetik muhrlashni ta’minlaydi, shuningdek, elektr izolyatsiyasi vazifasini bajaradi hamda elementlar orasida elektr buzilishining oldini oladi. 400–1100 nm to‘lqin uzunliklari oralig‘ida taxminan 95% darajada yuqori optik shaffoflikka ega.

● **Fotovoltaik elementlar (Solar Cells)** — odatda monokristalli yoki polikristalli kremniy asosidagi elementlar bo‘lib, fotoelektr effekt orqali quyosh nurlarini elektr energiyasiga aylantirish uchun mo‘ljallangan.

● **Asosiy tok shinalari (Main Bus)** va **tok yig‘uvchi shinalar (BB – busbar)** — modul ichidagi fotovoltaik elementlardan elektr tokini yig‘ish va uzatish uchun xizmat qiladi.

● **Pastki kapsulyatsiya qatlami (Encapsulant)** — yuqori qatlam kabi shaffof polimer material bo‘lib, fotovoltaik elementlarni mahkamlash, ularni tashqi ta’sirlardan himoya qilish va elektr izolyatsiyasini ta’minlash vazifalarini bajaradi.

● **Orqa himoya qatlami (Backsheet)** — modulning orqa tomoniga qo‘yiladigan ko‘p qatlamli polimer plyonka bo‘lib, ftorpolimerlar (PVF, PVDF),

PET yoki ularning kombinatsiyalaridan tayyorlanadi. Namlik, ultrabinafsha nur, mexanik va issiqlik ta’sirlaridan himoya qiladi, shuningdek elektr izolyatsiyasi vazifasini bajaradi. Odatda oq rangda bo‘ladi (yorug‘likni ko‘proq qaytarish uchun), kamroq hollarda dekorativ maqsadlarda qora rangda bo‘ladi.

Bifacial (ikki tomonlama) PV modullarda orqa himoya qatlami o‘rniga **shaffof issiqlik bilan mustahkamlangan shisha (Heat Strengthened Glass)** qo‘llaniladi, bu esa modulning ikkala tomonidan ham elektr ishlab chiqarish imkonini beradi.

● **Ulash qutisi (Junction Box)** — modulning orqa qismiga o‘rnatilgan germetik quti bo‘lib, unda soyalanish vaqtida qizib ketishni oldini oluvchi bypass diodlar va kabellarni ulash uchun kontaktlar joylashgan. Panelning tashqi zanjirga ulanishini ta’minlaydi va teskari toklarning zararli ta’siridan himoya qiladi.

Kremniy kristallining turiga qarab fotovoltaik modullar **monokristalli (Mono-Si)** va **polikristalli (Poly-Si)** turlarga bo‘linadi. Texnik tafsilotlarga chuqur kirmasdan aytish mumkinki, hozirgi kunda monokristalli modullar bozorda deyarli to‘liq polikristalli modullarni siqib chiqargan. Bunga ularning yuqori samaradorligi, yaxshilangan harorat barqarorligi, mustahkamligi va uzoq xizmat muddati sabab bo‘lgan.

Polikristalli panellarning arzonroq narxi ularning texnik cheklovlarini qoplay olmaydi, bu esa ularni hozirgi sharoitda raqobatbardosh qilmaydi. Ayniqsa monokristalli panellar ishlab chiqarish narxining pasayib borayotgani hisobga olinganda, bu yanada yaqqol namoyon bo‘ladi.

Kristalli modullarga qo‘shimcha ravishda bozorda **yupqa qatlamli modullar (Thin-film photovoltaic modules)** ham mavjud. Ular amorf kremniy (a-Si), kadmiy tellurid (CdTe) yoki mis-indiy-galliy selenid (GIGS) asosida tayyorlanadi. Bunday modullar engil vazn, egiluvchanlik, soyalanish sharoitida degradatsiyaga chidamlilik va tarqoq yorug‘lik (diffuz nurlar) ostida yuqori ko‘rsatkichlarga ega bo‘lish kabi sezilarli afzalliklarga ega.

Shu bilan birga, ularning pastroq samaradorlikka ega bo‘lishi, namlikka sezuvchanligi va keng miqyosda ishlab chiqarishdagi murakkabliklar sababli,

yupqa qatlamli texnologiyalar hozircha cheklangan doirada qo‘llanadi. Ular asosan fasad integratsiyasi, avtonom qurilmalar yoki engil konstruktsiyalar kabi tor yo‘nalishlarda ishlatiladi.

Zamonaviy kosmik energetikada galliy arsenid (GaAs) hamda uning indiy fosfid va germaniy substrati bilan kombinatsiyasi (GaInP/GaAs/Ge) asosidagi ko‘p-bosqichli (multijunction) fotovoltaik elementlar eng keng qo‘llaniladi. Ular yuqori samaradorlik (30–35% dan yuqori) hamda radiatsiya, harorat tebranishlari va ochiq kosmos sharoitlariga chidamlilikni ta’minlaydi [17], [18]. Ularning an’anaviy kremniy elementlariga nisbatan asosiy ustunligi — yuqori maxsus samaradorlik, mustahkamlik va radiatsiya ta’sirida minimal degradatsiya bo‘lib, bular sun’iy yo‘ldoshlar va kosmik apparatlarning uzoq muddat orbitada ishlashi uchun juda muhimdir.

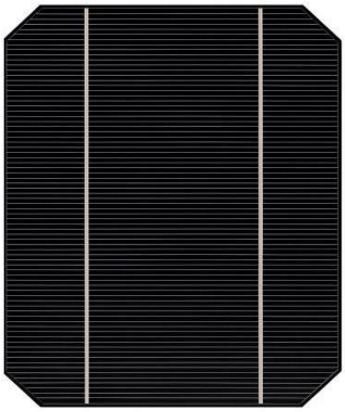
Ba’zi loyihalarda CIHZ asosidagi egiluvchan yupqa qatlamli elementlar ham sinovdan o‘tkazilmoqda — ular pastroq vazn va mexanik egiluvchanlikka ega. Biroq, samaradorlik va ishonchlilikning optimal nisbatiga erishilgani sababli, hozirda kosmik sohada III–V ko‘p-bosqichli strukturalar asosiy standart bo‘lib qolmoqda [19]. Ammo yuqori tannarxi tufayli bunday elementlar deyarli yer usti quyosh energiyasi tizimlarida qo‘llanilmaydi; bu yerda kremniy asosiy material bo‘lib qolmoqda.

Eslatma. *III–V atamasi Mendeleyev davriy jadvalining III va V guruh elementlaridan tashkil topgan yarimo‘tkazgich materiallar sinfini anglatadi (masalan, Ga, In, As, P). Ularga GaAs, InP, GaSb va boshqa birikmalar kiradi; ular yuqori samarali ko‘p-bosqichli fotovoltaik elementlar ishlab chiqarishda qo‘llaniladi.*

Fotovoltaik modullarni ularning tashqi ko‘rinishiga qarab farqlash mumkin: **monokristalli modullar** bir xil qoramtir rangga ega bo‘lib, ularning elementlari qirqilgan (yumaloqlashtirilgan) burchaklarga ega (2.2-rasm A ga qarang).

Polikristalli modullar esa ko‘kimtir-metallik tusga ega bo‘lib, ularning elementlari to‘g‘ri burchakli shaklda bo‘ladi (2.2-rasm B ga qarang). **Yupqa qatlamli modullar** esa kristalli modullardan farqli o‘laroq, silliq va mat yuzaga

ega bo‘ladi hamda alohida elementlarning ko‘rinadigan naqshiga ega emas; ular odatda to‘q ko‘k, binafsha yoki qora ranglarda uchraydi (4.2-rasm C ga qarang).



A. Monokristalli element

B. Polikristalli element

C. Yupqa qatlamli modul

2.2-rasm. Monokristalli (A), polikristalli (B) element va yupqa qatlamli modul (C).

Fotovoltaik modullarni (PVM) tasniflashga o‘tishdan oldin ularning asosiy degradatsiya turlarini sanab o‘tish zarur:

● **LID (Light-Induced Degradation — yorug‘lik ta’sirida degradatsiya)** — o‘rnatilganidan keyingi birinchi soatlar yoki kunlarda yuzaga keladi. Bu kremniydagi kislorod va borning o‘zaro ta’siri natijasida sodir bo‘lib, quvvatning 2–3% ga kamayishiga olib keladi.

● **LeTID (Light and Elevated Temperature Induced Degradation — yorug‘lik va yuqori harorat ta’sirida degradatsiya)** — uzoq muddat yorug‘lik va 50°C dan yuqori harorat ta’sirida namoyon bo‘ladi. 1–2 yil ichida quvvatning 3% gacha kamayishiga olib kelishi mumkin. Ba’zi hollarda issiqlik bilan regeneratsiya orqali tiklanishi mumkin.

●**PID (Potential Induced Degradation — potensial ta’sirlangan degradatsiya)** — elementlar va er orasidagi yuqori kuchlanishda (odatda 1000 V va undan yuqori tizimlarda) yuzaga keladi. Bu tok toki yo‘qolishiga va quvvatning kamaygan lokal zonalarining shakllanishiga olib keladi.

● **UV degradatsiya (Ultraviolet Degradation — ultrabinafsha nurlanish tufayli degradatsiya)** — old qoplama materiallariga, xususan EVA laminatiga ta’sir

qiladi, sarg‘ayish va yorug‘lik o‘tishini kamaytiradi. Bu bevosita elementga ta’sir qilmasa ham modulning chiqariladigan quvvatini kamaytiradi.

● **Mexanik degradatsiya (Mechanical Degradation)** — transport, noto‘g‘ri o‘rnatish yoki tashqi ta’sirlar (masalan, do‘l) tufayli yuzaga kelgan mikroyoriqlar sababli sodir bo‘ladi. Bunday shikastlanish lokal issiq nuqtalarni hosil qilishi va quvvat ishlab chiqarishni kamaytirishi mumkin.

● **Issiqlik degradatsiyasi (Thermal Degradation)** — vaqt o‘tishi bilan takroriy qizdirish va sovutish tsikllari paytida payvand bog‘lanishlarining buzilishi, delaminatsiya va elektr aloqalarining degradatsiyasiga olib keladi.

Muhim! Mexanik degradatsiya — *eng yashirin va aniqlash qiyin bo‘lgan shikastlanish turlaridan biridir. U ko‘pincha noto‘g‘ri o‘rnatish amaliyotlari tufayli yuzaga keladi: panellarga ortiqcha bosim tushishi, modullar ustida yurish, va uskuna bilan beparvo muomala qilish. Bunday shikastlanishning oqibatlari darhol sezilmaydi, balki oylar yoki hatto yillar o‘tib mikrocracklar, lokal issiq nuqtalar va ishlab chiqarish quvvatining kamayishi shaklida namoyon bo‘ladi. Shu sababli, qurilish maydonini muntazam nazorat qilish, o‘rnatuvchilar uchun qisqa brifinglar o‘tkazish, o‘rnatish standartlariga rioya qilinishini ta’minlash va ishning har bir bosqichida — yuklama tushirishdan tortib uskunani yakuniy mahkamlashgacha — sifatni baholash muhimdir.*

Fotovoltaik modullar ishlatiladigan kremniy turiga ko‘ra quyidagicha tasniflanadi:

2. P-turi (Positive type — musbat tur) — tarixiy jihatdan eng ko‘p ishlatilgan va an’anaviy tur hisoblanadi. Ushbu tur kremniyni bor bilan doplashga asoslangan bo‘lib, asosiy zaryad tashuvchilar sifatida ortiqcha “teshik”larni hosil qiladi. P-turi modullarning asosiy kamchiligi LID va LeTID degradatsiyasiga moyilligi bo‘lib, bu ularning samaradorligini kamaytiradi va yanada rivojlangan alternativalarga nisbatan qisqaroq xizmat muddatiga ega bo‘lishiga olib keladi.

3. N-turi (Negative type — manfiy tur) — hozirda asosiy istiqbolli yo‘nalish sifatida hisoblanadi. Bu tur kremniyni fosfor bilan doplashga asoslangan bo‘lib, asosiy zaryad tashuvchilar elektronlar hisoblanadi. U LID va LeTID

degradatsiyasiga chidamli bo‘lib, uzoq xizmat muddati va yuqori haroratlarda yaxshilangan barqarorlikni ta’minlaydi.

Fotovoltaik modullar elementlarni ishlab chiqarish texnologiyasiga ko‘ra quyidagicha tasniflanadi:

4. PERC (Passivated Emitter and Rear Cell — orqa tarafda pasivatsiyalangan emitter) — klassik texnologiyaning takomillashgan shakli bo‘lib, elementning orqa yuzasiga dielektrik qatlam qo‘llaniladi. Bu zaryad tashuvchilarining rekombinatsiyasini kamaytiradi va samaradorlikni oshiradi.

5. TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact — tunnel oksidi orqali pasivatsiyalangan kontakt) — kremniy yuzasiga yupqa tunnel oksidi va pasivatsiyalash qatlamlari qo‘llaniladi, bu esa o‘tkazuvchanlikni oshiradi va, ayniqsa N-turi elementlarda, degradatsiyani sezilarli darajada kamaytiradi.

6. HJT (Heterojunction Technology — gibrid birikma texnologiyasi) — kristalli kremniy (c-Si) va elementning ikkala tomonida yupqa amorf kremniy (a-Si:H) qatlamlarini birlashtirgan tuzilma bo‘lib, yuqori samaradorlik va yuqori haroratlarda barqaror ishlashni ta’minlaydi.

● **IBC (Interdigitated Back Contact — elementning orqa tomonidagi interdigitat kontaktlar)** — barcha tok yig‘uvchi elementlar elementning orqa qismida joylashadi, bu old yuzani yorug‘likni so‘rilishi uchun maksimal darajada ishlatishga imkon beradi va eng yuqori samaradorlikka erishadi; ammo bunday ishlab chiqarish murakkab va qimmatga tushadi.

p-turi kremniyga asoslangan PERC texnologiyasi uzoq vaqt davomida fotovoltaik modullar ishlab chiqarishida ommaviy standart bo‘lib kelgan (taxminan 2023 yilgacha). Biroq sanoat rivojlanishi bilan u asta-sekin n-turi kremniyga asoslangan ilg‘or yechimlar, xususan TOPCon texnologiyasi bilan almashtirildi. Masalan, 2025 yil boshiga kelib dunyoning etakchi ishlab chiqaruvchilaridan biri-Jinko Solar - o‘z mahsulot liniyasini to‘liq n-turi TOPCon modullarini ishlab chiqarishga o‘tkazdi.

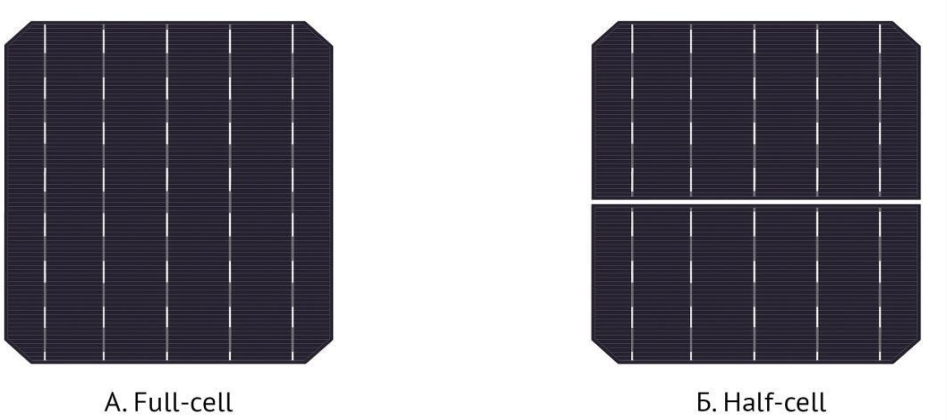
p-turi PERC texnologiyasidan voz kechishning asosiy sabablariga LID va LeTID degradatsiyasiga moyilligi, past issiqlik barqarorligi, samaradorlikni

oshirishdagi cheklangan imkoniyat va N-turi texnologiyalarga nisbatan qisqaroq xizmat muddati kiradi.

Fotovoltaik modullar element konstruksiyasiga ko‘ra tasniflanadi:

● **To‘liq element (Full-Cell yoki Full-Cut)** — klassik format bo‘lib, unda quyosh elementi butun holda ishlatiladi, bo‘linmaydi (2.3-rasm A).

● **Bo‘lingan (yarim) elementlar (Half-Cell yoki Half-Cut)** — ushbu dizaynda har bir element yarimga bo‘linadi va keyin yarimlar zanjirlar shaklida ulanadi, to‘liq o‘lchamdagi elementlar kabi (2.3-rasm B).



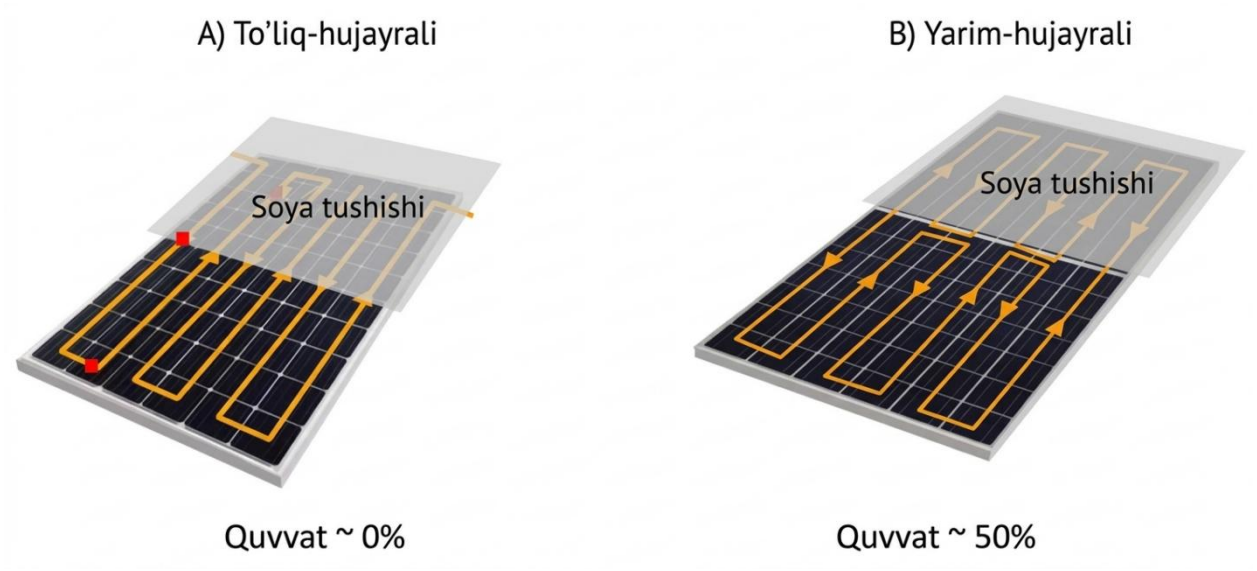
2.3-rasm. To‘liq (Full-Cell) va yarim (Half-Cell) elementli fotovoltaik modular.

To‘liq elementli (Full-Cell) fotovoltaik modullar uzoq vaqt davomida barcha fotovoltaik modullarda ishlatilgan; ammo hozirda ular deyarli to‘liq **Yarim element (Half-Cell)** texnologiyasiga asoslangan samaraliroq yechimlar bilan almashtirilgan.

Yarim element (Half-Cell) texnologiyasining afzalliklari:

● Yarim elementlarda elektr toki **Full-Cell** modullarga nisbatan yarimga kamayadi. Bu ichki yo‘qotishlarni to‘rt baravar kamaytiradi, isitilish kamayadi, issiq nuqtalar (Hot Spot) hosil bo‘lish xavfi kamayadi va modulning umumiy samaradorligi oshadi.

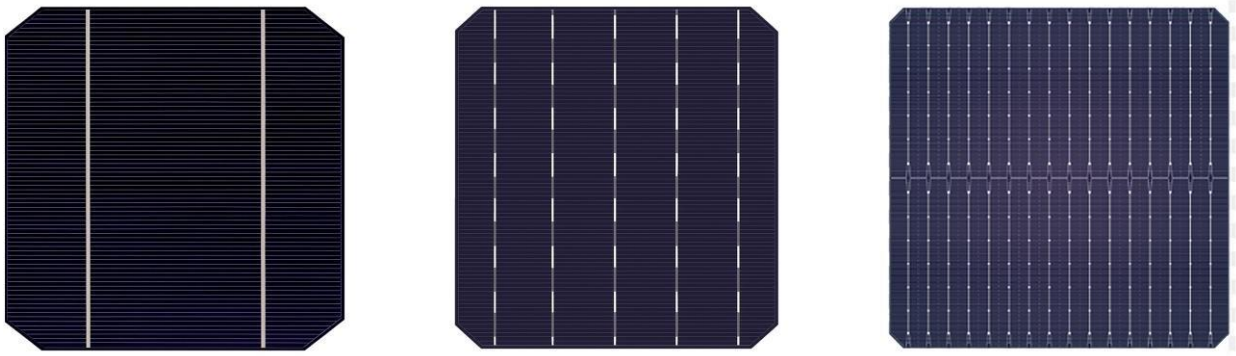
● Elektr aloqasi nuqtai nazaridan, **Half-Cell** moduli ikki mustaqil yarimga bo‘linadi. Qisman soyalanish yuzaga kelsa (masalan, qishda Quyosh past bo‘lgan paytda modulning pastki qismi soyalanadi), yuqori yarim cheklovlarsiz ishlashni davom ettiradi. Shu sababli, **to‘liq elementli modullardan farqli o‘laroq (2.4-rasm A)**, faqat quvvatning yarmi yo‘qotiladi (2.4-rasm B).



2.4-rasm. Qisman soyalanish sharoitida to‘liq (A) va yarim elementli (B) modullarning ishlash jarayoni.

Fotovoltaik modullardagi issiqlik yo‘qotishlari va samaradorlik asosan quyosh elementining yuzasida chop etilgan **tok yig‘uvchi shinalar (BB — Busbar)** konfiguratsiyasiga bog‘liq. Shinalar soni oshgani sari, ularning va “tok yig‘uvchi barmoqlar” (Finger Grid) deb ataladigan, element yuzasiga teng taqsimlangan yupqa metall chiziqlar orasidagi masofa kamayadi. Barmoqlar kremniy qatlamining butun yuzasida hosil bo‘lgan elektr tokini yig‘ib, qalinroq shinalarga (BB) uzatadi. Shinalar orasidagi masofaning kamayishi barmoqlar uzunligini qisqartiradi, qarshilik va issiqlik yo‘qotishlarini kamaytiradi va natijada modulning umumiy samaradorligini oshiradi.

Dastlab, 2BB yoki 3BB konfiguratsiyalari (2.5-rasm A) ishlatilgan, keyinchalik yo‘qotishlarni kamaytirish va ishonchlilikni oshirish maqsadida 4BB va 5BB konfiguratsiyalariga o‘tkazilgan (2.5-rasm B). Hozirgi kunda zamonaviy modullarning aksariyati **Multi Busbar (MBB)** konfiguratsiyasini ishlatadi, bunda 16 yoki undan ortiq shinalar mavjud (2.5-rasm B). Bu yo‘qotishlarni sezilarli darajada kamaytiradi, samaradorlikni oshiradi va mikrocracklarga chidamlilikni yaxshilaydi. Shinalar sonining ortishi shinalar orasidagi masofaning kamayishiga olib keladi.



2.5-rasm. Tok shinalari (BB — Busbar) soniga qarab fotovoltaik element turlari.

Eslatma. Hozirgi vaqtda **shinasiz (busbar-less) texnologiyalar** faol rivojlanmoqda; xususan, **Shingled texnikasi** ilg‘or usul bo‘lib, unda quyosh elementlari tom qoplamasidagi shingllar kabi bir-birining ustiga yopishtiriladi (shuning uchun nomi: *shingled* — “shingllar kabi joylashtirilgan”). Ushbu texnologiyada elementlar oldindan tor chiziqlarga kesiladi va ular orasidagi ulanishlar payvandlash orqali emas, balki **o‘tkazuvchan yopishtiruvchi (ECA — Electrically Conductive Adhesive)** yordamida amalga oshiriladi.

Ushbu yondashuv natijasida:

● Soyalanishni keltirib chiqaruvchi shinalar yo‘qligi tufayli butun element yuzasi faol qoladi va samaradorlik oshadi;

● Payvandlashning yo‘qligi issiqlik stressini kamaytiradi va ishonchlilikni oshiradi;

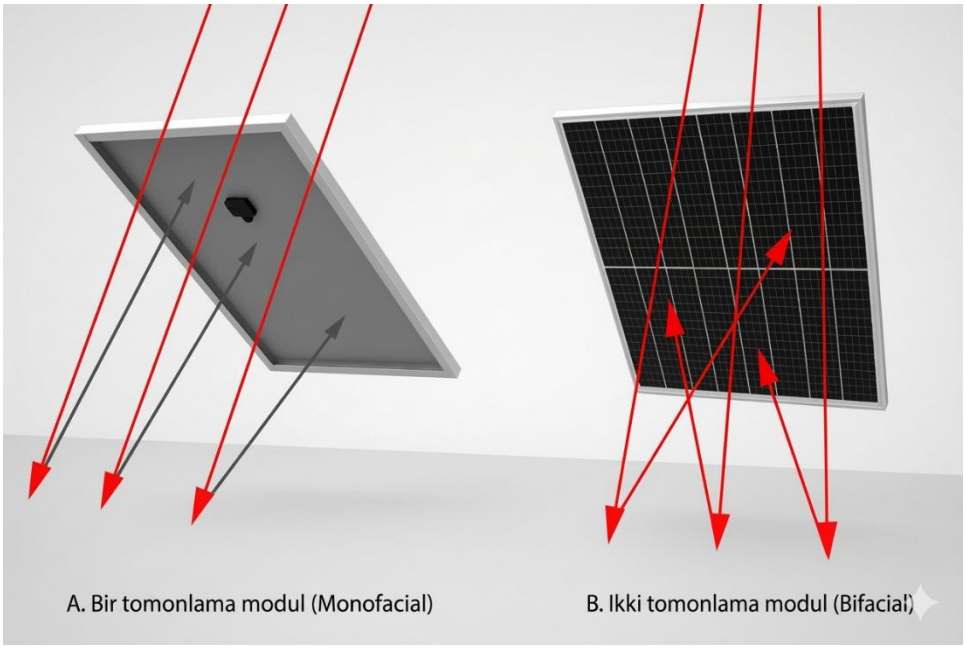
● Elementlar parallel ulanadi va mustaqil ishlay oladi, shuning uchun qisman soyalanishga chidamlilik oshadi.

Fotovoltaik modullar **yorug‘likni qabul qiluvchi tomonlar soniga** qarab quyidagicha tasniflanadi:

● **Monofacial (bir tomonlama)** — elektr energiyasi faqat old (yorug‘lik tushadigan) tomonda hosil bo‘ladigan fotovoltaik modullar. Bunday modullarda orqa qoplama qatlam (odatda fluoropolimerdan tayyorlangan backsheet) mavjud

bo‘lib, u himoya vazifasini bajaradi, lekin energiya ishlab chiqarishga qatnashmaydi. Bu uzoq vaqt bozorni egallab kelgan klassik tur hisoblanadi (2.6- A rasm).

- **Bifacial (ikki tomonlama) modullar** — quyosh nurlarini old va orqa tomondan qabul qila oladi. Orqa tomoni temperlangan shishadan iborat bo‘lib, fotonlarning elementga kirishiga imkon beradi. Oynadan, tomdan, qor yuzasidan va boshqa manbalardan aks etgan yorug‘lik qo‘shimcha energiya hosil qiladi — energiya oshishi 5% dan 25% gacha yoki undan ham ko‘proq bo‘lishi mumkin, o‘rnatish sharoitlariga (albedo, yuzaga masofa, balandlik, yo‘nalish va boshqalar) bog‘liq (2.6- B rasm).

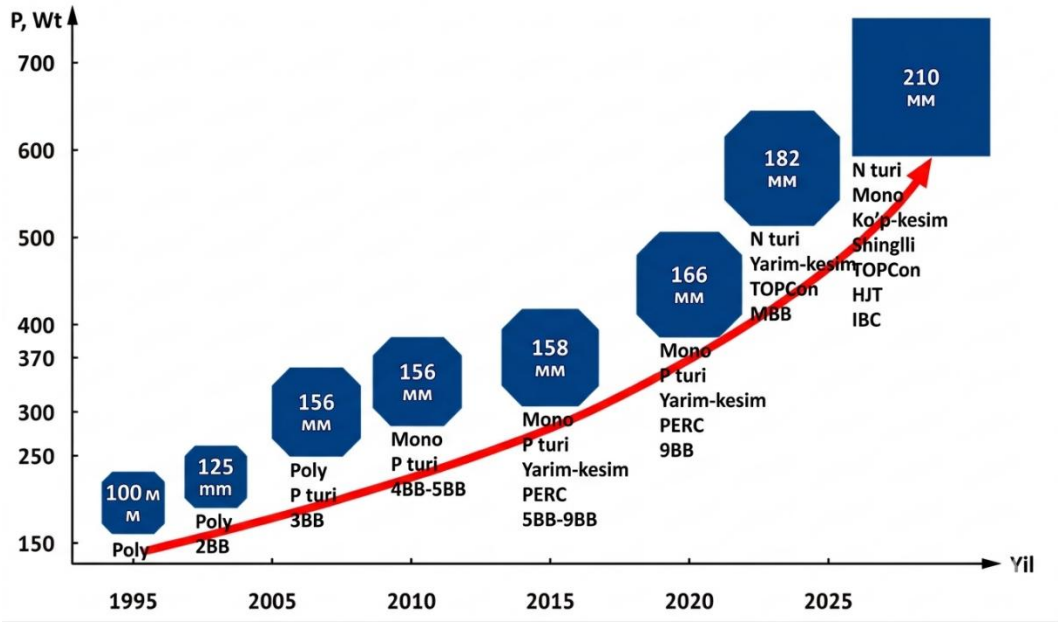


2.6-rasm. Monofacial (A) va bifacial (B) fotovoltaik modular.

Eslatma. Bifacial fotovoltaik modullarning qo‘shimcha afzalligi — qor tezroq eriydi. Buning sababi shundaki, panellar orqa tomoniga tushgan aks etgan quyosh nuri orqali ham elektr energiyasi ishlab chiqaradi va isitiladi.

Ushbu effekt PV modulning azimut burchagi janubdan (180°) qanchalik uzoqlashsa, shunchalik kuchayadi, chunki modulning orqa tomoniga tushadigan aks etgan quyosh nuri toki shunga muvofiq oshadi.

2.7-rasmda quyosh elementlari va modul texnologiyalarining rivojlanishini ko‘rsatadigan grafik taqdim etilgan, u texnologik taraqqiyot dinamikasini umumiy tushunish maqsadida berilgan.



2.7-rasm. Quyosh elementlari va fotovoltaik modullar texnologiyasining rivojlanishini ko‘rsatadigan grafik.

Hozirgi kunda amaliyotda asosan **N-tipli kremniy asosida ishlab chiqarilgan monokristall fotovoltaik modullar** qo‘llaniladi. Ular **TOPCon texnologiyasi**, yarim elementli (Half-Cut) va ko‘p shinali (MBB — Multi Busbar) strukturalarga ega. Kelajakda istiqbolli yo‘nalishlar **N-tipli kremniy asosidagi HJT va IBC texnologiyalari** bo‘lib, ular yuqori samaradorlik, past degradatsiya va yuqori haroratlarda barqaror ishlashni ta’minlaydi. Bundan tashqari, **shinglesiz dizaynlar (Shingled)**, orqa kontaktli elementlar va ko‘p bo‘lakli formatlar (masalan, 1/3-cut) faol rivojlanmoqda.

§2.2. Sinov sharoitlari (STC, NOCT va NMOT).

Fotovoltaik elektr stansiyasining chiqish quvvati va energiya ishlab chiqarishi bir nechta omillarga bog‘liq: quyosh nurlanishi zichligi va spektral tarkibi, modullar burchagi va yo‘nalishi, shamol tezligi, modul bilan yuzasidagi havolanish bo‘shligi,

element harorati va boshqa sharoitlar. Modul parametrlarini standartlashtirilgan taqqoslash va ishlashini baholash maqsadida texnik hujjatlarda ularning parametrlari belgilangan **sinov sharoitlari**ga mos ravishda ko‘rsatiladi [20].

Chunki ushbu sharoitlar chiqish quvvati va samaradorlikka sezilarli ta’sir qiladi, muhandislar ularning farqlarini tushunib, olingan ma’lumotlarga asoslanib modullarni to‘g‘ri taqqoslashi lozim. Amaliyotda uch turdagi sinov sharoitlari eng ko‘p qo‘llaniladi: **STC, NOCT va NMOT** [21], [22], [23]. Keling, ularni batafsil ko‘rib chiqamiz.

STC (Standard Test Conditions – standart laboratoriya sharoitlari) — fotovoltaik modullar nominal xususiyatlari o‘lchanadigan belgilangan parametrlardir. Ular quyidagilarni o‘z ichiga oladi: quyosh nurlanishi zichligi **1000 W/m²**, element harorati **25 °C**, va **AM1.5** havo massasi spektral taqsimoti. Bu sharoitlar idealizatsiyalangan bo‘lib, turli modul modellari taqqoslash uchun ishlatiladi; ammo ular haqiqiy ish sharoitlarini aks ettirmaydi. Xalqaro standartlarga muvofiq, modulning elektr parametrlarini STC sharoitida ko‘rsatish majburiy bo‘lib, har bir fotovoltaik modulning texnik hujjatlarida kiritilishi lozim.

STC sharoitlarining asosiy kamchiligi — ular haqiqiy ish sharoitlaridan uzilganligidadir. Laboratoriya sinovlarida element harorati 25°C da saqlanadi (odatda majburan sovutish yordamida), holbuki quyosh nurlanishi ostida haqiqiy o‘rnatishlarda modullar 50–75°C yoki undan yuqori haroratga etishi mumkin. Shuningdek, STC da qabul qilingan 1000 W/m² quyosh nurlanishi zichligi cho‘qqi qiymatlarga to‘g‘ri keladi, u esa ko‘p hududlarda faqat ochiq kunlarda qisqa muddat yuz beradi. Bundan tashqari, AM1.5 havo massasi spektral taqsimoti shartli standart bo‘lib, haqiqiy meteorologik va geografik sharoitlarni aks ettirmaydi. Shu omillar natijasida STC sharoitida ko‘rsatilgan parametrlar haqiqiy sharoitdagi modul samaradorligini sezilarli darajada oshirib ko‘rsatadi.

Haqiqiy ish sharoitlarining modul ishlashiga ta’sirini baholash uchun 1980-yillar oxiri va 1990-yillar boshida NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) parametri joriy etildi — u odatiy atrof-muhit sharoitlarida va ochiq zanjirda elementning nominal haroratini ifodalaydi.

NOCT va STC sharoitlarining asosiy farqi shundaki, STC da element harorati 25°C ga qattiq belgilangan bo‘lsa, NOCT da atrof-muhit harorati 20°C ga belgilangan va element harorati quyidagi standart sharoitlar ta’sirida tabiiy ravishda aniqlanadi: quyosh nurlanishi 800 W/m², modul orqa yuzasida shamol tezligi 1 m/s, 45° burchak, va modul ochiq zanjirda ishlashi, ya’ni elektr yuklamasiz.

Ushbu sharoitlar haqiqiy ish muhitiga yaqinroq bo‘lib, natijada elementning harorati modul ishlash paytida qanchalik isitilishini ko‘rsatadi. NOCT qiymati past bo‘lsa, modulning ish harorati past va samaradorligi yuqori bo‘ladi.

NOCT modulni to‘liq sinov sharoitlari sifatida qabul qilinmaydi, balki modulning issiqlik xulq-atvorini tavsiflovchi qo‘shimcha parametr sifatida xizmat qiladi. NOCT elementning aniq harorati emas, balki modul dizayni va ishlatilgan materiallar asosida o‘rtacha qiymat ekanligi tushunilishi kerak.

Haqiqiy sharoitlarda, quyosh elementlarining harorati atrof-muhit haroratidan **15–30°C** ga yuqori bo‘lishi mumkin. Yuqori sifatli modullar odatda yaxshi issiqlik tarqalish xususiyatlariga ega bo‘lib, NOCT sharoitida (atmosfera harorati 20°C) 40–45°C dan oshmaydi, bu esa harorat oshishi bilan bog‘liq quvvat yo‘qotishlarini minimallashtiradi. Aksincha, past issiqlik o‘tkazuvchanlikka ega modullar ortiqcha qizib, samaradorlikni pasaytiradi. Masalan, **JKM5 65N-72HL4** modulining texnik xususiyatida NOCT qiymati **45±2°C** ko‘rsatilgan bo‘lib, uning barqaror issiqlik xususiyatlarini namoyish etadi.

Eslatma. NOCT o‘lchash sharoitlari modulning orqa tomoni ochiq bo‘lishini, ya’ni tabiiy havo aylanishi orqali erkin sovishini nazarda tutadi. Shu sababli, issiqlikni samarali chiqarish va komponentlarning qizib ketishining oldini olish uchun — ayniqsa modullar tomga to‘g‘ridan-to‘g‘ri yotqizib o‘rnatilganda — modul va yuzaning orasida ventilyatsiya bo‘shlig‘i bo‘lishi juda muhim. Bu issiqlikning to‘planishini bartaraf etadi va fotoelektrik modulining ish samaradorligini saqlab qoladi.

Ishlab chiqaruvchilar texnik qo‘llanmalarida modul bilan tom orasidagi minimal masofa **kamida 100 mm** bo‘lishi kerakligini ta’kidlaydilar.

Texnik hujjatlarda ko‘rsatilgan **NOCT parametri** yordamida quyidagi formula asosida atrof-muhit haroratidan kelib chiqqan holda fotoelement haroratini taxminan hisoblash mumkin:

$$\boldsymbol{T_c = T_{amb} + \frac{G}{800} \cdot (NOCT - 20)}$$

bu yerda: **T_c** – fotoelement harorati, °C; **T_amb** – atrof-muhit harorati, °C; **G**– quyosh nurlanishi zichligi, W/m².

Shunday qilib, **NOCT parametri** berilgan quyosh nurlanishi sharoitida fotoelement harorati atrof-muhit haroratidan qanchaga oshishini taxminan aniqlash imkonini beradi. Bu ma’lumot harorat tufayli yuzaga keladigan quvvat yo‘qotishlarini hisoblashda hamda ayniqsa yozning yuqori haroratlarida modullarning ishchi kuchlanishini aniqlashda juda muhimdir.

Biroq, **NOCT parametrining kamchiligi** shundaki, u modul **ochiq zanjir rejimida**, ya’ni elektr yuklamalamasisiz aniqlanadi. Bu esa modul real sharoitda yuklamalama ulanib, maksimal quvvat nuqtasida (MPP) ishlaydigan holatni aks ettirmaydi. Shu sababli, 2016-yildan boshlab xalqaro IEC 61215 standarti NOCT o‘rniga real ishlash sharoitlariga yaqinroq bo‘lgan ko‘rsatkich — **NMOT** (Nominal Module Operating Temperature) ni joriy qildi. Unda modul yuklamalama ostida ishlaydi va fotoelement harorati real ish jarayoniga yaqin sharoitlarda aniqlanadi [24], [25]. Shu bilan birga, boshqa test shartlari o‘zgarmagan: quyosh nurlanishi (800 W/m²), atrof-muhit harorati (20°C), shamol tezligi (modul orqa qismida 1 m/s), modulning og‘ish burchagi (45°).

Keling, atrof-muhit harorati 40°C, quyosh nurlanishi zichligi 1000 W/m² va **NOCT = 45°C** bo‘lgan sharoitda fotoelement haroratini hisoblab chiqamiz.:

$$T_c = T_{amb} + \frac{G}{800} \cdot (NOCT - 20) = 40 + \frac{1000}{800} \cdot (45 - 20) = 71{,}25C$$

Eslatma. NMOT va NOCT sharoitlarida havo massasi (AM) STC dagidek qat’iy belgilanmagan bo‘lsa-da, ko‘plab etakchi ishlab chiqaruvchilar texnik hujjatlarida ma’lumotlarning taqqoslanishini ta’minlash uchun AM1.5 qiymatini qayd etishda davom etmoqda.

NMOT sharoitidagi harorat, odatda, NOCT dagidan yuqoriroq bo‘ladi, chunki NMOT o‘lchovida modul **maksimal quvvat nuqtasida (MPP)** ishlaydi — ya’ni fotoelementlar orqali tok oqadi va ichki qarshiliklarda energiya yo‘qotilishi sodir bo‘ladi. Bu esa NOCT rejimiga qaraganda modullarni qo‘shimcha ravishda qizdiradi. NOCT rejimida modul ochiq zanjir bo‘lib, unda tok oqmaydi.

Keling, atrof-muhit harorati 40°C, quyosh nurlanishi zichligi 1000 W/m² va **NOCT = 45°C** bo‘lgan sharoitda fotoelement haroratini hisoblab chiqamiz.:

$$T_c = T_{amb} + \frac{G}{800} \cdot (NOCT - 20) = 40 + \frac{1000}{800} \cdot (45 - 20) = 71{,}25C$$

Eslatma. Garchi NOCT rasmiy ravishda NMOT bilan almashtirilgan bo‘lsada, ko‘plab yirik ishlab chiqaruvchilar hali ham texnik pasportlarda NMOT o‘rniga NOCT ko‘rsatkichini berishda davom etmoqda. Buning sabablari — sanoatdagi uzoq yillik amaliyot, bozorga moslashuv inertligi, majburiy o‘tish talablarining yo‘qligi va marketing omillari (chunki NOCT qiymati NMOT ga qaraganda yuqoriroq bo‘ladi).

§2.3. Fotovoltayik modulning elektr parametrlari va Volt-Amper xarakteristikasi

Fotovoltaik modulning elektr parametrlari uning ma’lum yoritilish va harorat sharoitlarida elektr energiyasi ishlab chiqarish qobiliyatini tavsiflaydi. Asosiy parametrlarga quyidagilar kiradi [13], [26], [27]:

Qisqa tutashuv toki (Isc — short-circuit current) — bu fotovoltaik modul yuklamalamasiz sharoitda, ya’ni musbat va manfiy qutblar bevosita bir-biriga ulanib, zanjir qisqa tutashganda ishlab chiqarishi mumkin bo‘lgan eng katta tok**.**

Fizik ma’noda bu tok quyosh elementlari tomonidan yutilgan fotonlar soniga bog‘liq va quyosh nurlanish intensivligiga to‘g‘ridan to‘g‘ri proporsionaldir. Yoritilish zichligi (W/m²) qanchalik yuqori bo‘lsa, ishlab chiqariladigan tok shuncha katta bo‘ladi.

Shuningdek, element harorati oshganda Isc biroz ortadi.

Ochiq zanjir kuchlanishi (Uoc — open-circuit voltage). Moduldan tok oqmayotgan, ya’ni zanjir uzilgan va modul yuklamalamadan ajratilgan holatda hosil bo‘ladigan eng katta kuchlanish**.** Fizik nuqtai nazardan, ochiq zanjir kuchlanishi quyosh elementlaridagi p–n o‘tish xossalariga va fotoeffekt natijasida hosil bo‘lgan zaryadlarning to‘planishiga bog‘liq.

Asosiy tashqi omil — **harorat**: element harorati ortganda kuchlanish kamayadi, soviganda esa ortadi.

Maksimal quvvat nuqtasidagi tok (I_{mp}). Modul eng yuqori elektr quvvatini ishlab chiqaradigan nuqtadagi tok. Imp har doim Isc dan kichik bo‘ladi.

Maksimal quvvat nuqtasidagi kuchlanish (U_{mp}). Modul eng katta quvvatni beradigan nuqtadagi kuchlanish. U_{mp} har doim U_{oc} dan past bo‘ladi, chunki yuklama ulanganida ichki qarshiliklarda kuchlanish yo‘qotilishi yuz beradi.

Maksimal quvvat (P_{max} yoki P_{mp}). Modul ma’lum sharoitlarda (odatda STC) ishlab chiqarishi mumkin bo‘lgan **eng katta elektr quvvati**.

Hisoblash formulasi: $\mathbf{P_{max} = I_{mp} \times U_{mp}}$

To‘ldirish koeffitsienti (FF). Modulning maksimal quvvatini qisqa tutashuv toki va ochiq zanjir kuchlanishi ko‘paytmasiga nisbati:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} \cdot U_{OC}}$$

FF modulning tok va kuchlanish imkoniyatlaridan qanchalik samarali foydalanishini ko‘rsatadi. U quyosh elementlari sifati, kontakt qarshiliklari va modul konstruktsiyasiga bog‘liq.

Foydali ish koeffitsienti (η). Fotovoltaik modulga tushayotgan quyosh energiyasining qaysi qismi elektr energiyasiga aylantirilishini bildiradi.

Foizlarda ifodalanadi:

$$\eta = \frac{P_{max}}{E \cdot S} \cdot 100\%$$

bu yerda: **Pmax** — modulning maksimal quvvati, W; **E** — nurlanish toki zichligi, W/m^2; **S** — modul yuza maydoni, m^2.

Samaradorlik quyosh elementlari texnologiyasi, harorati, sirtning qaytaruvchanligi va ishlab chiqarish sifatiga bog‘liq. Samaradorlik qanchalik yuqori bo‘lsa, modul quyosh nurlaridan shunchalik samarali foydalanadi.

Eslatma. Amaliyotda ko‘pchilik foydalanuvchilar **modulning nominal quvvati qanchalik katta bo‘lsa, sifati shunchalik yaxshi** deb o‘ylashadi. Aslida esa quvvat ko‘pincha **samaradorlikni oshirish hisobiga emas**, balki **modul yuzasini kattalashtirish** orqali ko‘paytiriladi.

Modul o‘lchamlari va og‘irligi katta bo‘lib boradi, ammo ramka o‘lchami o‘zgarmasligi sababli mexanik shikastlarga moyilligi ortadi. Shunday ekan, **faqat quvvat ko‘rsatkichi modulning texnologik ustunligini bildirmaydi**. Modullarni solishtirishda ularning **samaradorligi** yoki **kvadrat metrga nisbatan quvvati** asosiy mezon bo‘lishi kerak.

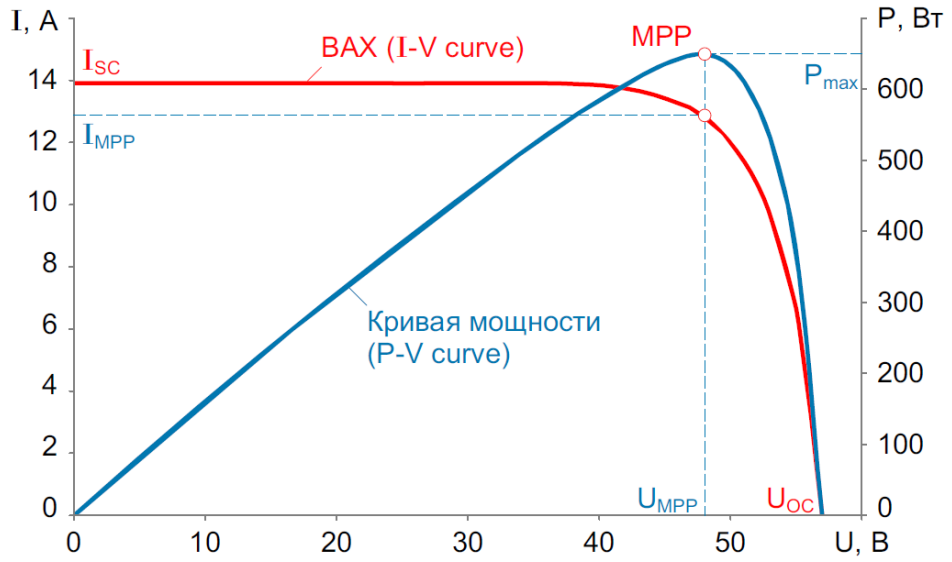
Fotovoltaik modulning ishlashi **tok–kuchlanish xarakteristikasi (I–V curve)** orqali grafik ko‘rinishda tasvirlanadi. U modulning tok chiqishining kuchlanishga bog‘liqligini ko‘rsatadi (odatda STC sharoitida). I–V chizig‘i ikki ekstremal nuqta bilan chegaralanadi:

- nol kuchlanishda **qisqa tutashuv toki (Isc)**,
- nol tokda **ochiq zanjir kuchlanishi (Uoc)**.

Ushbu oraliqda **maksimal quvvat nuqtasi (MPP — Maximum Power Point)** joylashgan bo‘lib, aynan shu nuqtada modul yuklamalamaga eng ko‘p energiya beradi. Real tizimlarda bu nuqtani invertorlardagi **MPPT algoritmi** aniqlab turadi.

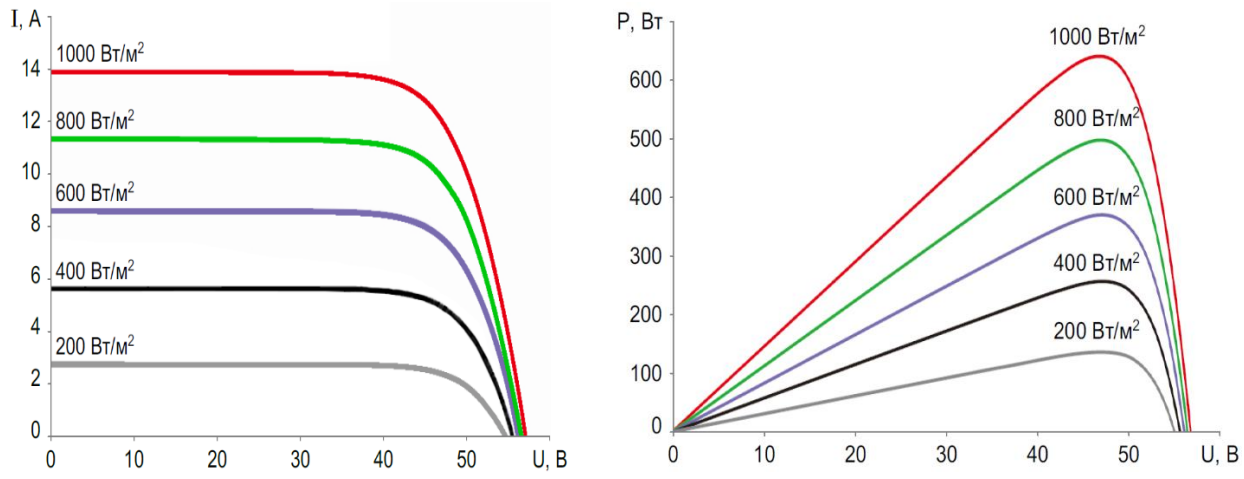
I–V chizig‘ining har bir nuqtasida tok va kuchlanishning ko‘paytmasi hisoblanib, P–V chizig‘i (quvvat xarakteristikasi) hosil qilinadi. Bu grafiga qarab maksimal quvvat nuqtasi aniq ko‘rinadi.

2.8-rasmda 1000 W/m² nurlanish zichligi ostida STC sharoitida o‘lchangan 640 W quvvatli monokristalli modulning I–V va P–V xarakteristikalari keltirilgan.



2.8-rasm. Volt-Amper xarakteristikasi (I–V chizig‘i) va quvvat chizig‘i (P–V chizig‘i).

Volt-Amper xarakteristikasi tashqi sharoitlarning o‘zgarishiga juda sezgir. Quyosh nurlanishi ortishi yoki kamayishi bilan fotovoltaik modulning chiqish toki deyarli mutanosib ravishda o‘zgaradi, chunki yorug‘lik intensivligi tushayotgan fotonlar sonini, demak, hosil bo‘layotgan zaryad tashuvchilar sonini belgilaydi. Bunday sharoitda ochiq zanjirdagi kuchlanish (U_{oc}) esa deyarli o‘zgarmaydi, chunki uning nurlanishga bog‘liqligi logarifmik xarakterga ega.



A. BAX B. Quvvat grafigi

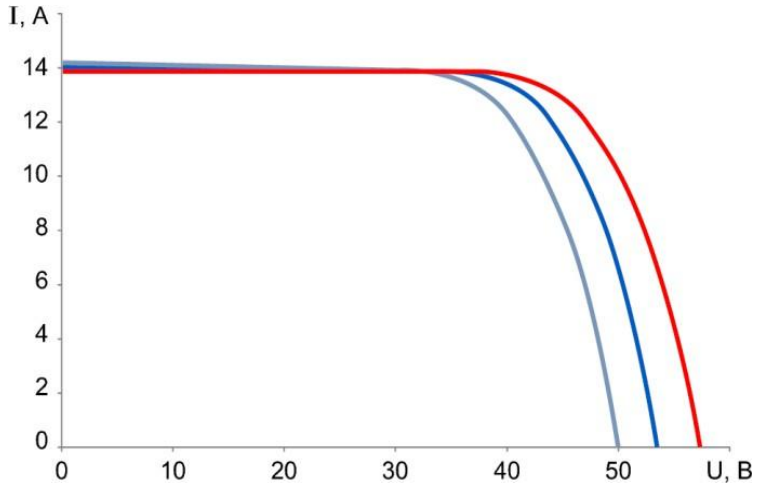
2.9-rasm. Quyosh nurlanishi darajasiga bog‘liq I–V xarakteristikasi (a) va quvvat grafigi (b).

Masalan, quyosh nurlanishi 200 dan 1000 W/m² gacha oshirilganda, tok besh baravargacha oshishi mumkin, kuchlanish esa atigi bir necha foizga ko‘tariladi. Bunga misol sifatida, 2.9-rasmda 640 W nominal quvvatga ega monokristalli fotovoltaik modulning turli darajadagi quyosh nurlanishi ostidagi tok-kuchlanish xarakteristikasi (A) va quvvat grafigi (B) ko‘rsatilgan.

Volt-amper xarakteristikasi quyosh batareyasi haroratining o‘zgarishiga ham sezgir. Harorat oshishi bilan modul kuchlanishi kamayadi; aksincha, harorat pasayganda kuchlanish ortadi. Bu hodisa p–n o‘tishidagi rekombinatsiyaning kuchayishi va ichki potensialning pasayishi bilan izohlanadi, natijada kuchlanish kamayadi.

Bilan birga, qisqa tutashuv toki harorat ko‘tarilganda biroz oshadi, harorat pasayganda esa kamayadi; biroq ushbu tokdagi o‘zgarish kuchlanishdagi o‘zgarishga nisbatan ancha kichikdir.

2.10-rasmda 640 W nominal quvvatga ega monokristalli fotovoltaik modulning 25°C, 50°C va 75°C haroratlarda o‘lchangan I–V xarakteristikalari keltirilgan.



2.10-rasm. I–V xarakteristikasining haroratga bog‘liqligi.

Kuchlanish, tok va natijada quvvatning haroratga bog‘liqligini tavsiflash uchun fotoelektr (PV) modulining texnik pasportida maxsus harorat koeffitsiyentlari ko‘rsatiladi:

- ochiq zanjir kuchlanishi uchun (zamonaviy PV modullarida taxminan –0,25%/°C);
- qisqa tutashuv toki uchun (zamonaviy PV modullarida taxminan +0,045%/°C);
- maksimal quvvat uchun (zamonaviy PV modullarida taxminan –0,3%/°C).

Har qanday element haroratida V_{OC} (ochiq zanjir kuchlanishi)ning taxminiy qiymatini quyidagi formula yordamida aniqlash mumkin:

$$V_{oc}(t) = V_{OC\ STC} \cdot (1 + K_V \cdot \frac{(T - 25)}{100})$$

bu yerda: $V_{oc}(t)$ – elementning t haroratidagi ochiq zanjir kuchlanishi (V); $V_{OC\ STC}$ – standart sinov sharoitida (25°C) ochiq zanjir kuchlanishi (V); K_V–kuchlanishning harorat koeffitsiyenti; t – element harorati (°C).

Misol: JKM-640-78HL4 fotoelektr modulini olaylik. STC sharoitida uning ochiq zanjir kuchlanishi 57,34 V, kuchlanishning harorat koeffitsiyenti esa –0,25%/°C. Endi element harorati 65°C va –15°C bo‘lganda kuchlanish qiymatini aniqlaymiz.

$$\boldsymbol{V_{oc}(t = 65C) = 57,34 \cdot \left(1 - 0,25 \cdot \frac{(65 - 25)}{100}\right) = 51,26V}$$

$$\boldsymbol{V_{oc}(t = -15C) = 56,95 \cdot \left(1 - 0,25 \cdot \frac{(-15 - 25)}{100}\right) = 62,65V}$$

Oddiy qilib aytganda: element harorati har 10°C ga o‘zgarganda, ochiq zanjir kuchlanishi (Voc) taxminan 2,5% ga o‘zgaradi.Ya’ni:

- harorat 10°C ga oshsa, Voc taxminan 2,5% ga kamayadi,
- harorat 10°C ga pasaysa, Voc shuncha miqdorda ortadi.

Harorat o‘zgarishi bilan nafaqat ochiq zanjir kuchlanishi (Voc), balki butun kuchlanish, jumladan maksimal quvvat nuqtasidagi kuchlanish (Vmp) ham o‘zgaradi.

Biroq xalqaro standartlarga ko‘ra, majburiy e’lon qilinadigan parametr aynan V_{oc} ning haroratga bog‘lanishi, chunki bu ko‘rsatkich tizim xavfsizligini ta’minlashda juda muhimdir. Quyosh elektr stansiyasini loyihalashda minimal

hisobiy haroratda ochiq zanjir kuchlanishini aniqlash shart, chunki u kabellar, invertorlar, Saqlagichlar va boshqa uskunalarning ruxsat etilgan maksimal kuchlanishidan oshmasligi kerak.

Maksimal quvvat nuqtasidagi kuchlanishning (V_{mp}) harorat koeffitsiyenti odatda ma’lumotnomada keltirilmaydi. Ammo turli haroratlarda V_{mp} ni taxminan baholash uchun V_{oc} ning harorat koeffitsiyentidan foydalanish mumkin. Garchi bu koeffitsiyentlar biroz farq qilsa-da, ushbu usul invertorning DC tomonidagi ish kuchlanishini taxminan hisoblash imkonini beradi, jumladan yozgi davrdagi minimal Vmp qiymatini aniqlash, bu esa invertorning MPPT diapazoniga mosligini tekshirishda muhimdir (batafsil INVERTORLAR bobida bayon etiladi).

Fotoelektr modulining maksimal quvvati (P_{max}) va qisqa tutashuv toki (I_{sc}) ham element harorati 25°C dan chetlaganda shunga o‘xshash formula bo‘yicha aniqlanadi.

Ammo kuchlanish va quvvatdan farqli ravishda, qisqa tutashuv toki harorat oshishi bilan ortadi.

Shu sababli, tizim xavfsizligi nuqtai nazaridan, yuqori hisobiy haroratda hosil bo‘lishi mumkin bo‘lgan maksimal tok qiymatini tekshirish zarur — u kabellar, Saqlagichlar, kommutatsiya va himoya qurilmalarining ruxsat etilgan tok chegaralariga mos bo‘lishi shart.

§2.4. Fotoelektrik modulining texnik spetsifikatsiyasining ko‘rib chiqilishi

Fotoelektr stansiyasini aniq loyihalash uchun ma’lum bir modul seriyasining texnik hujjatlarini puxta o‘rganish muhimdir. Ishonchsiz ma’lumotlardan kelib chiqadigan xatoliklarni oldini olish maqsadida, faqat ishlab chiqaruvchining rasmiy veb-saytida nashr qilingan spetsifikatsiyalarga tayanish tavsiya etiladi. Masalan, Jinko Solar kompaniyasining Tiger Neo 78HL4-BDV modulining 625-650 W quvvatga ega modeli bo‘yicha ma’lumotlarni ko‘rib chiqish mumkin [28].

Eslatma: Ishlab chiqarish jarayonida quyosh elementlari har doim bir xil xususiyatlarga ega bo‘lmaydi, texnologik og‘ishlar sababli testdan so‘ng ularning

quvvatiga qarab saralanadi. Shuning uchun, dizayni bir xil va elementlar soni teng bo‘lgan fotoelektr modullarining nominal quvvati turlicha bo‘lishi mumkin, masalan, 625–650 W oralig‘ida.

Spetsifikatsiyaning birinchi sahifasi odatda modul seriyasining texnik va konstruktiv xususiyatlarini qisqacha taqdim etadi. Xususan, quyidagilar ko‘rsatiladi:

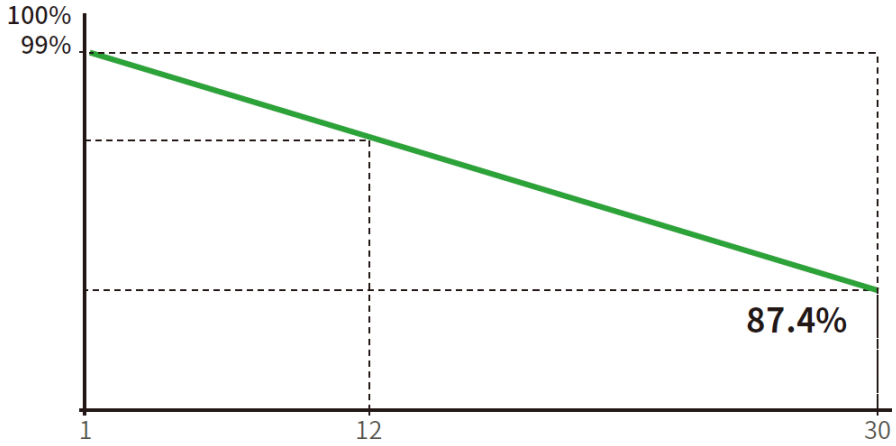
- Mahsulot liniyasining nomi, masalan: Tiger Neo JKM 625-650N-78HL4 – BDV**;**
- Ushbu seriyadagi modullar uchun xos nominal quvvat diapazoni (hozirgi holatda – 625 W dan 650 W gacha);
- Tatbiq etilgan texnologiya va uning xususiyatlari, masalan, N-turi TOPCon;
- Modul turi – bifacial yoki monofacial, yarim kesilgan (half-cut) yoki to‘liq o‘lchamli elementlar;
- Mahsulot amal qiladigan xalqaro standartlar va sertifikatlar (masalan, IEC 61215:2021, IEC 61701 va boshqalar);
- Mahsulot liniyasining qisqacha afzalliklari: yuqori spetsifik quvvat, issiqlik ta’siriga chidamlilikning oshirilishi, past harorat koeffitsiyenti va degradatsiyaga chidamlilik.

Amaliyotda muhandis modul kodini to‘g‘ri talqin qila olishi kerak, chunki bu kod modul dizayni, texnologiyasi va xususiyatlari haqida ma’lumot beradi. Bu imkoniyat spetsifikatsiyalarni tezda tushunish va modullarni dastlabki saralashni osonlashtiradi.

Masalan, JKM 640-78HL4-BDV modulining belgilanishida quyidagi asosiy ma’lumotlar kodlangan:

- nominal quvvat – 640 W;
- elementlar soni – 78;
- yarim kesilgan elementlar ishlatilgan (H – half-cut);
- modul bifacial (ikki taraflama) energiya hosil qiladi (B – bifacial);
- shisha–shisha konstruktsiyada ishlab chiqarilgan (D – double glass).

Spetsifikatsiyaning birinchi sahifasida shuningdek, kafolat majburiyatlari va degradatsiya darajalari haqida ma’lumot ham mavjud. Masalan, ko‘rib chiqilgan modul seriyasida mahsulot kafolati 12 yilni tashkil etadi, birinchi ish yili davomida deklaratsiya qilingan degradatsiya 1% dan oshmaydi, va kutilayotgan xizmat muddati davomida kafolatlangan o‘rtacha yillik degradatsiya 30 yil davomida yilda 0,4% bilan cheklangan (2.11-rasm).



2.11–rasm. Fotoelektrik modulning maksimal degradatsiya chegarasi.

Fotoelektr modulining qoldiq nominal quvvati quyidagi formula orqali hisoblanadi: $$\boldsymbol{P_n = P_0 \cdot (1 - D_1) \cdot (1 - D_{year} \cdot (n - 1))}$$

bu yerda: P_n –n yildan keyingi PV modulining qoldiq quvvati, W; P_0 – PV modulining boshlang‘ich quvvati, W; D_1 – birinchi yildagi degradatsiya; D_{year} – birinchi yildan keyingi yillik degradatsiya; n – yillar soni.

Ko‘rib chiqilgan fotoelektr modul modeli uchun, 30 yildan keyingi kafolatlangan qoldiq nominal quvvat boshlang‘ich qiymatning 87,4% ni tashkil qiladi.

Fotoelektr modullarining degradatsiyasi iqtisodiy hisob-kitoblarni amalga oshirishda, xususan loyiha amortizatsiyasini aniqlashda hisobga olinishi kerak. Modul quvvati vaqt o‘tishi bilan kamaygani sayin, bu keyingi yillarda ishlab chiqariladigan elektr energiya hajmiga va natijada uning sotilishidan keladigan daromad yoki shu bilan bog‘liq xarajatlarni tejashga bevosita ta’sir qiladi. Degradatsiyani inobatga olmaslik, ishlab chiqarish quvvatini ortiqcha baholash va investitsiya daromadlarini noto‘g‘ri prognoz qilishga olib kelishi mumkin.

Izoh: P-turdagi kremniy va PERC texnologiyasiga ega JKM525M-72HL4-TV modulida birinchi yildagi degradatsiya 2% ni, yillik degradatsiya 0,45% ni tashkil qiladi, bu esa 30 yildan keyingi kafolatlangan qoldiq quvvatni 84,95% ga teng qiladi.

Spetsifikatsiyaning ikkinchi sahifasi odatda modulning batafsil texnik ma'lumotlarini beradi, jumladan: umumiy o'lchamlar, o'rnatish nuqtalari, mexanik xususiyatlar (ramka turi, vazn, shisha qalinligi va boshqa parametrlar), qadoqlash tafsilotlari (pallet va konteynerdagi modul soni), shuningdek, Standart Test Sharoitlarida (STC) elektr xususiyatlari.

2.1-jadval misol tariqasida JKM-640-78HL4-BDV modulining STC sharoitida o'lchangan xususiyatlarini ko'rsatadi.

2.1 – jadval. JKM-640-78HL4-BDV fotoelektr modulining elektr xususiyatlari

Parameter	Symbol	STC
Maximum quvvat, W	P_{max}	640
Maksimal quvvatdagi kuchlanish, V	V_{mp}	48,02
Maksimal quvvatdagi tok, A	I_{mp}	13,33
Ochiq zanjir kuchlanish, V	V_{oc}	57,34
Qisqa tutashuv toki, A	I_{sc}	13,98
STC sharoitida modul samaradorligi	η	22,90%
Ruxsat etilgan quvvat og'ish	δ	0~+3%
P_{max} harorat koeffitsienti	K_P	-0,29 %/C
V_{oc} harorat koeffitsienti	K_V	-0,25 %/C
Isc harorat koeffitsienti	K_I	0,045 %/C

Bifacial (ikki taraflama) fotoelektr modullar uchun texnik spetsifikatsiyada qo'shimcha ravishda BNPI parametri ko'rsatiladi (Bifacial Name plate Power Index — ikki taraflama panellar uchun nominal quvvat indeksi). Standart STC sharoitlaridan farqli o'laroq, BNPI nafaqat modulning old tomoniga tushadigan

1000 W/m² nur intensivligini, balki modulning orqa tomoniga tushadigan qo‘shimcha nurni ham hisobga oladi, odatda bu qiymat 135 W/m² deb qabul qilinadi.

2.2-jadvalda JKM-640-78HL4-BDV modulining BNPI sharoitida texnik spetsifikatsiyada ko‘rsatilgan parametrlarini, shuningdek, ularni STC sharoitidagi qiymatlari bilan solishtirish uchun taqdim etadi.

2.2–jadval. Bir tomonlama va ikki tomonlama modullarning xususiyatlarini solishtirish.

Parameter	Symbol	BNPI	STC
Maximum quvvat, W	Pmax	704	640
Maksimal quvvatdagi kuchlanish, V	Vmp	48,06	48,02
Maksimal quvvatdagi tok, A	Imp	14,65	13,33
Ochiq zanjir kuchlanish, V	Voc	57,42	57,34
Qisqa tutashuv tokı, A	Isc	15,43	13,98

Ko‘rsatilganidek, fotoelektr modulining orqa tomoniga tushadigan qo‘shimcha nur qisqa tutashuv tokini (I_{sc}), maksimal quvvat nuqtasidagi tokni (I_{mp}) va natijada quvvatni (P_{max}) oshirdi, holbuki ochiq zanjir kuchlanishi (V_{oc}) va maksimal quvvatdagi kuchlanish (V_{mp}) amalda o‘zgarmadi. Buning sababi shundaki, qo‘shimcha yoritish so‘rilgan fotonlar sonini oshiradi, bu esa ko‘proq elektronlar hosil bo‘lishiga va natijada tokning (I_{sc} va I_{mp}) ortishiga olib keladi. Shu bilan birga, kuchlanish darajasi p-n birikmasining xususiyatlari bilan belgilanadi va fotonlar soniga amalda bog‘liq emas; shuning uchun kuchlanish yorug‘lik o‘zgarishiga qaramay deyarli doimiy qoladi. Shunday qilib, ikki taraflama yoritishda chiqarilgan quvvatning oshishi tokning ortishi orqali amalga oshiriladi.

Bifacial fotoelektr modullar uchun texnik spetsifikatsiyada V_{oc}, I_{sc} va P_{max} parametrlari uchun bifaciallik koeffitsienti (Bifaciality Coefficient) ham ko‘rsatiladi. Bu xususiyat modulning orqa tomonining old tomoniga nisbatan teng yoritish sharoitida elektr energiya ishlab chiqarish qobiliyatini bildiradi.

Boshqacha aytganda, bu koeffitsient orqa tomon old tomon bilan teng yoritilganda ishlab chiqarishi mumkin bo‘lgan kuchlanish, tok yoki quvvat ulushini ifodalaydi.

Bifaciallik koeffitsienti quyidagi formula orqali hisoblanadi:

$$\boldsymbol{\beta = \frac{X_{rear}}{X_{front}}}$$

bu yerda β – bifaciallik koeffitsienti, %; X_rear – faqat modulning orqa tomoniga tushadigan yoritish sharoitida (1000 W/m²) qisqa tutashuv toki (Isc), ochiq zanjir kuchlanishi (Voc) yoki maksimal quvvat (Pmax) qiymati; X_front – faqat modulning old tomoniga tushadigan yoritish sharoitida (1000 W/m²) tok (Isc), kuchlanish (Voc) yoki quvvat (Pmax) qiymati.

Kuchlanish uchun bifaciallik koeffitsienti old va orqa tomon bir vaqtning o‘zida yoritilganda amalda deyarli bir xil bo‘ladi. Orqa tomon yoritilganda tok kamroq hajmda hosil bo‘ladi, natijada quvvat chiqishi kamayadi. Buni tasdiqlash uchun, 2.3- jadval JKM-625-78HL4-BDV modulining bifaciallik koeffitsientlarini (Bifaciality Coefficient) ko‘rsatadi.

2.3 – jadval. JKM-625N-78HL4-BDV modulining bifaciallik koeffitsienti.

Modul	βVoc, %	βIsc, %	Pmax, %
JKM-625-78HL4-BDV	98±5%	80±5	80±5

Shunday qilib, agar JKM-625-78HL4-BDV fotoelektr moduli faqat old tomoniga yoritilgan holda (orqa tomonga nur tushmayotganda) ma’lum bir paytda 500 W quvvat ishlab chiqarsa va keyin modulni orqa tomoni quyoshga qarab aylantirsak (burchak va azimut o‘zgarmasdan) va old tomon nurdan himoyalansa, chiqariladigan quvvat taxminan 375–425 W bo‘ladi, bu esa old tomon yoritishidagi quvvatning 75–85% ini tashkil qiladi.

§2.5. Fotoelektr modullarini o‘rnatish

Modullar va invertorlarning texnik va elektr parametrlarini moslashtirish tizim samaradorligiga ta’sir qilsa-da, fotoelektr modullarni to‘g‘ri o‘rnatish butun

o‘rnatmaning ishonchliligi, xizmat muddati va xavfsizligini ta’minlashda muhim ahamiyatga ega. Noto‘g‘ri o‘rnatish — masalan, elementlarga mexanik shikast etkazish, mahkamlashda haddan tashqari kuch ishlatish, notekis tayanch, noto‘g‘ri yo‘naltirish yoki soyalanish sababli komponentlarning qizib ketishi — nafaqat samaradorlikni pasaytirishi, balki modulning ishdan chiqishiga, ba’zi hollarda esa yong‘in xavfini keltirib chiqarishi mumkin.

Bundan tashqari, noto‘g‘ri o‘rnatish konstruktiv elementlarning deformatsiyasiga sabab bo‘lishi mumkin: panellar egilib qolishi, siljishi yoki shamol va qor yuklamalamalari sababli shikastlanishi, bu degradatsiyani tezlashtiradi va fotoelektr stantsiyaning umumiy xizmat muddatini qisqartiradi.

Quyidagi bo‘limlarda o‘rnatish jarayonida e’tiborga olish lozim bo‘lgan aniq jihatlar ko‘rib chiqiladi. Biroq, o‘rnatishni boshlashdan oldin fotoelektr modul ishlab chiqaruvchisi tomonidan berilgan o‘rnatish qo‘llanmasini (Installation Manual) batafsil o‘rganish tavsiya etiladi.

1. Fotoelektr modullarini tashish va ishlov berish. Shikastlanishning oldini olish uchun modullarni qurilish maydoniga asl zavod qadoqlanishida etkazish tavsiya etiladi. Saytda modullarga ishlov berish eng katta ehtiyotkorlik bilan amalga oshirilishi lozim: egilish va deformatsiyadan saqlaning; imkon qadar modullarni vertikal holatda (qirralarida) tashish tavsiya etiladi, bu egilish xavfini kamaytiradi.

Muhim! Fotoelektr modullarini xavfsiz ishlov berish uchun kamida ikki kishining ishtiroki talab etiladi. Modullarni bitta ishchi tomonidan ko‘chirish qat’iyan taqiqlanadi.

Amalda bu talab ko‘pincha o‘rnatish xodimlari tomonidan e’tiborsiz qoldiriladi, ayniqsa tajribasiz ishchilar tomonidan, modullar bir kishi tomonidan ko‘chirilgan va hech qanday zarar ko‘rinmagan holatlarda. Biroq, bu amaliyot juda xavfli: beparvo tashish vaqtida kelib chiqqan shikastlar yashirin bo‘lishi mumkin va faqat oylar yoki hatto yillar o‘tib lokal qizib ketish, mikrochirishlar, element degradatsiyasi, samaradorlikning pasayishi yoki modulning to‘liq ishdan chiqishi shaklida namoyon bo‘lishi mumkin. Modullarga ishlov berishda xavfsizlik

talablariga rioya qilinishini qat’iy nazorat qilish va qoidabuzarliklar aniqlansa, tezkor intizomiy choralar qo‘llash zarur.

2. Modullar orasida texnologik yo‘lakni ta’minlash. O‘rnatish yoki texnik xizmat ko‘rsatish vaqtida fotoelektr modullarining sirtiga bosib yurmaslik uchun modullar orasida texnologik yo‘lak ta’minlanishi zarur. Fotoelektr modullar ustiga turganingiz yoki qadam bosganingiz yaxshi emas. Bu shishaga, elementlarga yoki ramkaga zarar etkazishi mumkin, shuningdek, sirpanish yoki modul yuzasining yuklamalama ostida buzilishi xavfini tug‘diradi.

2.12–rasm. Fotoelektr modullar ustiga turmang yoki qadam bosmang.

1. Fotoelektr modullarini o‘rnatish joylari bo‘yicha talablar. Yong‘in xavfsizligi nuqtai nazaridan, fotoelektr modullar yonmaydigan sirtlarga o‘rnatilishi lozim. Ishlash jarayonida, ayniqsa, kontakt ulanishi buzilganda yoki kabel tarmog‘i shikastlanganda, elektr ark chiqarilishi yuz berishi mumkin, bu lokal qizib ketish yoki ba’zi hollarda yonishga olib kelishi mumkin.

Bundan tashqari, fotoelektr stantsiyalarni juda yonuvchan materiallar yaqinida, masalan, saman, o‘t, neft mahsulotlari, benzol va boshqa yonuvchan moddalar bilan joylashtirish qat’iyan taqiqlanadi. Yong‘in xavfsizligi masofalariga rioya qilish va asos hamda atrof-muhit talablariga amal qilish fotoelektr stantsiyalarni xavfsiz ishlashining muhim komponentidir.

2. Quruqlik asosidagi konstruksiyalarga o‘rnatish. Fotoelektr modullarni tuproq asoslariga o‘rnatishda potentsial tuproq cho‘kishlari yoki eroziya hisobga

olinishi kerak, chunki bu jarayonlar vaqt o‘tishi bilan tayanch strukturalar va modullarni deformatsiyalashiga olib kelishi, tizim ishonchliligi va xizmat muddatini qisqartirishi mumkin.

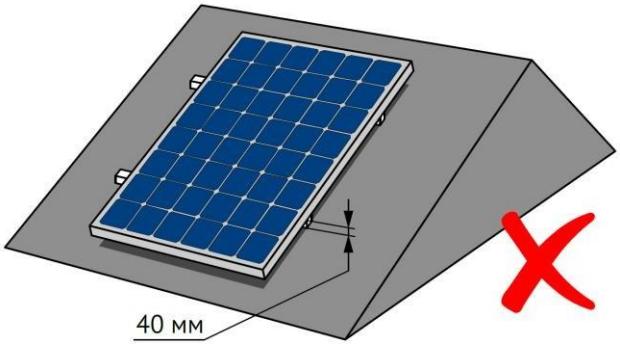
Bu ayniqsa bo‘sh yoki qiyalik tuproqqa o‘rnatish, mavsumiy siljish, eroziya yoki yuvilish ehtimoli mavjud bo‘lgan holatlarda muhimdir. Asosning notekis cho‘kishlari tayanchlarning qiyalashiga, modul geometriyasining buzilishiga, mahkamlamalarning bo‘shashishiga, ramka va shisha yuklamaining oshishiga hamda burchaklarning o‘zgarishiga olib keladi, bu esa energiya ishlab chiqarish samaradorligini pasaytiradi.

Bundan tashqari, struktura deformatsiyasi elektr ulanishlarining buzilishiga, komponentlarda yoriqlar paydo bo‘lishiga yoki muhrlashning buzilishiga sabab bo‘lishi mumkin. Uzun chiziqli modul qatorlarida, uzunlamasına egilish va tayanchlarning bukilishiga nazorat qilish ayniqsa muhimdir.

Ushbu xavflarni kamaytirish uchun o‘rnatishdan oldin saytning muhandislik va geodezik baholanishi, drenaj, mustahkamlash va/yoki poydevor qurilishi (burama yoki beton tayanchlar) nazarda tutilishi kerak, ayniqsa, noaniq yoki zaif tuproqqa ega hududlarda.

3. Modulning orqa tomoni bilan tom o‘rtasidagi minimal masofa. Toshqin tomga fotoelektr modullarini o‘rnatishning keng tarqalgan usullaridan biri — modullarni to‘g‘ridan-to‘g‘ri tom yuzasiga o‘rnatilgan raylarga mahkamlash. Bu usul ayniqsa tomning qiyaligi 15° dan 30° gacha bo‘lgan hollarda keng tarqalgan, chunki modullar bu hollarda sirtga parallel o‘rnatiladi va qo‘shimcha qiyalik konstruktsiyalar talab qilinmaydi.

Amalda, fotoelektr stantsiyalar ba’zan modullarni 40×40 mm kesimga ega ikkita qora metall rayga o‘rnatadi, ular to‘g‘ridan-to‘g‘ri tomga mahkamlanadi (2.13-rasm). Bu konfiguratsiyada modulning orqa yuzasi bilan tom o‘rtasidagi shamollatish bo‘shligi taxminan 40 mm bo‘lib, bu etarli issiqlik tarqalishi uchun qat’iyan etarli emas.

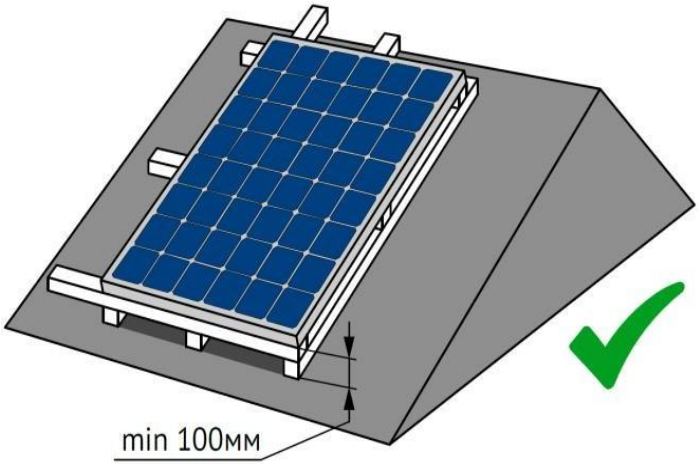


2.13–rasm. Modul va tom orasidagi etarli shamollatish bo‘shlig‘i yo‘qligi misoli.

Cheklangan shamollatish modulning qizib ketishiga olib keladi, bu esa samaradorlikning pasayishi, degradatsiyaning tezlashishi va uzoq muddatda butun tizimning ishonchliligiga salbiy ta’sir ko‘rsatishi mumkin.

To‘g‘ri shamollatish va samarali issiqlik tarqalishini ta’minlash uchun, fotoelektr modul ishlab chiqaruvchilari modulning orqa yuzasi bilan tom yuzasi orasidagi minimal masofa kamida 100 mm bo‘lishi kerakligini belgilaydi, shu jumladan modulning o‘z og‘irligi ostida yuzaga keladigan egilishni ham hisobga oladi.

Talab qilingan shamollatish bo‘shligini ta’minlash uchun uzunlamasına yoki kesim bo‘yicha kengaytirilgan raylar ishlatilishi (4.14-кasm) yoki modullarni tom yuzasidan kerakli balandlikda ko‘taruvchi vertikal tayanchlar o‘rnatish tavsiya etiladi.



2.14–rasm. Minimal shamollatish bo‘shligini (100 mm) ta’minlash misoli.

100 mm bo‘shliq minimal ruxsat etilgan bo‘lsa-da, past qiyalik burchakli tomlarga modullar o‘rnatilganda, bu bo‘shliq etarli bo‘lmasligi mumkin. Qiyalik burchagi qancha kichik bo‘lsa, tabiiy issiqlik tarqalishi shuncha sekinlashadi, chunki konveksiya yomonlashadi va shamollatish samaradorligi pasayadi.

Shuning uchun, modullarni samarali sovutish va ortiqcha qizib ketish xavfini kamaytirish maqsadida 200–300 mm bo‘shliq yaratish tavsiya etiladi. Bu, ayniqsa, yoz oylarida yuqori atrof-muhit harorati bilan xarakterlangan O‘zbekiston sharoitida muhimdir, chunki bu harorat uskunaga tushadigan issiqlik yuklamaini oshiradi.

Eslatma: Tomga gorizontal holatda (tekis yotqizilgan) o‘rnatilgan fotoelektr modullar uchun monofacial panellarni ishlatish ma’qul. Bifacial modullarni shu konfiguratsiyada ishlatish ikki sababga ko‘ra nojo‘ya: birinchidan, orqa tomonda aks etuvchi nur yo‘q; ikkinchidan, bifacial panellarning shisha-shisha konstruktsiyasi modul va tom orasidagi bo‘shliqda issiqlik yig‘ilishiga olib keladi.

Shu bilan birga, hozirgi vaqtda O‘zbekiston bozorida asosan bifacial modullar mavjud va ba’zi hollarda monofacial panellarni sotib olish imkonsiz bo‘ladi. Bunday vaziyatlarda, bifacial modullardan foydalanish zarur bo‘lsa, modulning orqa yuzasi bilan tom orasida kamida 300 mm shamollatish bo‘shligini saqlash tavsiya etiladi. Bu choralar issiqlik tarqalishini sezilarli darajada yaxshilaydi, modullar ish haroratini pasaytiradi va shu bilan ularning samaradorligi hamda ishonchliligini uzoq muddat saqlashga yordam beradi.

1. Modulning gorizontal sirtga nisbatan qiyalik burchagi bo‘yicha talablar:

Fotoelektr modullarining gorizontal sirtga nisbatan qiyalik burchagi tizim turi va uning ustuvorligiga qarab tanlanadi.

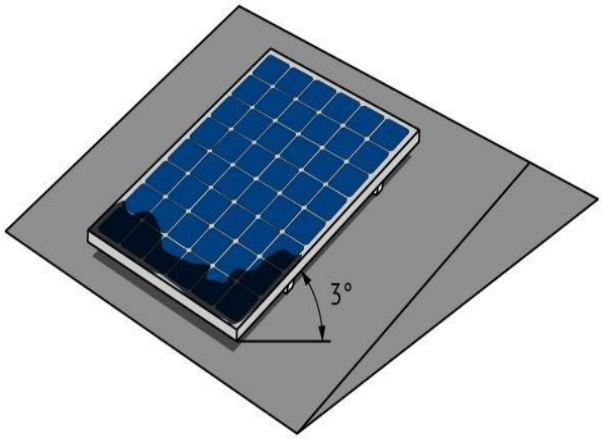
Markazlashtirilmagan quvvat ta’minoti tizimiga ulangan avtonom stantsiyalar uchun, ayniqsa, qish davrida maksimal energiya ishlab chiqarishni ta’minlash muhimdir, chunki ushbu davrda kunduz davomiyligi qisqa va quyosh nurlanish burchaklari past bo‘ladi. Yoz oylarida esa, bunday stantsiyalar odatda ortiqcha energiya ishlab chiqaradi (faqat energiya talab qiluvchi qurilmalar, masalan, sug‘orish nasoslari tizimga ulangan hollarda bundan mustasno).

Avtonom fotoelektr stantsiya tayanch strukturasida modulning qiyalik burchagini mavsumga qarab o‘zgartirish imkoniyati bo‘lishi ma’qul — qishda burchakni oshirish, yozda kamaytirish. Agar konstruktsiya statik bo‘lsa, qiyalik burchagi avtonom iste’molchilarning mavsumiy energiya talabiga qarab tanlanadi. Agar qishda ham sezilarli energiya iste’moli bo‘lsa, qiyalik burchagini 40°–50° oralig‘ida belgilash tavsiya etiladi, bu past quyosh balandligini kompensatsiya qiladi va ushbu mavsumda ishlab chiqarish samaradorligini oshiradi.

Tarmoqqa ulangan fotoelektr stantsiyalar uchun asosiy maqsad yillik energiya ishlab chiqarishni maksimal qilishdir. O‘zbekiston sharoitida modulning optimal qiyalik burchagi 30°–35° oralig‘ida bo‘lib, hududning geografik kengligi bilan mos keladi va yil davomida barqaror energiya ishlab chiqarishni ta’minlaydi.

Tomga modullar o‘rnatilganda, qiyalik burchagi ko‘pincha tomning egilish burchagiga qarab belgilanadi — bu o‘rnatishni osonlashtiradi va shamol yuklamaini kamaytiradi. Shu bilan birga, bu usulda ba’zi cheklovlar mavjud:

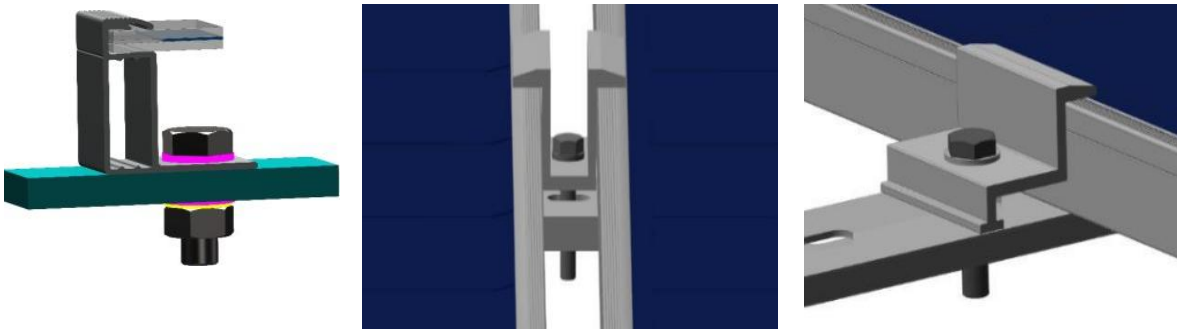
- Quyosh nurlanishining samarali burchagi past bo‘lgani sababli, ayniqsa kuz va qish mavsumlarida energiya ishlab chiqarish kamayadi.
- Modul yuzasida chang va kirlar to‘planadi, ayniqsa pastki joylarda, chunki kichik yoki yo‘q burchak bilan yomg‘ir va erigan suv changni samarali yuvib bera olmaydi. Bu esa lokal soyalanish, ishlab chiqarish kamayishi va element ortiqcha qizib ketishi xavfini oshiradi.



2.15–rasm. Past qiyalik burchakda modulning pastki qirrasida chang va kir to‘planishi,

Shunga ko‘ra, fotoelektr modullar ishlab chiqaruvchilari minimal qiyalik burchagini kamida 10° qilib belgilashni tavsiya qiladilar, hatto tekis tomlarga o‘rnatishda ham — bu modullarni tabiiy tarzda o‘z-o‘zini tozalashiga yordam beradi va ifloslanish sababli degradatsiya xavfini kamaytiradi.

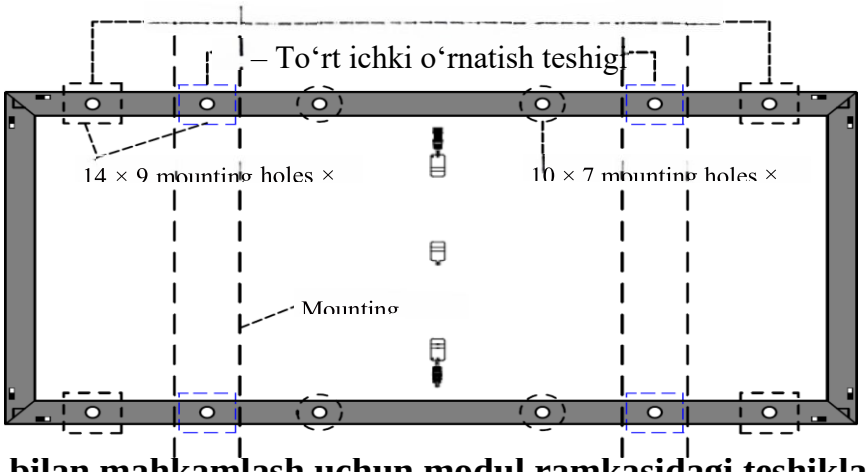
1. Fotoelektr modullarni tayanch konstruksiyasiga o‘rnatish. Fotoelektr modullar tayanch konstruksiyasiga anti-korrosiya qoplamali boltlar (4.16-rasm A), yoki maxsus o‘rta (4.16-rasm B) va chekka qisqichlar (4.16-rasm C) yordamida o‘rnatilishi mumkin.



A B C

2.16–rasm. Fotoelektr modulini tayanch konstruksiyasiga mahkamlash usullari.

Bolt yordamida o‘rnatishda modul ramkasi maxsus o‘rnatish teshiklari bilan ta’minlangan bo‘ladi (2.17-rasm). Biroq amaliyotda, ayniqsa kichik va o‘rta quvvatli fotoelektr stantsiyalar qurilishi paytida, bu usul kam qo‘llaniladi, chunki u ko‘proq mehnat talab qiladi, aniq belgilash kerak bo‘ladi va standart qisqichlardan foydalanishga nisbatan moslashuvchanlik past.

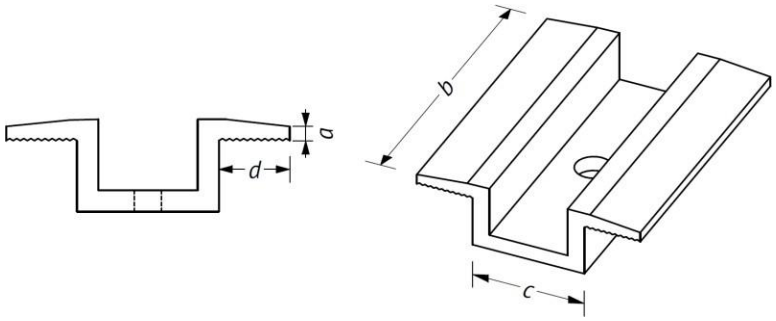


2.17–rasm. Bolt bilan mahkamlash uchun modul ramkasidagi teshiklar.

Bolt bilan mahkamlash ko‘proq o‘rnatish vaqtini talab qiladi, noto‘g‘ri siqish sabab ramka shikastlanish xavfi oshadi va ommaviy o‘rnatish uchun qulay emas. Shuning uchun ko‘pincha chekka va o‘rta qisqichlar afzal ko‘riladi, ular ishonchli mahkamlashni ta’minlaydi va o‘rnatish ishini sezilarli tezlashtiradi.

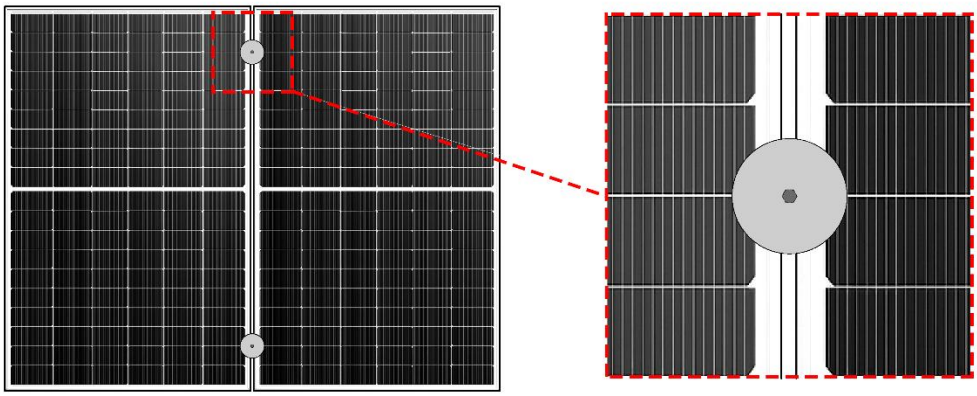
Jinco Solar fotoelektr modullarini o‘rnatish qo‘llanmasida o‘rta va chekka qisqichlar uchun quyidagi talablar ko‘rsatilgan (2.18-rasm):

- qalinligi (a) – kamida 3 mm;
- qisqich uzunligi (b) – kamida 50 mm;
- o‘rta qisqich kengligi (c) – 20 mm;
- qisqichning modul ramkasini qamrab olgan qismi (d) – 10–11 mm.



2.18 – rasm. Fotoelektr modulini mahkamlash qisqichi.

Ba’zi o‘rnatuvchilar modulni ramkaga joylashtirish uchun 100 mm gacha diametrdagi katta yuvishli vintlardan foydalanadilar. Bu usul qabul qilinmaydi, chunki yuvishning bir qismi ramkadan chiqib, quyosh elementlarini soyalaydi (2.19-rasm). Bu lokal quvvat yo‘qotilishiga, elementlarning ortiqcha qizishiga (hot-spot) olib kelishi va oxir-oqibat modul shikastlanishiga sabab bo‘ladi.



2.19 –rasm. Shayba yordamida FEMni mahkamlash.

Aylana shaklidagi qisqich fotoelektr modullarini mahkamlash uchun mos emas, chunki u ishonchlilik va soyalanmaslikni bir vaqtning o‘zida ta’minlamaydi.

Agar yuvish kichik diametrli bo‘lsa, modulning faol yuzasiga chiqmasligi uchun kontakt maydoni etarli bo‘lmaydi, ayniqsa kuchli shamol yuklamaida. Agar yuvish etarli diametrda bo‘lsa, u ramkaning chetlaridan chiqib, elementlarni soyalaydi, bu esa ishlab chiqarishni kamaytiradi va hot-spot xavfini oshiradi.

Shuning uchun, modullarni o‘rnatishda maxsus ishlab chiqilgan qisqichlardan foydalanish lozim, ularning shakli va o‘lchamlari ishlab chiqaruvchi spetsifikatsiyasiga mos kelishi va soyalanishni oldini olishi kerak.

Qisqich boltini haddan tashqari siqish modulning alyuminiy ramkasini shikastlashi mumkin, shu jumladan profilning deformatsiyasi yoki mikrochanoq paydo bo‘lishi. Buning oldini olish uchun, oxirgi siqishda moment kalitidan foydalanish tavsiya etiladi, bu tavsiya qilingan moment qiymatiga qat’iy rioya qilishni ta’minlaydi.

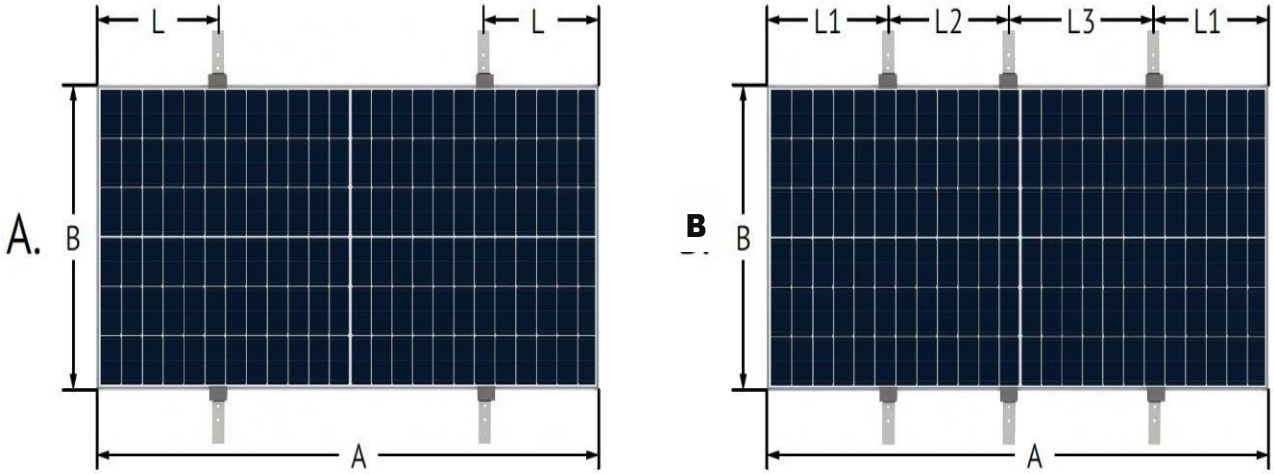
Amaliyotda M8 boltlar (yuqori mustahkamligi sababli afzal) va M6 boltlar modulni mahkamlashda eng ko‘p ishlatiladi. Tavsiya etilgan siqish momentlari:

- M8 boltlar uchun – 16–20 N·m;
- M6 boltlar uchun – 9–12 N·m.

Fotoelektr modulini o‘rnatish qo‘llanmasida o‘rnatish uchun 9 dan ortiq turli usullar ko‘rsatilgan, ular o‘rnatish relslari soni va yo‘nalishida farq qiladi. Zarurat bo‘lsa, o‘quvchi barcha mavjud usullarni mustaqil ko‘rib chiqishi mumkin. Shu bo‘limda O‘zbekistonda eng ko‘p ishlatiladigan ikki usul tahlil qilinadi:

- To‘rtta nuqtada mahkamlash bilan ikki relsli tizim (2.20- A rasm): L = A/4 ± 50;
- Oltita nuqtada mahkamlash bilan uch relsli tizim (2.20- B rasm).

L_1=400, L_2=(A/2-L_1+50), L_3=(A/2-L_1-50).



2.20–rasm. PV modulining to‘rtta (A) va oltita (B) nuqtada mahkamlashi.

Qo‘shimcha o‘rnatish relsi narxi butun fotoelektr stantsiya xarajatiga nisbatan unchalik katta bo‘lmagani sababli, oltita nuqtada mahkamlash tavsiya etiladi (Usul B). Bu usul quyidagilarni yaxshilaydi:

- qor yuklamaida modulning egilishi xavfini sezilarli kamaytiradi;
- shamol yuklamalamalariga qarshilikni oshiradi;
- bir nuqtada etarlicha mahkamlash bo‘lmasa ham, tizim beshta qo‘shimcha tayanch nuqtasi tufayli ishlashda davom etadi, bu umumiy mexanik ishonchlilikni oshiradi.

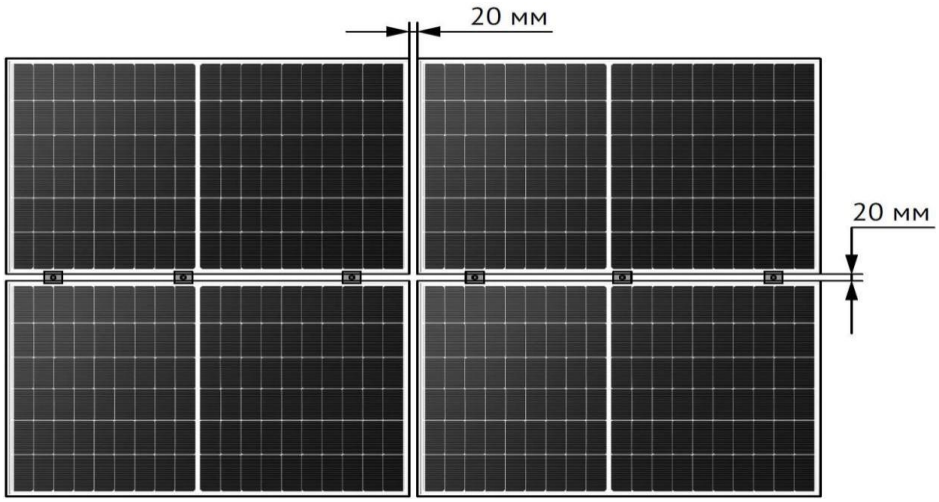
Usul A, ya’ni modulni to‘rtta nuqtada mahkamlash ishlatilganda, ishlab chiqaruvchi tavsiyalariga muvofiq nuqtalar orasidagi ruxsat etilgan masofa saqlanishi kerak. Amaliyotda esa ko‘pincha bu talablar e’tiborga olinmaydi va relslar orasidagi masofa ikki metrgacha etadi, bu ruxsat etilgan chegaradan ancha yuqori. Bu qoidabuzarlik modulning qor yuklamaida egilishiga, uzoq muddatda esa shisha, ramka shikastlanishiga yoki strukturaning ishonchliligini pasayishiga olib kelishi mumkin.

2. Fotoelektr modullar orasidagi bo‘shliq. Fotoelektr modul ramkasi issiqlik kengayishiga duch keladi, shuning uchun o‘rnatishda modullar orasida kompensatsion bo‘shliqlar qoldirilishi tavsiya etiladi.

Modullarning qisqa tomonida taxminan 10–20 mm bo‘shliq qoldiriladi, bu odatda standart kenglikdagi o‘rta qisqichlar yordamida avtomatik ta’minlanadi. Uzoq tomonida esa 20–30 mm bo‘shliq saqlash tavsiya etiladi (2.21-rasm).

Bunday bo‘shliqlar quyidagilar uchun zarur:

- ramkaning issiqlik deformatsiyasini kompensatsiya qilish;
- modul yuzasidan suvning tabiiy drenajini ta’minlash;
- shamollatish sharoitlarini yaratish, ortiqcha qizish va ifloslanish xavfini kamaytirish.



2.21– rasm. Fotovoltaik modullar orasidagi kompensatsiya bo‘shliqlari.

1. MC4 ulovchi. Fotovoltaik modullarni ulashda imkon qadar modul ishlab chiqaruvchilarining asl MC4 ulovchilarini xarid qilish tavsiya etiladi. Bu to‘liq moslik va zarur elektr hamda mexanik xususiyatlarga muvofiqlikni kafolatlaydi. Agar uchinchi tomon MC4 ulovchilari ishlatilsa, ularning texnik xususiyatlari diqqat bilan tekshirilishi lozim. Har bir ishonchli ishlab chiqaruvchi rasmiy saytida mahsulot ma’lumotnomasini taqdim etadi, unda nominal toklar va kuchlanishlar, shuningdek IEC 62852 va UL 6703 standartlariga muvofiqlik ko‘rsatiladi.

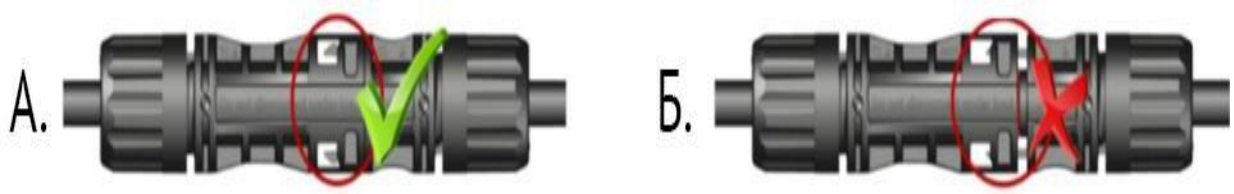
Zamonaviy yuqori quvvatli fotovoltaik modullar uchun quyidagi xususiyatlarga ega MC4 ulovchilar ishlatilishi tavsiya etiladi:

• Nominal tok: 35–40 A (kabel kesimi – 4 yoki 6 mm² ga qarab);

• Nominal kuchlanish: 1500 V gacha.

Tok va kuchlanish talablarga mos kelmaydigan ulovchilar ishlatilsa, bu ortiqcha qizish, aloqaning yomonlashishi va nosozlik yoki olov xavfini oshirishi mumkin.

Muhim! MC4 ulovchilarni ulashda ularni xos qulflash ovozi eshitilguncha mahkam va ishonchli tarzda ulash zarur (2.22 A-rasm). To‘liq ulanmgan ulanish aloqaning zaiflashishiga olib keladi (2.22 B-rasm), bu esa jiddiy oqibatlarga sabab bo‘lishi mumkin. Eng yaxshi holatda, bu invertorda DC arc nosozlik himoyasini ishga tushiradi. Eng yomon holatda esa ortiqcha qizish, ulovchi erishi yoki hatto olov sodir bo‘lishi mumkin, ayniqsa yuqori tok va yuqori atrof-muhit haroratida.



2.22–rasm. Ishonchli (A) va zaiflashgan (B) MC4 ulanishi.

2. MC4 ulovchilarini chang, namlik va korroziyadan himoya qilish Garchi MC4 ulovchilari o‘z dizaynida IP67 darajasida himoya bilan ta’minlangan bo‘lsa-da, ular o‘rnatish jarayonida himoyasiz bo‘lishi mumkin. Yakuniy ulanish amalga oshirilmaguncha, ulovchilar chang va namlikdan himoyasiz bo‘lishi mumkin, bu esa ularning funksionalligini xavf ostiga qo‘yadi.

Changi elektr aloqasini qisqartirishi mumkin, namlik esa kontakt yuzasida oksidlanishga, kontakt qarshiligining oshishiga, mahalliy qizishga, kontaktning kuymasiga va hatto olov xavfiga olib kelishi mumkin.

Shuning uchun o‘rnatish paytida MC4 ulovchilarini himoya qilishga alohida e’tibor qaratish lozim. Tavsiya etiladi:

• Modullarni qo‘llab-quvvatlash strukturasi ustiga o‘rnatishdan oldin, ularni zavod qadoqlarida yoki chang va namlikdan himoyalangan quruq xonada saqlash;

• Modul strukturaga o‘rnatilgach, ulovchilarni imkon qadar tez ulash, shuningdek, ulanishlarni muhrlash;

• Agar darhol ulash imkoni bo‘lmasa, ulovchilarni vaqtincha maxsus qopqoqlar bilan himoya qilish (2.23-rasm), ayniqsa chang ko‘p bo‘lgan joylarda, masalan, cho‘l sharoitida.

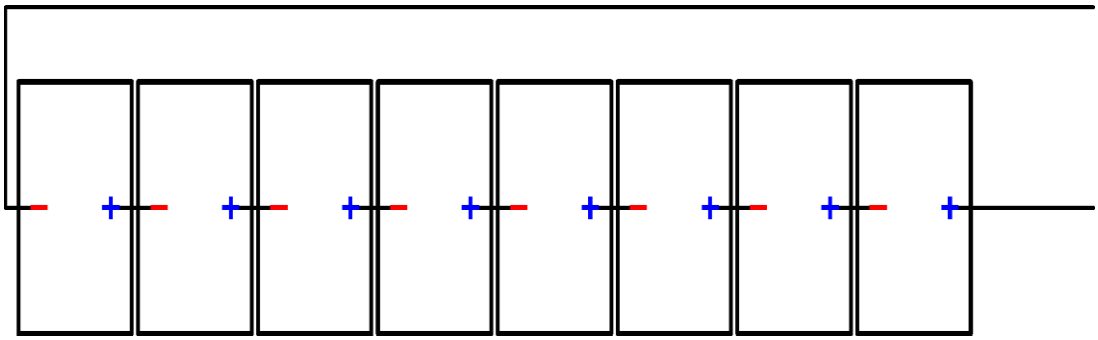
2.23-rasm. MC4 ulovchilarini chang va namlikdan himoya qiluvchi qopqoqlar

Bu tavsiyalarga rioya qilish ulanishlarning ishonchliligini oshiradi, yashirin shikastlanishlarning oldini oladi va butun tizimning xizmat muddatini uzaytiradi.

3. Fotovoltaik modul kabel uzunligi. Ko‘pgina zamonaviy modullarda qo‘shilish qutisi modulning orqa markazida joylashgan. Bu asosan Half-Cut elementlar ishlatilishi bilan bog‘liq; modul ikki simmetrik yarmdan iborat bo‘lib, har biri qo‘shilish qutisidagi tegishli bo‘limga ulanadi.

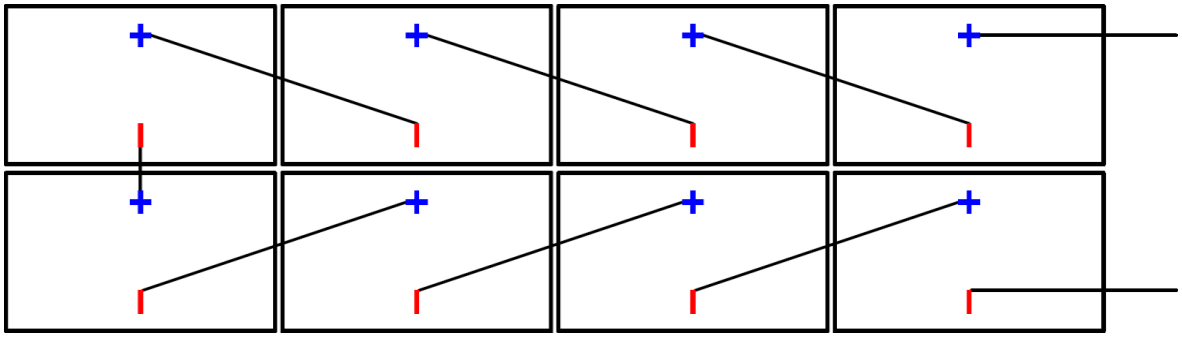
Fotovoltaik modullar turli uzunlikdagi kabellar bilan ishlab chiqariladi-qisqa va uzun. Agar loyiha tanlash imkonini bersa, kabel uzunligi modul ulanish usuliga qarab tanlanishi kerak.

Masalan, modullarni qisqa tomondan ulashda (2.24- rasm), qisqa kabellar ishlatish tavsiya etiladi. Bunday ulanish uchun 15–20 sm etarli, uzoq kabellar (1 m va undan ko‘p) o‘rnatishni qiyinlashtiradi, ortiqcha buklamalar hosil qiladi, estetikani buzadi, issiqlik yo‘qotilishini oshiradi va shikastlanish xavfini oshiradi.



2.24 –rasm Modullarni qisqa tomondan ulash.

Agar ulanish sxemasi modullarni uzun tomondan ulashni talab qilsa (2.25-rasm), uzun kabellar ishlatilishi kerak. Aks holda, qo‘shimcha vositachi uzatma kabellar o‘rnatilishi lozim bo‘ladi, bu esa MC4 ulovchilar orqali ulanishlar sonini ikki barobar oshiradi.

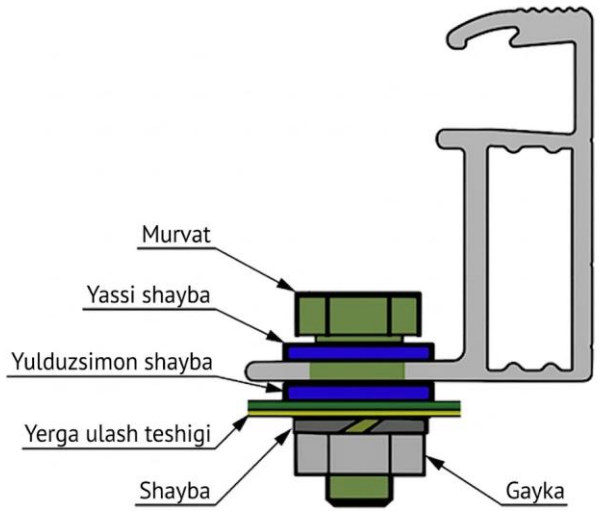


2.25 – rasm. Modullarni uzun tomondan ulash.

Ko‘p kontakt ulanishlar soni tizimning umumiy ishonchliligini kamaytiradi, o‘tkazuvchi qarshilikni oshiradi, mahalliy qizish xavfini oshiradi, natijada samaradorlik pasayadi va ishlash paytida nosozlik xavfini oshiradi.

Shuning uchun modul xarid qilish bosqichida kabel uzunligini to‘g‘ri tanlash ortiqcha ulanishlarning oldini oladi, o‘rnatishni soddalashtiradi va butun fotovoltaik o‘rnatish tizimining ishonchliligini oshiradi.

4. Himoya qiluvchi erga ulash. Fotovoltaik modullar ramkasi alyuminiydan ishlab chiqarilgan va uzoq muddatli korroziyaga qarshi anodlangan qoplama bilan ishlangan. Ammo bunday qoplama dielektrik xususiyatga ega va ishonchli elektr aloqasini ta’minlamaydi; shuning uchun modulni ramka orqali erga ulash mumkin emas.



2.26 –rasm. Fotovoltaik modulni yerga ulash.

Modul ramkasida erga ulash uchun maxsus teshiklar mavjud, bu joylarda anodlangan qatlam olib tashlangan yoki o‘tkazuvchi kontakt padlari mavjud. Bu teshiklar odatda ramkaning to‘rt burchagida joylashgan bo‘lib, modulning struktura bo‘yicha istalgan yo‘nalishida yerga ulashni qulay qiladi.

Yerga ulash faqat ishlab chiqaruvchi belgilagan nuqtalarda amalga oshirilishi kerak, boltlardan, klamplardan yoki sertifikatlangan terminallardan foydalanib, ishonchli aloqa va IEC 61730, UL 1703 va NEC 690.43 kabi standartlarga muvofiqlikni ta’minlash zarur. Ushbu tavsiyalarga rioya qilmaslik himoya samaradorligini kamaytiradi, qarshilikni oshiradi va elektr nosozlik xavfini oshiradi.

§2.6. Fotovoltaik modullarga texnik xizmat ko‘rsatish

Nosozliklarni tez aniqlash va favqulodda holatlarning oldini olish uchun fotovoltaik modullarga muntazam vizual tekshiruv va texnik xizmat ko‘rsatish tavsiya etiladi.

1. Vizual tekshiruv. Vizual tekshiruvda quyidagi jihatlarga e’tibor qaratish lozim:

● Modulning yorug‘lik ostidagi ko‘rinishini baholash: turli burchaklardan qaralganda elementlar rangining biroz farqlanishi antirefleks qoplama texnologiyasiga ega modullarda normal hisoblanadi. Ammo agar bitta element ichida ranglar farq qilsa, bu ichki nuqsonni ko‘rsatishi mumkin. Bunday hollarda ishlab chiqaruvchi bilan bog‘lanish lozim.

● Shishani tirnalish, chip, yoki boshqa mexanik shikastlanishlar uchun tekshirish.

● Elementlarning tok yig‘uvchi shinalarini korroziya belgilariga tekshirish. Korroziya modulning orqa yuzasiga namlik kirishi natijasida yuzaga kelishi mumkin. Agar korroziya aniqlansa, modulning orqa yuzasi tekshirilishi zarur.

● Ta’qsimlash qutilari (junction box) erishi, kuyishi yoki olovdan zarar ko‘rgan belgilarini tekshirish.

● Barcha MC4 ulovchilarni tekshirish: ularning to‘liq ulanganligini va plastik komponentlar erish, kuyish yoki deformatsiyaga uchramaganligini tasdiqlash.

● Barcha boltlash ulanishlarini (yerga ulash ham) tekshirish va mahkamligini tasdiqlash.

Fotovoltaik modullarning vizual tekshiruvi yiliga kamida ikki marta — bahor va kuzda o‘tkazilishi tavsiya etiladi. Bu yozda ortiqcha tok va harorat tizimga qo‘shimcha yuklama tushirishidan oldin va qishda qor yuklamalamalari oshishi va kuchlanish oshishi oldidan nosozliklarni aniqlash imkonini beradi.

2. Fotovoltaik modul yuzasini tozalash. Fotovoltaik modul yuzalarining ifloslanishi quyosh elektr stantsiyalarida samaradorlik pasayishining eng keng tarqalgan sabablaridan biridir.

Hatto kichik ifloslanishlar — chang, qum, barg, qush axlati yoki tutun — modul va butun stringning ishlashiga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi.

Ifloslangan joylar quyosh nurlanishini to‘sib qo‘yadi, natijada ba’zi elementlar quvvat ishlab chiqarishda qatnashmaydi. Bu nafaqat individual modulda, balki butun stringda quvvat pasayishiga olib keladi, ayniqsa modullar ketma-ket ulangan bo‘lsa.

Toshkent shahrida fotovoltaik modullarning yuzasini tozalashning elektr ishlab chiqarishga ta’siri baholandi.

Tashqi omillarning (PV modul yuzasi ifloslanish darajasidan tashqari) ta’sirini yo‘qotish uchun, bir-biriga yaqin joylashgan ikki deyarli bir xil fotovoltaik elektr stansiyasi tanlandi. Ikkala stansiya ham zamonaviy invertor va modullarga ega, ularning hammasi bir xil yo‘nalishga o‘rnatilgan (azimut 185°) va gorizontga nisbatan bir xil qiyalik burchaklariga ega. Invertorlar bir xil transformator shinai orqali ulangan, barcha operatsion va himoya parametrlar bir xil sozlangan.

Fotovoltaik modullar yuzasini tozalashning elektr ishlab chiqarishga ta’sirini baholash uchun birinchi stansiyada barcha modullar yuzasi to‘liq tozalandi, ikkinchi stansiyada modullar yuzasi ifloslangan holda qoldirildi (2.27-rasm).

Tozalashdan so‘ng kunlik elektr ishlab chiqarish 12,8% ga oshdi.

Sinov metodologiyasi, ma’lumotlarni tahlil qilish yondashuvi va natijalar manba [29] da batafsil keltirilgan.

2.27–rasm. Fotovoltaik modullarni tozalashdan oldin va keyin.

Fotovoltaik modullarning yuzasi ifloslanganda faqat quvvat ishlab chiqarish kamayib qolmaydi, balki yana bir jiddiy muammo yuzaga keladi — elementlarning normal ish rejimi buzilishi natijasida mahalliy qizish. Ba’zi elementlar soyaga tushganda yoki ifloslanganida energiya ishlab chiqarmay qoladi, ammo tok zanjir orqali oqishda davom etadi. Bunday holatda element yuklama rejimida ishlaydi va kelayotgan energiyani elektr energiyasiga emas, balki issiqlikka aylantiradi. Natijada quyidagilar yuzaga keladi:

- mahalliy qizish (hot-spot);
- element materiallarining tezroq eskirishi;
- izolyatsiya shikastlanishi va olov xavfi.

Uzoq muddatli oqibatlar:

- doim ifloslangan modullar tezroq qarib, samaradorligini yo‘qotadi;
- issiqlik kengayishi natijasida shisha va laminatsiya shikastlanish xavfi oshadi;
- bir xil string ichidagi modullar orasida energiya ishlab chiqarish nomuvofiqligi ko‘payadi va bu MPPT boshqaruvchisining ishiga salbiy ta’sir qiladi.

Fotovoltaik modullarni tozalash chastotasi o‘rnatish hududi, atrof-muhit ifloslanish darajasi va yog‘in miqdoriga bog‘liq. Chang miqdori yuqori bo‘lgan hududlarda hamda yoz oylarida uzoq muddat yog‘in bo‘lmasa, tozalash odatdagidan tez-tez amalga oshirilishi tavsiya etiladi, chunki chang va ifloslik tabiiy ravishda yo‘qolmaydi.

Fotovoltaik modullarni tozalashdan oldin, uskuna ishlab chiqaruvchisi tomonidan texnik hujjatlar yoki texnik xizmat ko‘rsatish qo‘llanmasida berilgan tavsiyalar bilan tanishish zarur. Ushbu ko‘rsatmalarga rioya qilmaslik modul yuzasining shikastlanishiga, ish samaradorligining kamayishiga va ba’zi hollarda kafolatning bekor bo‘lishiga olib kelishi mumkin.

Quyidagi tavsiyalar ko‘pgina ishlab chiqaruvchilarning qo‘llanmalarida mavjud:

• Shishani tozalashda neytral pH darajasiga ega (6,5–8) suv ishlatish tavsiya etiladi, bu shisha yuzasidagi himoya qoplamasini shikastlanishidan saqlaydi. Mineral moddalar ko‘p bo‘lgan suv shisha yuzasida qoldiq hosil qilishi mumkin, shuning uchun undan foydalanish tavsiya etilmaydi.

• Hech qachon abraziv materiallardan foydalanish mumkin emas.

• Elektr va issiqlik zarbini kamaytirish uchun fotovoltaik modullarni tozalash ertalab erta yoki kechqurun, quyosh nurlanishi minimal bo‘lgan va modullar salqin bo‘lgan paytlarda amalga oshirilishi tavsiya etiladi. Bu ayniqsa yuqori atrof-muhit haroratiga ega hududlarda muhimdir.

• Modulning qizigan yuzasiga sovuq suv sepish issiqlik zarbiga va shishaning shikastlanishiga olib kelishi mumkin, ayniqsa mikroyoriqlar mavjud bo‘lsa. Shuningdek, vaqtincha bug‘lanish va keyin kondensatsiya yuzaga kelishi mumkin: tez sovutish shisha qatlamlari va himoya plyonkasi orasida namlik hosil qiladi, bu esa tok yig‘uvchi shinalarning oksidlanishi va modulning tezroq eskirishiga olib keladi. Shu sababli tozalash uchun mo‘’tadil iliq suv ishlatilishi va keskin harorat o‘zgarishlaridan saqlanishi lozim.

• Shikastlangan shisha yoki ochiq simlar mavjud bo‘lgan fotovoltaik modullarni hech qachon tozalashga urinmang, bu elektr zarbasiga olib keladi.

3. Termografik diagnostika. Termografik diagnostika fotovoltaik modullar texnik holatini baholashda eng samarali va invaziv bo‘lmagan usullardan biridir. Bu usul vizual tekshiruvda ko‘rinmaydigan yashirin nuqsonlarni aniqlash imkonini beradi, ular tizim ishlashiga va xavfsizligiga sezilarli ta’sir qilishi mumkin.

Termografik diagnostika yordamida aniqlanishi mumkin:

• “Hot-spot” (mahalliy qizish) — elementlarda mikrocracklar, nuqta ifloslanishlar, shikastlangan ulanishlar, EVA plyonka eskirishi yoki tok yig‘uvchi shinalar natijasida yuzaga kelgan mahalliy qizish;

• Kontakt ulanishlarida qarshilikning oshishi — MC4 ulovchilar, junction box, terminal va boltli ulanishlarning ortiqcha qizishi;

• Bitta modul ichidagi elementlarning notekis ishlashi (masalan, alohida bo‘limlar eskirganda yoki laminatsiya sifatining pastligi sababli);

• Bypass sxemalarida diod nuqsonlari — modulning bir bo‘limi qizib ketishi, boshqalari esa normal ishlashi.

Normal va ortiqcha qizigan hududlar orasidagi harorat farqi 10–15°C dan oshmasligi lozim. Agar farq 15°C dan oshsa, qo‘shimcha diagnostika tavsiya etiladi. Agar alohida elementlar qo‘shni elementlardan 20°C yoki undan ortiq qizsa, bu aniq hot-spot yoki ichki nuqsonni ko‘rsatadi.

Termografik diagnostika quyoshli kunda, minimal 600 W/m² quyosh nurlanishi bilan o‘tkazilishi kerak, bu zanjirda etarli tok hosil bo‘lishini ta’minlaydi. Modul yuzasi quruq va toza bo‘lishi kerak, shunda natijalar aniq bo‘ladi.

Tekshiruv modulning old tomonidan va zarurat bo‘lsa, taqsimlash qutisi (junction box) tomonidan ham amalga oshiriladi.

3-BOB. INVERTORLAR

Invertor — bu fotoelektr modullar tomonidan ishlab chiqariladigan o‘zgarmas tokni (DC) berilgan kuchlanish va chastota parametrlariga ega o‘zgaruvchan tokka (AC) aylantirish uchun mo‘ljallangan elektr qurilmadir. U haqli ravishda fotoelektr stansiyaning “yuragi” hisoblanadi, chunki u stansiyaning yuklamalama yoki elektr tarmog‘i bilan bog‘lanishini ta’minlaydi.

Ushbu bobda invertorlarning ishlashining asosiy tamoyillari, ularning tipik sxematik yechimlari hamda konstruktiv xususiyatlari ko‘rib chiqiladi. Energiya aylantirish samaradorligiga ta’sir qiluvchi asosiy omillar, jumladan kuch qismi arxitekturasi, MPPT algoritmlari va issiqlik rejimlari tavsiflanadi.

Shuningdek, invertorlarni o‘rnatish, ularni tanlash, tizimning boshqa elementlari bilan o‘zaro ishlashi, hamda o‘rnatilgan himoya va nazorat funksiyalarini amalga oshirish bilan bog‘liq amaliy jihatlar ham yoritiladi.

§3.1. Keng impulsli modulyasi

Invertor — bu doimiy tokni (DC) belgilangan kuchlanish va chastotali o‘zgaruvchan tokka (AC) aylantirish uchun mo‘ljallangan elektr qurilmasi.

Invertor doimiy tokdan o‘zgaruvchan sinusoidali kuchlanishni qanday hosil qilishini tushunish uchun avval impuls kengligi modulyatsiyasi (PWM — Pulse Width Modulation) tushunchasini ko‘rib chiqish zarur. Ushbu usul zamonaviy invertorlarning ishlash asosini tashkil etadi va chiqish signalining amplitudasi, to‘lqin shakli va chastotasini aniq boshqarish imkonini beradi.Ushbu bo‘limda faqat fotovoltaik elektr stansiyalari loyihalashiga bevosita aloqador PWM jihatlari yoritilgan. Komponent bazasi, diodli ko‘prik qurilishi, filtr topologiyalari va sxemalar konstruksiyasiga oid mavzular ushbu material doirasidan tashqarida qoladi va o‘quvchi tomonidan mustaqil ravishda o‘rganilishi mumkin [30], [31].

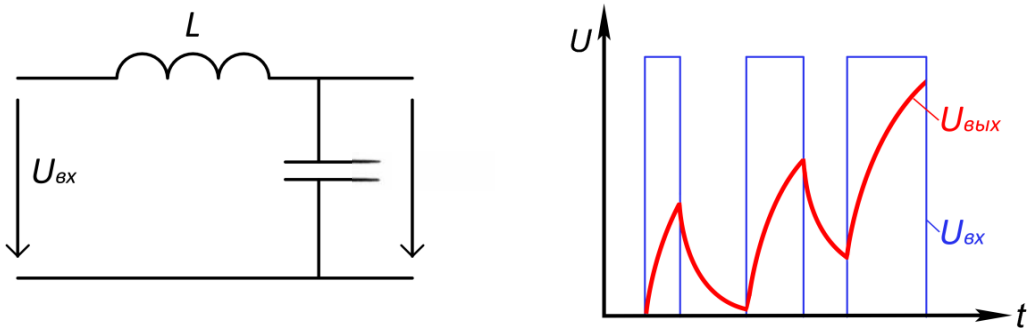
Impuls kengligi modulyatsiyasi (PWM) — bu invertorlarda doimiy tok manbaidan o‘zgaruvchan sinusoidali kuchlanish hosil qilish uchun ishlatiladigan quvvat elektron kalitlarini (masalan, MOSFET yoki IGBT) boshqarish usuli.

Usulning mohiyati shundaki, sinus to‘lqinning lahzaviy qiymatlariga mos keladigan kengligi o‘zgaruvchan to‘rtburchak impulslar ketma-ketligi hosil qilinadi. LC filtrdan o‘tgandan so‘ng bunday pulsatsiyali signal yuklamani quvvatlantirish yoki tarmoqqa uzatish uchun mos keladigan silliq sinusoidali kuchlanishga aylantiriladi.

Eslatma. Sanoatda qo‘llaniladigan filtrlar ancha murakkab bo‘lib, turli sxema variantlariga ega bo‘lishi va ularda qarshiliklar (rezistorlar) ham ishtirok etishi mumkin.Elektr texnikasining asosiy qonunlariga ko‘ra, induktivlik bobinidagi tok va kondensatordagi kuchlanish birdaniga keskin o‘zgara olmaydi.

O‘tish jarayonlarining xususiyatlari induktivlik va sig‘im qiymatlari, ulanish sxemasi hamda tashqi sharoitlarga bog‘liq. Invertorlarda signalni silliqlash uchun odatda induktivlik bobini ketma-ket, kondensatorni esa yuklama bilan parallel ulaydi — bu L-C past chastotali filtrni hosil qiladi. Natijada pulsatsiyali signal silliqlanadi.

3.1-rasm. LC filtr yordamida to‘rtburchak impulslar ketma-ketligini silliqlash orqali olingan chiqish signaliga misol keltirilgan.



3.1-rasm. L-C filtridagi kirish impulsli va silliqlangan chiqish signallari.

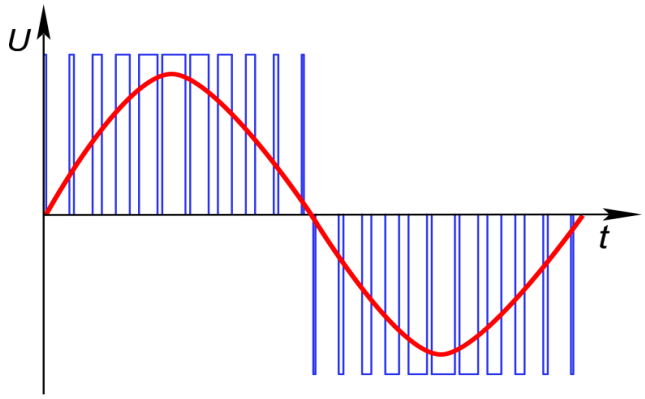
PWM ishlash algoritmini quyidagi tarzda soddalashtirib ifodalash mumkin:

- Invertor boshqaruvchisi (odatda mikrokontroller yoki raqamli signal protsessori — DSP) belgilangan chastotadagi (masalan, 50 Hz) sinusoidali tayanch signal hosil qiladi;

- Yuqori chastotali uchburchak yoki tish-arra shaklidagi **tashuvchi to‘lqin hosil qilinadi (PWM tashuvchi chastotasi odatda 10–20 kHz oralig‘ida bo‘ladi).

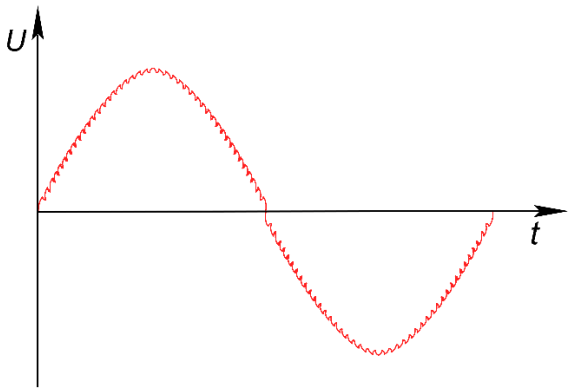
PWM chastotasi chiqish sinusoidali signal chastotasidan odatda 200–400 marta yuqori tanlanadi. Masalan, chiqish chastotasi 50 Hz bo‘lganda PWM chastotasi taxminan 10 kHz atrofida bo‘ladi. Tashuvchi chastota qanchalik yuqori bo‘lsa, signalni filtr yordamida silliqlash shunchalik oson bo‘ladi, biroq bu quvvat kalitlaridagi kommutatsiya yo‘qotishlarining ortishiga olib keladi.

- Har bir davrda boshqaruv sxemasi sinusoidaning amplitudasini uchburchak to‘lqin bilan solishtiradi va sinusoida shakliga mos ravishda kengligi o‘zgaruvchan impulslar ketma-ketligini hosil qiladi — yarim to‘lqin markazida impulslar kengroq, nol o‘tish joylari yaqinida esa torroq bo‘ladi (3.2-rasm).



3.2-rasm. Sinusoidali signalning PWM modulyatsiyasi.

L-C filtr signalni silliqlaydi, asosiy (birinchi) garmonik tarkibiy qismini ajratib oladi va yuqori garmonik tarkibiy qismlarni bostiradi (3.3-rasmga qarang).



3.3-rasm. Silliqlashdan keying chiqish signali.

Sinusoidali chiqish kuchlanishini hosil qilish uchun PWM impulslarining shakllanadigan doimiy tok shinasidagi (DC BUS) kuchlanish qiymati sinusoida amplitudasidan 10–20 % yuqori bo‘lishi kerak. Shunday qilib, bir fazali tizimda

samarali kuchlanishi 230 V bo‘lganda sinusoidaning amplitudasi taxminan 325 V ni tashkil qiladi; shunga mos ravishda doimiy tok shinasidagi kuchlanish kamida 360 V bo‘lishi lozim. Uch fazali invertorlarda hisob-kitoblar odatda chiziqli kuchlanish bo‘yicha olib boriladi va doimiy tok shinasidagi kuchlanish taxminan 600 V atrofida bo‘ladi.Fotovoltaik elektr stansiyalarni loyihalash va qurish jarayonida modullar ketma-ket ulanib, fotovoltaik blok (PVB yoki String) hosil qilinadi, keyin u invertorning doimiy tok kirishiga (DC Input) ulanadi. Agar PVB kuchlanishi to‘liq PWM rejimida ishlash uchun etarli bo‘lmasa, kuchlanishni oshirish uchun DC-DC konverter (doimiy tok konverteri) qo‘llaniladi. Bunda energiyaning bir qismi kuchlanishni ko‘tarish jarayonida sarflanadi, bu umumiy tizim samaradorligini pasaytiradi va, eng muhimi, issiqlik yo‘qotishlarining ortishiga, invertor haroratining ko‘tarilishiga olib keladi — natijada invertorning quvvati termik cheklanishi mumkin.

Shuning uchun loyihalash jarayonida fotovoltaik maydonni shunday tuzish tavsiya etiladiki, uning V_{mp} (maksimal quvvat nuqtasidagi kuchlanish) qiymati invertorning nominal ish kuchlanishiga iloji boricha yaqin bo‘lsin.Odatda bu qiymat quyidagicha bo‘ladi:

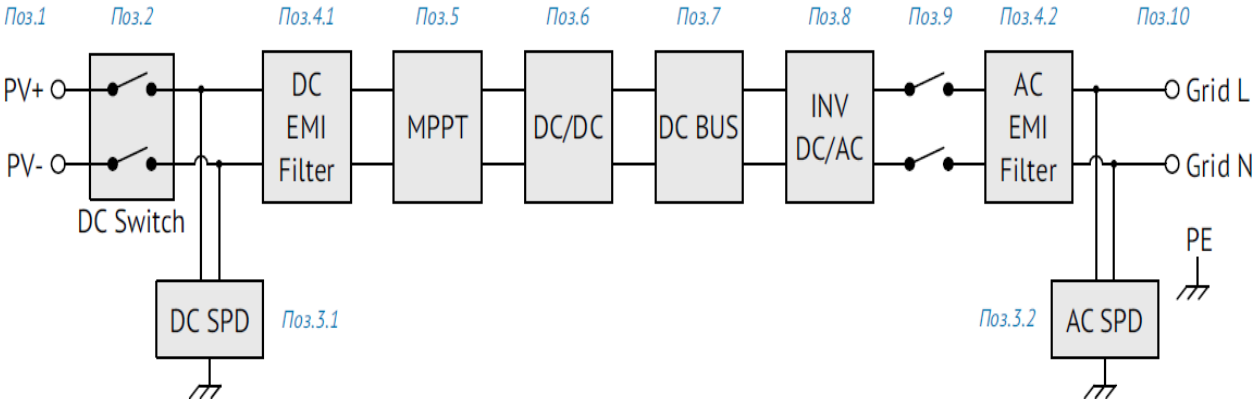
- bir fazali invertorlar uchun — taxminan 360 VDC;
- uch fazali modellar uchun — taxminan 600 VDC.

§3.2. Invertorning asosiy sxemasi

Quyida uning asosiy komponentlarining tavsifi berilgan.

1-pozitsiya – «PV+» va «PV-» ulagich terminallari. Fotovoltaik maydonning (PVA) musbat va manfiy o‘tkazgichlarini ulash uchun mo‘ljallangan. PVA – bu quyosh invertoriga kerakli doimiy tok kuchlanishini hosil qilish uchun ketma-ket ulangan fotovoltaik modullar (PVM) guruhi. Amalda ko‘proq inglizcha “String” (zanjir) atamasi ishlatiladi – bu modullarning ketma-ket ulanishini aks ettiradi. Har bir kirishda maksimal kirish toki (Max PV input current) cheklovi mavjud, shuning uchun ulangan stringning Imp toki bu qiymatdan oshmasligi kerak.

Muhim! PV+ va PV- terminallariga simlarni ulashda faqat invertor bilan birga keladigan original MC4 tipidagi ulagichlardan foydalanish kerak.



3.4-rasm. Bir fazali tarmoqqa ulanadigan (grid-tied) invertorning asosiy sxemasi.

2-pozitsiya – Doimiy tok ajratkich (DC Switch). PV modullar va invertor o‘rtasidagi zanjirni uzish uchun xizmat qiladi.

Muhim! Invertor ishlayotgan paytda, ayniqsa quyosh nurlari eng yuqori bo‘lgan vaqtda DC Switchni o‘chirish tavsiya etilmaydi. O‘chirishdan oldin invertorni servis menyusi orqali kutish (stand by) rejimiga o‘tkazib, tokni nolgacha pasaytirish va shikastlanish xavfini yo‘qotish kerak.

3-pozitsiya – Chaqmoq va ortiqcha kuchlanishdan himoya qurilmasi (SPD – Surge Protection Device) doimiy va o‘zgaruvchan tok zanjirlarida. Yuqori energiyali impulsli ortiqcha kuchlanishlarni erga (ground) yo‘naltirib, jihozlarni shikastlanishdan himoya qiladi. Invertorda ham DC, ham AC tomonida SPD o‘rnatilgan (SPD DC va SPD AC).

Muhim! DC va AC zanjirlar uchun SPDlar konstruksiyasi va ishlash prinsipi jihatidan sezilarli farq qiladi, shuning uchun to‘g‘ri turdagi qurilma tanlanishi shart. DC-SPDlarda tokning nol o‘tishi yo‘qligi sababli yoyni o‘chirish tizimi murakkabroq bo‘ladi.

SPDlar turlarga quyidagicha bo‘linadi:

- **I tur** – to‘g‘ridan-to‘g‘ri chaqmoq urishidagi tokni (65–100 kA, 10/350 µs to‘lqin) erga yo‘naltirish uchun;

- **II tur** – uzoq masofadagi chaqmoq tufayli induksiyalangan ortiqcha kuchlanishdan himoya (20 kA gacha, 8/20 µs);
- **III tur** – qoldiq impulslar uchun qo‘shimcha himoya, odatda I va II tur bilan birga ishlatiladi.

Invertorlarda odatda DC va AC tomonlarida II turdagi SPD o‘rnatiladi – ular to‘g‘ridan-to‘g‘ri chaqmoqdan emas, balki yaqin atrofdagi chaqmoq yoki tarmoqdagi kommutatsiya jarayonlari natijasida kelib chiqadigan induksiyalangan impulsli ortiqcha kuchlanishlardan himoya qiladi.

Muhim! Ortiqcha kuchlanish yuzaga kelganda SPD ichidagi varistorlar (yoki gaz razryadniklar) bir zumda o‘tkazuvchan holatga o‘tadi va impuls energiyasini erga yo‘naltiradi. Agar erlash tizimi umuman bo‘lmasa yoki uning qarshiligi yuqori bo‘lsa, energiya samarali tarqalmaydi, qoldiq kuchlanish yuqori bo‘lib qoladi va SPD bo‘lsa ham invertor shikastlanishi mumkin.

DC-SPDlar 600 V, 1000 V, 1500 V nominal kuchlanishlar uchun, AC-SPDlar esa 230 V (bir fazali) va 400 V (uch fazali) uchun ishlab chiqariladi.

4-pozitsiya – Elektromagnit shovqin filtri (EMI filter – ElectroMagnetic Interference). Invertor ishlashida hosil bo‘ladigan yuqori chastotali elektromagnit shovqinni bostirish uchun mo‘ljallangan. EMI filtrning o‘rnatilishi quyidagilarni ta’minlaydi:

- tarmoqdagi elektr energiyasi sifatini oshirish;
- elektromagnit moslik (EMC) standartlariga rioya qilish;
- boshqa elektron qurilmalar (ayniqsa, o‘lchov asboblari, aloqa tizimlari) bilan o‘zaro shovqin xavfini kamaytirish.

DC va AC filtrlar konstruksiyasi, vazifasi va xususiyatlari jihatidan farq qiladi. AC filtrlar 230/400 V sinusoidali tarmoqlardagi yuqori chastotali shovqinni, DC filtrlar esa 600–1500 V doimiy tok zanjirlaridagi konverter va PWM boshqaruvchilari hosil qilgan impulsli shovqinni bostiradi.

Muhim! EMI filtr invertor hosil qilgan yuqori chastotali shovqinni erga yo‘naltirish uchun ishlaydi. Yerlash tizimi bo‘lmasa filtrning samaradorligi keskin

pasayadi. Shuning uchun invertor korpusi va filtr ekranini ishonchli erlash – filtrning to‘g‘ri ishlashi uchun juda muhim shart.

5-pozitsiya – MPPT boshqaruvchisi (Maximum Power Point Tracking). Invertor ichiga o‘rnatilgan maksimal quvvat nuqtasini kuzatib borish tizimi bo‘lib, turli yoritilish va harorat sharoitlarida fotovoltaik modullardan maksimal energiya olishni ta’minlaydi. 4.3-bobda bitta PV modulning tok-kuchlanish xarakteristikasi (I-V egri chizig‘i) ko‘rib chiqilgan edi. Ketma-ket ulangan modullardan tashkil topgan fotovoltaik maydon ham o‘z I-V xarakteristikasiga ega. Ideal holda u bitta modulnikiga o‘xshaydi, faqat kuchlanish ulangan modullar soniga mutanosib ravishda oshadi.

Amalda esa ishlab chiqarishdagi farqlar, ifloslanish, soyada qolish va boshqa omillar tufayli har bir modulning parametrlari biroz farq qiladi, natijada butun stringning umumiy I-V xarakteristikasi biroz buziladi. MPPT samaradorligini oshirish uchun:

- bir xil modullardan foydalanish,
- bir xil egilish burchagi va yo‘nalishi,
- hech qaysi modulning soyada qolmasligi juda muhim.

Bitta MPPTga ikkita string ulanganda ham ularning I-V xarakteristikalari iloji boricha bir xil bo‘lishi kerak (bir xil modullar, teng son, bir xil orientatsiya). Farqlar bo‘lsa, umumiy I-V egri chizig‘i buziladi, MPPT ishi qiyinlashadi va tizim samaradorligi pasayadi.

MPPT boshqaruvchisi I-V xarakteristikasini ketma-ket “skanerlashi” orqali U va I ning maksimal quvvat beradigan (P=U×I) nuqtasini topadi. Quyosh nurlari o‘zgarganda yoki soya tushganda maksimal quvvat nuqtasi (MPP) siljiydi, MPPT esa o‘rnatilgan algoritm yordamida yangi optimal nuqtani avtomatik topib, tizimni samarali ishlashini ta’minlaydi. Fotovoltaik tizimni loyihalashda MPPTning quyidagi asosiy xususiyatlarini hisobga olish zarur:

- **MPPT ish kuchlanish diapazoni** – MPPT maksimal quvvat nuqtasini kuzatib bora oladigan DC kirish kuchlanish diapazoni. Bu diapazondan chiqib ketsa MPPT o‘chadi yoki cheklangan rejimda ishlaydi.

- **To‘liq yuklamadagi MPPT ish diapazoni** – MPPT belgilangan barcha kirish quvvatini hech qanday tok cheklovisiz qabul qila oladigan kuchlanish diapazoni. To‘g‘ri ishlash uchun yozda (yuqori harorat – minimal Vmp) ham, qishda (past harorat – maksimal Vmp) ham PV modulning Vmp qiymati shu diapazonda qolishi kerak.
- **MPPT uchun maksimal kirish toki** – ortiqcha yuklamalanishsiz qabul qila oladigan eng yuqori tok. Bitta stringning Imp toki bu chegaradan oshmasligi kerak.
- **MPPT uchun maksimal qisqa tutashuv toki (Isc)** – kirishda qisqa tutashuv bo‘lganda zarar ko‘rmasdan bardosh bera oladigan eng yuqori tok. Ishonchli ishlash uchun bu qiymat ulangan modul(lar)ning I_{sc} tokidan kamida 1,25 marta katta bo‘lishi tavsiya etiladi.
- **MPPT uchun maksimal ruxsat etilgan quvvat** – MPPT samarali qayta ishlay oladigan maksimal kirish quvvati. Undan oshsa, boshqaruvchi tokni cheklaydi va haqiqiy energiya ishlab chiqarish kamayadi.

6-pozitsiya – DC-DC konverter (doimiy tok konverteri). Fotovoltaik modulning chiqish kuchlanishini invertor qismi tomonidan o‘zgaruvchan tokka aylantirish uchun zarur bo‘lgan doimiy tok shinasidagi (DC-BUS) kuchlanish darajasiga moslashtirish uchun xizmat qiladi.

Sxemada alohida blok sifatida ko‘rsatilgan bo‘lsa-da, konstruktiv jihatdan u MPPT boshqaruvchisining ajralmas qismidir va maksimal quvvat nuqtasini kuzatish vazifasini bajaradi. Tarmoq invertorlarida eng ko‘p boost (kuchlanishni oshiruvchi) tipdagi konverter qo‘llaniladi. Ko‘proq universal yechimlarda buck-boost rejimi ishlatiladi.

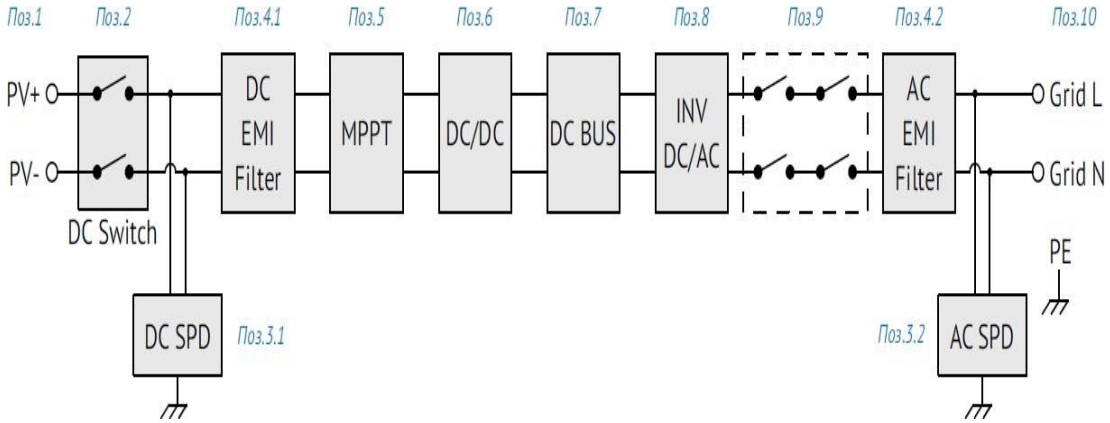
Muhim! Ko‘pgina invertorlarda ikki yoki undan ko‘p mustaqil MPPT kirishi mavjud bo‘lib, turli yo‘nalishdagi, egilish burchagiga ega yoki uzunligi farqli stringlarni ulash imkonini beradi. Mustaqil bo‘lishiga qaramay, ularning har biri o‘z DC-DC konverteri orqali umumiy DC-BUS shinasiga ulanadi. Shuning uchun barqaror ishlash uchun MPPT kirishlari orasidagi kuchlanish farqi katta bo‘lmasligi kerak. Ishlab chiqaruvchilar odatda farqni 150 V dan oshmasligiga ruxsat beradi. Loyihalashda bloklarni ish kuchlanishi iloji boricha yaqin qilib shakllantirish yoki

farqni bitta modul (taxminan 40–50 V) bilan cheklash kerak. Kuchlanish farqi juda katta bo‘lsa, ba’zi invertorlar xato rejimiga o‘tadi va masalan, “DC BUS UNBALANCE” xatosini chiqaradi.

7-pozitsiya – Doimiy tok shinasi (DC Bus). Invertor ichidagi barcha doimiy tok manbalari va yuklamalamalarini birlashtiruvchi umumiy shinadir. DC Bus invertor ko‘prigiga (DC-AC) energiya beradi. PWM modulyatsiyasining to‘g‘ri ishlashi uchun DC Busdagi kuchlanish AC chiqish signalining amplitudasidan yuqori bo‘lishi shart.

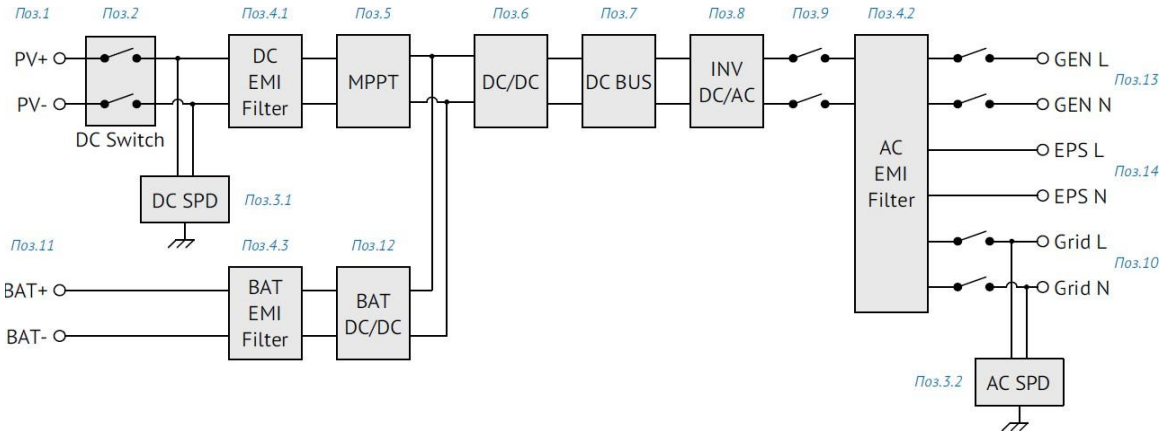
8-pozitsiya – Invertor (DC/AC). Doimiy tok shinasidagi kuchlanishni sinusoidali o‘zgaruvchan kuchlanishga aylantiruvchi quvvat moduli. Aylantirish tranzistor ko‘prigi (IGBT yoki MOSFET) va impuls kenglik modulyatsiyasi (PWM) yordamida amalga oshiriladi. Chiqishda LC yoki LCL filtrlar o‘rnatilgan bo‘lib, pulsatsiyali signalni minimal garmonikali sinusoidaga aylantiradi.

9-pozitsiya – Chiqish ajratkich-relesi (Output Isolation Relay). Favqulodda yoki beqaror rejimlarda, shuningdek generatsiya to‘xtatilganda invertorni AC tarmoqdan apparat tarzda uzish uchun mo‘ljallangan. Rele quyidagi holatlarda ishga tushadi: tarmoqda kuchlanish yo‘qligi, chastota yoki kuchlanishning ruxsat etilgan chegaradan chiqishi, sinxronizatsiya xatosi, izolyatsiya yoki chastota himoyasining ishga tushishi. Qayta ulanish faqat tarmoq parametrlari normaga qaytgandan va standart talab qiladigan kechikish vaqti o‘tgandan so‘ng amalga oshiriladi. Ba’zi mamlakatlarda ajratkich-rele talablari ikkita ketma-ket rele (dual relay cascade) va Fail-Safe funksiyasini majburiy qiladi, ular tarqatilgan generatsiya tizimlarida ishlash uchun sertifikatlangan bo‘lishi kerak (5.5-rasmga qarang).



3.5-rasm. Ikki bosqichli rele (Fail-Safe) bilan bir fazali tarmoqqa ulanadigan invertorning sxemasi.

10-pozitsiya – «L», «N» va «PE» terminallari. O‘zgaruvchan tok (AC) tomonidagi faza o‘tkazgich, neytral va erlash (himoya) simlarini ulash uchun mo‘ljallangan.



3.6-rasm. Bir fazali gibrid invertorning sxemasi.

Gibrid invertorlarda qo‘shimcha ravishda quyidagi elementlar mavjud:

11-pozitsiya – akkumulyator batareyalarini ulash terminallari;

12-pozitsiya – akkumulyatorlar va doimiy tok shinasi (DC-BUS) o‘rtasida kuchlanishni moslashtiruvchi o‘rnatilgan DC-DC konverter;

13-pozitsiya – dizel-generator (Gen) ulash terminallari;

14-pozitsiya – muhim yuklamalama (EPS – Emergency Power Supply) uchun alohida chiqish terminallari. Markaziy elektr ta’minoti uzilib qolsa, ushbu yuklama akkumulyatorlar va/yoki fotovoltaik modullardan kafolatlangan quvvat bilan ta’minlanadi.Bundan tashqari, gibrid invertorning blokida tarmoq kuchlanishini doimiy tokka aylantiruvchi rektifikator (AC/DC) mavjud bo‘lib, u doimiy tok shinasiga quvvat beradi va zaryad boshqaruvchisi tomonidan tashqi tarmoqdan akkumulyatorlarni zaryadlash uchun ishlatiladi.Bir fazali gibrid invertorning sxemasi 3.6-rasmda keltirilgan.

§3.3 Modullar va invertorning texnik mosligi

Dunyoda fotovoltaika sohasiga katta investitsiyalar kiritilishi nafaqat ishlab chiqarish hajmining oshishiga, balki fotovoltaik elektr stansiyalari komponentlarining texnik xususiyatlarining sezilarli darajada yaxshilanishiga ham olib keldi. So‘nggi yillarda fotovoltaik modullarning (PVM) quvvati, asosan, ularning tokining oshishi hisobiga ancha ortdi. Agar 2015–2017 yillarda ishlab chiqarish standartida M2 formati (156×156 mm) elementlar bo‘lib, qisqa tutashuv toki (I_{SC}) taxminan 8–9 A atrofida bo‘lgan bo‘lsa, 2020 yilga kelib kattaroq M6 (166×166 mm) va M10 (182×182 mm) formatlar keng tarqaldi va I_{SC} 11–13 A gacha oshdi. M12 formati (210×210 mm) va TOPCon, HJT kabi ilg‘or texnologiyalarning joriy etilishi bilan modullarning toki 18–20 A oralig‘iga etdi. Bunga yaqqol misol – bifasial JKM730-66HL5-BDV moduli bo‘lib, STC sharoitida I_{SC}=18,81 A, BNPI sharoitida esa 20,79 A ga etadi [28].Shunday qilib, nisbatan qisqa vaqt ichida bu parametr deyarli ikki baravar oshdi. Bu nafaqat fotovoltaik materiallar va komponentlar arxitekturasidagi yutuqlarni, balki loyihalash metodologiyasini qayta ko‘rib chiqish zaruratini ham ko‘rsatmoqda. PV modullarning parametrlari o‘sish tendensiyasi fotovoltaik elektr stansiyalarini loyihalashda va ularning invertor jihozlari texnik talablariga mosligini ta’minlashda yangi qiyinchiliklar tug‘dirmoqda. Invertorlar doimiy ravishda takomillashib borayotgan bo‘lsa-da, ularning MPPT boshqaruvchilarining maksimal toklarining o‘sish sur’ati zamonaviy modullarning tok o‘sishidan biroz orqada qolmoqda.Bu masalani aniqroq tushunish uchun hozirgi kunda juda talabgir bo‘lgan 10 kW quvvatli fotovoltaik stansiyani misol qilib ko‘raylik. U uch fazali tarmoqqa ulanadigan Huawei SUN2000-10KTL-M1HC invertoriga asoslangan bo‘lib, nominal quvvati 10 kW ni tashkil qiladi. 5.1-jadvalda ushbu invertorning fotovoltaik modullarni ulash tomoniga (PV Input) oid asosiy texnik xususiyatlari keltirilgan [33].

Eslatma. Amalda invertor yoki fotovoltaik modul uchun to‘liq va aniq tarjima qilingan texnik hujjatni topish har doim ham mumkin emas. Bunday hollarda ingliz tilini bilish va uni doimiy ravishda takomillashtirib borish alohida ahamiyatga ega, chunki asl texnik xususiyatlar va qo‘llanmalar odatda ingliz tilida nashr etiladi.

3.1-jadval. HUAWEI SUN2000-10KTL-M1HC tarmoqqa ulanadigan invertorning asosiy texnik xususiyatlari.

Parametr	Qiymati
Ulanadigan modullarning tavsiya etilgan maksimal quvvati	15,000 W
Maksimal doimiy tok kirish kuchlanishi	1100 V
MPPT ish kuchlanish diapazoni	140 – 980 V
To‘liq yuklamadagi MPPT kuchlanish diapazoni	140 – 850 V
Ishga tushirish kuchlanish	200 V
Nominal kuchlanish	600 V
Maksimal ruxsat etilgan MPPT toki	13.5 A
Maksimal qisqa tutashuv toki	19.5 A
MPPT uchun maksimal quvvat	8.8 kW
MPPT soni	2
Har bir MPPTga kirishlar soni	1

Bo‘lajak misolda bozorda bir xil nominal quvvatga ega bo‘lgan, lekin arxitekturasi va ishlab chiqaruvchining turli mahsulot seriyalariga mansub ikkita PV modul turi mavjud deb faraz qilamiz:

- JKM630N-78HL4 — 156 ta yarim-elementli (78×2)
- JKM630N-66HL4 — 132 ta yarim-elementli (66×2)

Mavzuning mohiyatini aniqroq etkazish uchun bir tomonlama yoki ikki tomonlama (bifacial, BDV) farqlari e’tiborga olinmaydi — har ikkala modulni shartli ravishda bir tomonlama deb hisoblaymiz. Fotovoltaik modullarning asosiy xususiyatlari 3.2-jadvalda keltirilgan.

3.2-jadval. JKM630N-78HL4 va JKM630N-66HL4 PV modullarining asosiy xususiyatlari

Parametr	JKM630N-78HL4
Maksimal quvvat (P_{max}), W	630
Maksimal quvvat nuqtasidagi kuchlanish (V_{mp}), V	47,70
Maksimal quvvat nuqtasidagi tok (I_{mp}), A	13,21

Ochik zanjir kuchlanishi (V_{oc}), V	57,08
Qisqa tutashuv toki (I_{sc}), A	13,86
Foydali ish koeffitsienti (samaradorlik), %	22,54
Vocning harorat koeffitsienti, %/°C	-0,25
Icning harorat koeffitsienti, %/°C	0,045

Ko‘rib chiqilayotgan modellar o‘rtasidagi asosiy farq elektr parametrlaridadir:

- JKM630N-78HL4 moduli yuqori kuchlanish va past tokka ega (keyingi o‘rinlarda shartli ravishda yuqori kuchlanishli modul deb ataladi);

- JKM630N-66HL4 moduli esa past kuchlanish va yuqori tokka ega (keyingi o‘rinlarda past kuchlanishli modul deb ataladi).

Fotovoltaik modullar sonini aniqlash

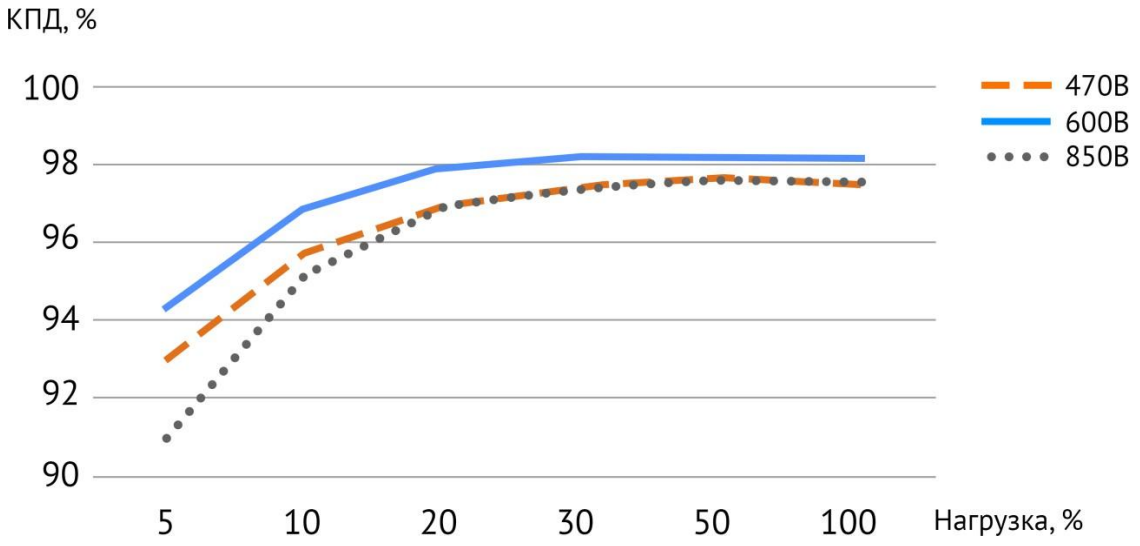
Invertorning texnik xususiyatlariga ko‘ra (3.1-jadval), ulanadigan modullarning tavsiya etilgan maksimal quvvati – 15 kW. Shu bilan birga, invertor chiqishidagi maksimal quvvat quvvat koeffitsienti 1 bo‘lganda **11 kW** bilan cheklangan. Bu shuni anglatadiki, agar PV modullarning quvvati ortiqcha ulansa, invertor chiqish quvvati cheklanadi (“clipping” effekti) va modullar tomonidan ishlab chiqarilgan energiyaning bir qismi foydalanilmay qoladi.Jahon amaliyotida invertorni o‘rtacha darajada “ortiqcha yuklamalash” keng tarqalgan: odatda ulangan PV modullarning umumiy quvvati invertorning nominal quvvatidan taxminan 20 %ga oshib ketadi. Bu quyidagilarga imkon beradi:

- past yoritilish, qisman yuklamalanish va modullarning vaqt o‘tishi bilan degradatsiyasidan kelib chiqadigan yo‘qotishlarni qoplash;

- kunning ko‘p qismida invertorning nominal quvvatiga yaqinroq ishlashini ta’minlash.Shuningdek shuni ta’kidlash kerakki, agar ulangan fotovoltaik modullarning umumiy quvvati invertorning nominal quvvatidan sezilarli darajada kam bo‘lsa (20 % dan kam), uning foydali ish koeffitsienti (samaradorligi) keskin pasayadi. Buning sababi – past yuklamalanishda invertor o‘zining optimal ish

diapazonidan tashqarida ishlaydi, ichki yo‘qotishlar ortadi va umumiy samaradorlik pasayadi.

3.7-rasmda Huawei SUN2000-10KTL-M1HC invertorning yuklamalama darajasi va PV modul kuchlanishiga bog‘liq holdagi samaradorligi ko‘rsatilgan (PV modul kuchlanishining invertorning samaradorligiga ta’siri alohida tahlil qilinadi). Grafikdan ko‘rinib turibdiki, yuklama darajasi 30 % dan past bo‘lganda invertor samaradorligi sezilarli darajada pasayadi – uning foydali ish koeffitsienti keskin tushib ketadi.



3.7-rasm. Huawei SUN2000-10KTL-M1HC invertorning yuklama darajasiga bog‘liq samaradorligi.

Ulanadigan fotovoltaik modullar soni va ularning umumiy o‘rnatilgan quvvati bo‘yicha qaror har bir loyiha uchun alohida qabul qilinadi. Bunda quyidagilar hisobga olinadi:

- fotovoltaik stansiyaning turi;
- PV modullarning yo‘nalishi (azimut va egilish burchagi);
- geografik hududning iqlim sharoiti;
- maqsadli generatsiya ko‘rsatkichlari;
- iqtisodiy maqsadga muvofiqligi, shu jumladan modullarning narxi.

Masalan, Farg‘ona vodiysida quyosh radiatsiyasi darajasi Buxoro viloyatiga nisbatan pastroq, shuning uchun bir xil invertorni qo‘llaganda Farg‘ona vodiysi

sharoitida PV modullarning o‘rnatilgan quvvatini Buxoro loyihalariga nisbatan biroz yuqoriroq qilish maqsadga muvofiqdir. Bundan tashqari, iqlim sharoiti invertorning ishlashiga ham ta’sir qiladi: salqin hududlarda bir xil chiqish quvvatida invertorning ichki harorati past bo‘lib, qizib ketish va undan keyingi quvvat cheklanishi (Temperature Derating) xavfi kamayadi.

Umuman olganda, O‘zbekistondagi kichik va o‘rta quvvatli fotovoltaik stansiyalar bilan ishlash tajribasiga asoslanib, ventilyatsiya tizimiga ega invertorlar uchun quyidagi tavsiyalar beriladi:bir tomonlama modullar ishlatilganda – umumiy quvvatni invertorning nominal quvvatidan 5–15 % yuqori qilish;ikki tomonlama (bifacial) modullar ishlatilganda – 10 % dan oshirmaslik.Bu yondashuv iqlim sharoitlarini hisobga olgan holda invertorning optimal yuklamalanishini ta’minlaydi va chiqish quvvati cheklanishi tufayli sezilarli yo‘qotishlarsiz tizim samaradorligini oshiradi.

Eslatma. Bir fazali invertorlarda majburiy sovutish uchun ventilyatorlar odatda bo‘lmaydi, faqat tabiiy sovutish tizimi mavjud. Tajribaga ko‘ra, ayniqsa issiq yoz kunlarida atrof-muhit harorati +38 °C dan oshganda invertor harorati 80 °C ga etadi va undan keyin qurilma harorat bo‘yicha quvvatni cheklash (temperature derating) rejimiga o‘tadi. Shu sababli kichik quvvatli bir fazali stansiyalarda modullarning umumiy quvvatini invertorning nominal quvvatidan oshirish har doim ham maqsadga muvofiq emas yoki qo‘shimcha tashqi ventilyatsiya tizimi o‘rnatilishi kerak.

Yuqoridagi tavsiyalarni, invertorning ikkita mustaqil MPPT kirishini va har bir kirishda bir xil kuchlanishni saqlash zarurligini (bu juft sonli modullarni simmetrik taqsimlashni talab qiladi) hisobga olgan holda, loyihada har biri 630 W bo‘lgan jami 18 ta fotovoltaik modul qo‘llaniladi. Umumiy o‘rnatilgan quvvat – 11,34 kW.

Aniqlik uchun JKM630N-78HL4 va JKM630N-66HL4 modullarini ulaganda invertor chiqish quvvatini standart sinov sharoitlariga (STC) mos holda solishtiramiz.

Avval JKM630N-78HL4 modullaridan tashkil topgan tizim va Huawei SUN2000-10KTL-M1HC invertorni ko‘rib chiqamiz.

9 ta JKM630N-78HL4 moduli ketma-ket ulanganda fotovoltaik maydonning maksimal quvvat nuqtasidagi kuchlanishi (V_{mp}):

$$V_{mp} = 9 \cdot 47,70 = 429,3\ V$$

Modullar ketma-ket ulanganligi sababli, butun fotovoltaik blokning maksimal quvvat nuqtasidagi toki (Imp) bitta modulning Imp tokiga teng bo‘ladi. JKM630N-78HL4 moduli uchun bu qiymat 13,21 A ni tashkil qiladi, bu esa MPPTning maksimal ruxsat etilgan kirish tokidan (13,5 A) past. Shuning uchun invertorning MPPT boshqaruvchisi fotovoltaik blokning maksimal quvvat nuqtasida hech qanday tok cheklovisiz ishlash imkoniyatiga ega bo‘ladi. Ikki ta fotovoltaik blokdan (stringdan) ishlaganda va kabel liniyalaridagi termik yo‘qotishlarni hisobga olmagan holda, invertorning kirishiga keladigan umumiy quvvat quyidagicha bo‘ladi:

$$P_{in} = 2 \cdot V_{mp} \cdot I_{mp} = 2 \cdot 429,3 \cdot 13,21 = 11342,1\ W$$

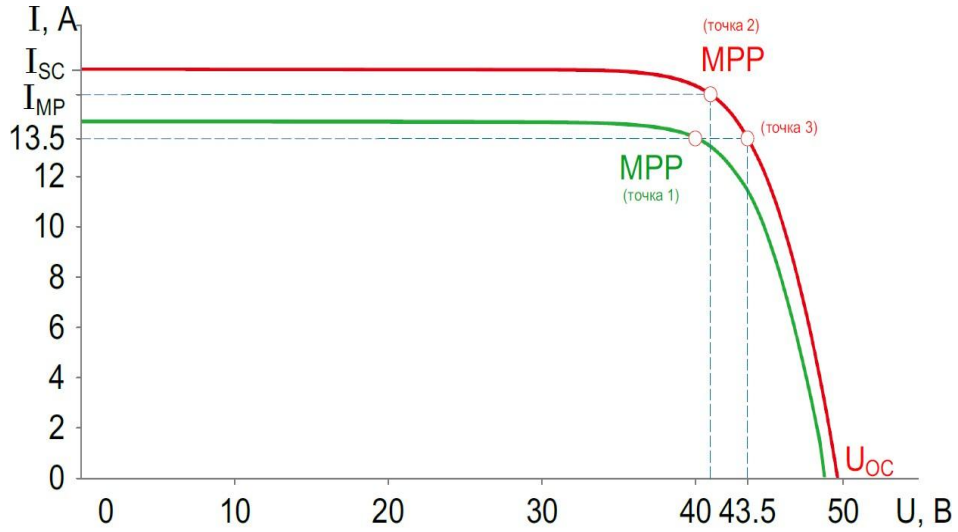
Kabel liniyalaridagi termik yo‘qotishlar hamda invertorning o‘zidagi yo‘qotishlarni hisobga olganda, invertorning chiqish quvvati 11 kW dan biroz kam bo‘ladi. Bu qiymat invertorning maksimal ruxsat etilgan chiqish quvvatidan oshmasligi sababli, invertor tomonidan hech qanday cheklov yuzaga kelmaydi.Endi JKM630N-66HL4 modullaridan tashkil topgan tizim va Huawei SUN2000-10KTL-M1HC invertorni ko‘rib chiqamiz.To‘qqizta ketma-ket ulangan JKM630N-66HL4 modulidan tashkil topgan fotovoltaik maydonning maksimal quvvat nuqtasidagi kuchlanishi (Vmp):

$$V_{mp} = 9 \cdot 41,02 = 369.2\ V$$

Biroq modulning I_{mp} toki 15,36 A ni tashkil qiladi, bu esa invertorning MPPT boshqaruvchisining maksimal ruxsat etilgan kirish tokidan (13,5 A) oshib ketadi. Shuning uchun quyosh radiatsiyasining ma’lum darajasiga etganda MPPT kirishidagi tok chegaraviy 13,5 A qiymatiga etadi (5.8-rasmda 1-nuqta) va undan ortiq oshishi mumkin bo‘lmaydi.

Quyosh radiatsiyasi yanada kuchayganda fotovoltaik modulning tok-kuchlanish xarakteristikasi (I-V egri chizig‘i) yuqoriga siljiydi. Agar tok cheklovi bo‘lmaganda, ish nuqtasi yangi maksimal quvvat nuqtasiga (5.8-rasmda 2-nuqta) o‘tgan bo‘lar edi – ya’ni hozirgi yoritilish sharoitiga mos keladigan nuqtaga. Lekin MPPT boshqaruvchisi tomonidan joriy qilingan tok cheklovi tufayli ish nuqtasi

o‘ngga – yuqori kuchlanish va past tok sohasiga majburan siljiydi, ya’ni optimal ish nuqtasidan tashqariga (5.8-rasmda 3-nuqta). Natijada fotovoltaik modul maksimal quvvat nuqtasidan uzoqda ishlaydi va quvvat ishlab chiqarishda yo‘qotishlar yuzaga keladi.

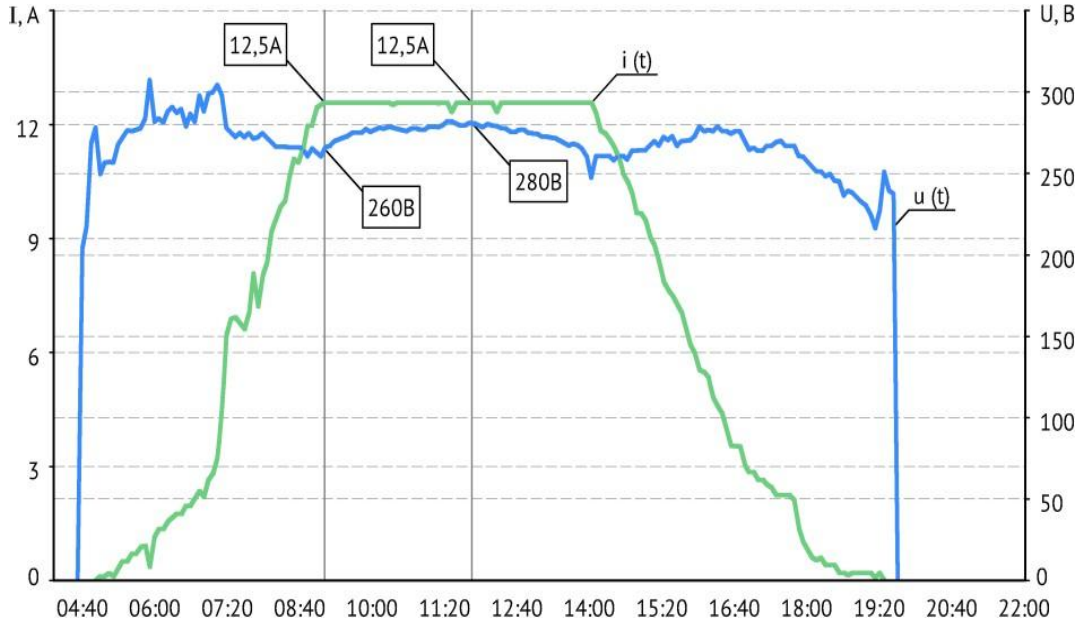


3.8-rasm. JKM630N-66HL4 modulining tok-kuchlanish xarakteristikasi (I-V egri chizig‘i).

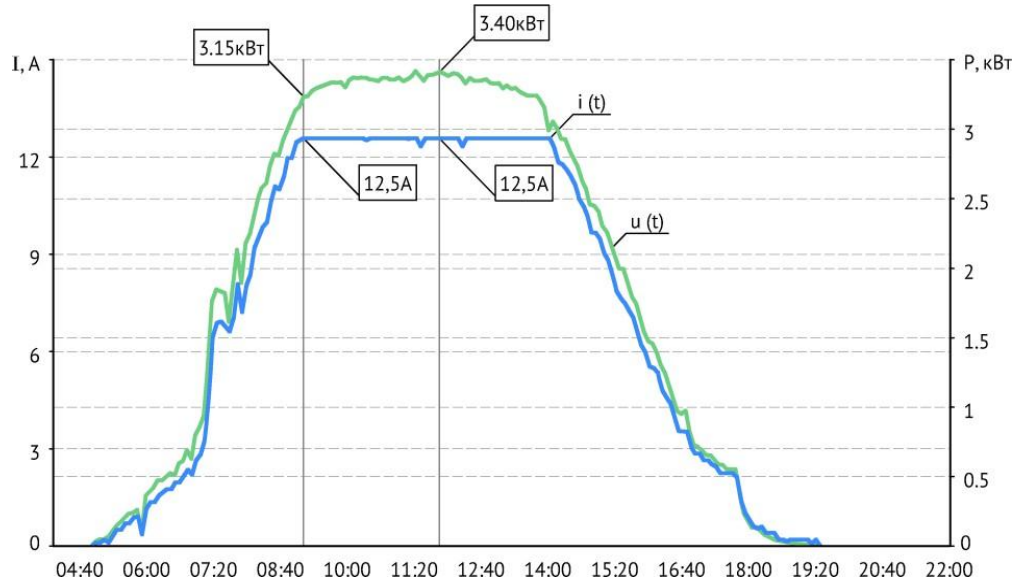
STC sharoitida ko‘rsatilgan I-V xarakteristikadan ko‘rinib turibdiki, MPPT kirishida maksimal ruxsat etilgan 13,5 A tokka etganda 3-nuqtadagi kuchlanish taxminan 43,5 V ni tashkil qiladi, bu esa maksimal quvvat nuqtasidagi kuchlanishdan (41,02 V) yuqori. Shuning uchun ish nuqtasi yuqori kuchlanish sohasiga siljiydi va PV modulning kuchlanishi quyidagicha bo‘ladi:Shunday qilib, ikkita fotovoltaik blokdan ishlaganda, MPPT tomonidan joriy qilingan tok cheklovini hisobga olgan holda va kabel liniyalaridagi termik yo‘qotishlarni e’tiborsiz qoldirganda, invertorning kirishiga keladigan umumiy quvvat: Invertor tokining to‘yinganligi tufayli yuzaga kelgan quvvat yo‘qotishlari: Demak, ko‘rib chiqilgan sharoitda invertorning maksimal kirish tokiga etish natijasida yo‘qotishlar 771 W ni tashkil qildi.

Shunday ekan, texnik nuqtai nazardan Huawei SUN2000-10KTL-M1HC invertor bilan birga JKM630N-78HL4 fotovoltaik modullarini qo‘llash afzalroqdir.Haqiqatda esa, tok chegarasiga etilgan paytdan quyosh radiatsiyasi

maksimal darajaga etguncha kuchlanishning oshishi STC sharoitida hisoblanganidan biroz kam bo‘ladi. Buning sababi – tok chegarasiga etgandan keyin element harorati oshishda davom etib, I-V xarakteristikasini chapga siljitadi va natijada kuchlanish pasayadi.



3.9-rasm. Invertorning doimiy tok (DC) tomonidagi tok va kuchlanish grafigi.



3.10-rasm – Invertorning doimiy tok (DC) tomonidagi tok va o‘zgaruvchan tok (AC) tomonidagi chiqish quvvati grafigi.

Eslatma. Grafikdan ko‘rinib turibdiki, invertorning chiqish quvvati PV modulning doimiy tok tomonidagi tok va kuchlanish ko‘paytmasidan biroz kam

bo‘ladi. Masalan, tok 12,5 A va kuchlanish 280 V bo‘lganda kirish quvvati 3,5 kW ni tashkil qilsa, invertorning chiqish quvvati taxminan 3,4 kW bo‘ladi. Bu farq invertorning ichki yo‘qotishlari bilan bog‘liq bo‘lib, bu holatdagi samaradorlik (η) quyidagicha hisoblanadi:

$$\eta = P_{\text{AC}}/P_{DC} = 3{,}4/3{,}5 \approx 97\,,1\%$$

JKM630N-78HL4 modullarini qo‘llashning issiqlik yo‘qotishlarini kamaytirishdan tashqari yana bir muhim afzalligi – MPPT boshqaruvchisiga tushadigan tok yuklamaining pasayishidir. Ushbu modullar ishlatilganda ish toki butun ish kuni davomida MPPT kirishining maksimal ruxsat etilgan qiymatidan past bo‘lib qoladi. Aksincha, JKM630N-66HL4 modullari ishlatilganda kunning bir necha soati davomida maksimal quvvat nuqtasidagi tok MPPT kirishining ruxsat etilgan chegarasiga etib, quvvat cheklanishiga (curtailment) olib keladi. Ruxsat etilgan tok chegarasida doimiy ishlash uzoq muddatda boshqaruvchining ishonchliligi va xizmat muddatiga salbiy ta’sir ko‘rsatishi mumkin. Har doim kerakli quvvatni pastroq tok yuklamai bilan ta’minlash imkoni bo‘lsa, aynan shu yondashuvdan foydalanish kerak. JKM630N-78HL4 modullarini tanlashni qo‘llab-quvvatlovchi yana bir muhim omil – ularning qisqa tutashuv toki darajasi. Texnik tafsilotlarga chuqur kirishdan oldin shuni ta’kidlash kerakki, qabul qilingan qoidalarga ko‘ra MPPT uchun ruxsat etilgan qisqa tutashuv toki ulangan modullarning umumiy qisqa tutashuv tokidan kamida 25 % yuqori bo‘lishi kerak.

L-M1HC invertorning ushbu parametri 19,5 A bo‘lib, JKM630N-78HL4 modulining qisqa tutashuv tokidan (13,86 A) taxminan 40 % yuqori. Shu bilan birga, JKM630N-66HL4 modulining qisqa tutashuv toki 16,24 A bo‘lib, zaxira faqat ~20 % ni tashkil qiladi. Bu esa ko‘rib chiqilayotgan holatda JKM630N-78HL4 modulini qo‘llash invertorning ishonchli va xavfsizroq ishlashini ta’minlashini yana bir bor tasdiqlaydi.Yuqoridagi dalillar faqat ikki tomonlama (bifacial) modullar mavjud bo‘lganda yanada muhim ahamiyat kasb etadi. Avval aytib o‘tilganidek, orqa tomondan qaytgan nurlanish hisobiga quvvat o‘sishi deyarli faqat tokning ortishi orqali ro‘y beradi, kuchlanish esa deyarli o‘zgarmaydi. Bunday sharoitda:

- MPPT boshqaruvchisi tomonidan tok cheklanishi bilan bog‘liq generatsiya

yo‘qotishlari ortadi;

- MPPTning maksimal tok yuklamaida ishlash muddati uzayadi – bu uzoq muddatda uning ishonchliligiga salbiy ta’sir qilishi mumkin;

- qisqa tutashuv toki bo‘yicha zaxira kamayadi, bu xavfsiz ishlash talablariga rioya qilishni qiyinlashtiradi.Amalda kichik quvvatli fotovoltaik stansiyalarda ba’zan barcha modullar ketma-ket ulanib, bitta fotovoltaik string (PVS) hosil qilinadi va u bitta MPPT kirishiga beriladi.

Keling, bunday konfiguratsiyaning oqibatlarini Huawei SUN2000-10KTL-M1HC invertori va JKM630N-78HL4 hamda JKM630N-66HL4 modullari misolida ko‘rib chiqamiz.

Avval 18 ta JKM630N-78HL4 moduli ketma-ket ulanib, bitta fotovoltaik string hosil qilinib, Huawei SUN2000-10KTL-M1HC invertorning bitta kirishiga ulangan holatni ko‘raylik.

Birinchi navbatda, bunday ulanishning xavfsiz kuchlanish darajasi nuqtai nazaridan ruxsat etilganligini tekshiramiz. Buning uchun loyihada qabul qilingan eng past element harorati –20°C da butun PV maydonning ochiq zanjir kuchlanishini (Voc) aniqlaymiz:

$$V_{OC.max} = 18 \cdot V_{OC\,STC} \cdot \left(1 + K_V \cdot \frac{(t-25)}{100}\right) = 18 \cdot 57{,}08 \cdot \left(1 - 0{,}25 \cdot \frac{-20-25}{100}\right) = 1143\ V$$

bu yerda: V_{oc}(-20°C) – loyihada qabul qilingan eng past element harorati –20 °C da ochiq zanjir kuchlanishi, V; V_{oc}(STC) – STC sharoitidagi ochiq zanjir kuchlanishi, V; β(Voc) – kuchlanishning harorat koeffitsienti, %/°C; T_{cell} – hisoblangan element harorati, °C.

Ko‘rinib turibdiki, hisoblangan eng past haroratda fotovoltaik maydonning ochiq zanjir kuchlanishi 1143 V ni tashkil qiladi. Bu qiymat invertorning maksimal ruxsat etilgan kirish darajasidan 1100 V) oshib ketadi va MPPT boshqaruvchisi uchun tavsiya etilgan kuchlanish diapazonidan ancha yuqori. Shunday ekan, eng muhim mezonlardan biri – jihozlarning xavfsiz ishlashini ta’minlovchi ruxsat etilgan kuchlanish darajasi bajarilmagani uchun keyingi tahlil o‘rinsiz bo‘lib qoladi.

Eslatma. Uch fazali invertorlar loyihalanayotganda fotovoltaik maydonlarni

shunday tuzish tavsiya etiladiki, ochiq zanjir kuchlanishi (Voc) hisoblangan eng past haroratda bo‘lmasa ham, hech bo‘lmaganda ushbu iqlim uchun odatiy bo‘lgan eng ehtimolli minimal ish haroratida 850 V dan oshmasin.

Endi 18 ta JKM630N-66HL4 moduli ketma-ket ulanib, bitta fotovoltaik maydon (PVA) hosil qilinib, Huawei SUN2000-10KTL-M1HC invertorning bitta kirishiga ulangan holatni ko‘rib chiqamiz.Ushbu ulanishning xavfsiz kuchlanish darajasi nuqtai nazaridan ruxsat etilganligini tekshiramiz. Buning uchun loyihada qabul qilingan eng past element harorati –20 °C da butun PV maydonning ochiq zanjir kuchlanishini aniqlaymiz:

$$V_{OC.max} = 18 \cdot V_{OC\,STC} \cdot \left(1 + K_V \cdot \frac{(t - 25)}{100}\right) = 18 \cdot 49{,}48 \cdot \left(1 - 0{,}25 \cdot \frac{-20 - 25}{100}\right) = 990\ V$$

Hisoblangan maksimal kuchlanish ruxsat etilgan chegaradan oshmasa-da, fotovoltaik blokning kuchlanish darajasi baribir yuqori bo‘lib qolmoqda va bunday konfiguratsiya tavsiya etilmaydi. Shu bilan birga, ushbu misolda bunday ulanishning oqibatlarini ko‘rib chiqamiz, chunki amalda 630 W lik 16 ta modul (umumiy o‘rnatilgan quvvati 10,1 kW) dan tashkil topgan 10 kW lik loyihalar tez-tez uchraydi. Barcha 16 modulni ketma-ket ulaganda hisoblangan maksimal kuchlanish **880 V** ga etadi: 18 ta JKM630N-66HL4 modulini ketma-ket ulaganda invertor tomonidan tok cheklanishi tufayli yuzaga keladigan quvvat yo‘qotishlari o‘zgarmay qoladi. Ushbu ulanishda ko‘rib chiqilayotgan sharoitlardagi fotovoltaik maydonning ish kuchlanishi quyidagicha bo‘ladi:

$$\boldsymbol{V_{(I=13{,}5A)} = 18 \cdot V_{3\ nuqta} = 18 \cdot 43{,}5 = 783\ V}$$

bu yerda: V_{op} – ko‘rib chiqilayotgan quyosh radiatsiyasi darajasidagi ish nuqtasining kuchlanishi, V.

Shunday qilib, ish kuchlanishi 850 V dan past bo‘lib qoladi va to‘liq yuklamalamadagi MPPT diapazoni ichida qoladi. Demak, bitta 18 modulli blok o‘rniga har biri 9 tadan ikkita fotovoltaik blokdan foydalanishga nisbatan, ko‘rsatilgan sharoitlarda qo‘shimcha tok yoki kuchlanish cheklovlari yuzaga

kelmaydi. Bunday sharoitda umumiy quvvat taxminan **10,5 kW** atrofida bo‘lishi kerak edi.

Shunga qaramay, ushbu konfiguratsiyada quvvat invertorning bitta MPPT uchun maksimal ruxsat etilgan quvvati – 8,8 kW bilan cheklanadi. Amalda, fotovoltaik stansiyani loyihalashda bu parametr ko‘pincha e’tibordan chetda qoladi, chunki u har doim ham ochiq texnik hujjatlarda ko‘rsatilmaydi va faqat ishlab chiqaruvchidan maxsus so‘rov orqali olinadi.Ushbu parametrni tekshirmaslik ko‘pincha, ayniqsa ikkita fotovoltaik maydonni bitta MPPTga ulash loyihalarida sezilarli quvvat cheklanishlariga olib keladi. Bunday holatni ko‘rsatuvchi amaliy misol keyingi bo‘limlarda turli fotovoltaik stansiya konfiguratsiyalarini tahlil qilishda ko‘rib chiqiladi.

§3.4. Invertorning foydali ish koeffitsienti (samaradorligi)

Invertorning samaradorligi — fotovoltaik modullar tomonidan beriladigan kirish doimiy tok (DC) quvvatiga nisbatan chiqish o‘zgaruvchan tok (AC) quvvatining nisbati sifatida aniqlanadi:

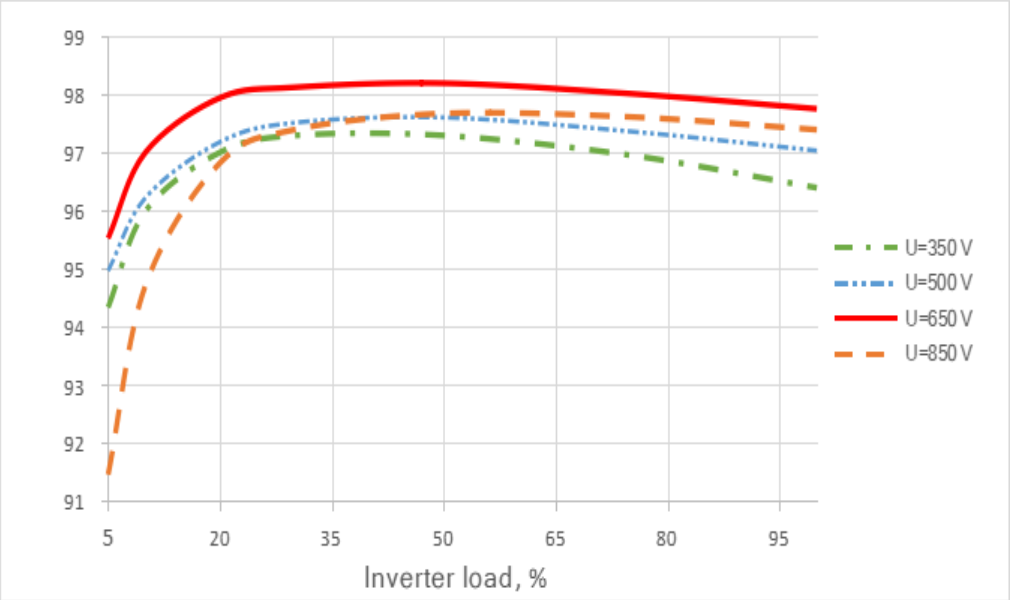
$$\eta_{invertor} = \frac{P_{chiqish}}{P_{kirish}} \cdot 100\%$$

Invertorning maksimal samaradorligi odatda texnik hujjatlarda ko‘rsatiladi. Biroq real ish sharoitlarida uning haqiqiy samaradorligi ancha past bo‘ladi, chunki u ko‘p omillarga (yuklamalama, kuchlanish, harorat va boshqalar) bog‘liq. Samaradorlikning turli parametrlarga bog‘liqligi har bir model uchun o‘ziga xos bo‘lib, hatto bir ishlab chiqaruvchining turli invertorlari o‘rtasida ham sezilarli farq qilishi mumkin.Ushbu bo‘limda aniq bir modelga bog‘lanmagan holda, asosiy omillarning ta’sir mohiyatini tushunishga imkon beruvchi **tipik bog‘liqliklar** ko‘rib chiqiladi. Muayyan invertorning joriy samaradorlik grafigini to‘g‘ridan-to‘g‘ri ishlab chiqaruvchidan so‘rash kerak.

Eslatma. Fotovoltaik modullar xususiyatlari va invertor parametrlari o‘rtasidagi mos kelmaslik (maksimal tok cheklovi, MPPT uchun ruxsat etilgan quvvat va h.k.) natijasida yuzaga keladigan holatlar oldingi bo‘limda ko‘rib chiqildi. Bu cheklovlar umumiy tizim samaradorligiga

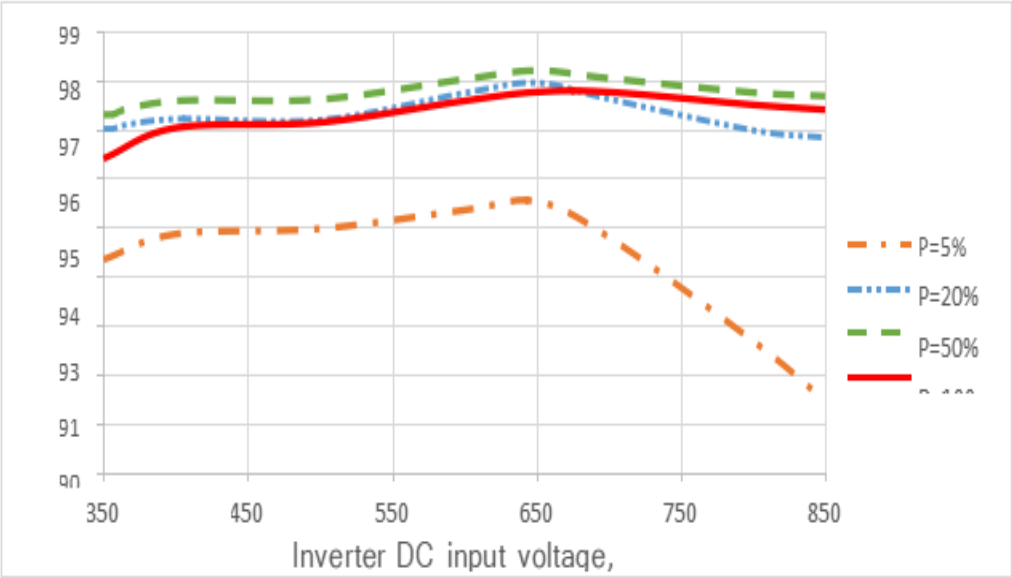
ta’sir qiladi, lekin ular invertorning o‘z samaradorligi bilan bevosita bog‘liq emas. Buning sababi shundaki, bunday hollarda quvvat pasayishi invertor kirishidan oldin sodir bo‘ladi — fotovoltaik modullarning ish nuqtasi maksimal quvvat nuqtasidan uzoqlashgani tufayli.

Invertorning samaradorligi uning yuklama darajasiga hamda DC kirishiga berilayotgan fotovoltaik maydon kuchlanishiga bog‘liq. 3.11-rasmda uch fazali invertorning turli DC kirish kuchlanishlarida yuklama darajasiga bog‘liq samaradorlik egri chizig‘i keltirilgan. Grafikdan ko‘rinib turibdiki, har qanday yuklamalama darajasida maksimal samaradorlik** kirish kuchlanishi nominal qiymatga – bu holatda 650 V ga teng bo‘lganda erishiladi.



3.11-rasm. Uch fazali invertorning yuklama darajasiga bog‘liq samaradorligi.

Ushbu kuchlanishdan chetga chiqish samaradorlikni bir necha foizga pasaytiradi. 3.12-rasmda** ham uch fazali invertorning samaradorligining fotovoltaik modul kirish kuchlanishiga va turli yuklama darajalariga bog‘liqligi ko‘rsatilgan. Grafik shuni ko‘rsatadiki, ish kuchlanishlarining butun diapazonida maksimal samaradorlik invertor taxminan nominal quvvatining 50 % ga yuklamalanganda qayd etiladi.



3.12-rasm. Uch fazali invertorning DC kirish kuchlanishiga bog‘liq samaradorligi.

3.11 va 3.12-rasmlardagi grafiklar tahlilidan ko‘rinib turibdiki, o‘rganilayotgan uch fazali invertorda maksimal samaradorlik 98,2 % nominal quvvatining 50 % yuklamalanishida va DC kirish kuchlanishi nominal qiymatga - 650 V ga teng bo‘lganda qayd etiladi.

Huddi shu kirish kuchlanishida, 20 % dan 100 % gacha yuklama oralig‘ida samaradorlik maksimal qiymatdan (50 % yuklamadagi) 0,5 % dan ko‘p chetga chiqmaydi. Shuning uchun samaradorlikni juda oz yaxshilash uchun invertorni faqat 50 % quvvatda ishlashga majburlash iqtisodiy jihatdan oqlanmaydi. Bundan tashqari, quyosh radiatsiyasining tabiiy sutkalik o‘zgarishi tufayli invertor kamdan-kam hollarda to‘liq yuklamalamada ishlaydi, aksariyat vaqt 20–100 % yuklamalama oralig‘ida faoliyat yuritadi.Yuklamalama 20 % dan pastga tushganda esa invertorning samaradorligi sezilarli darajada pasayishni boshlaydi. Shuning uchun fotovoltaik stansiyani loyihalashda “kelajakda kengaytirish uchun” katta quvvat zaxirasi bilan invertor tanlash maqsadga muvofiq emas. Bunday hollarda modullar soni keyinchalik oshirilganda mos quvvatdagi qo‘shimcha invertor o‘rnatish ancha oqilona.

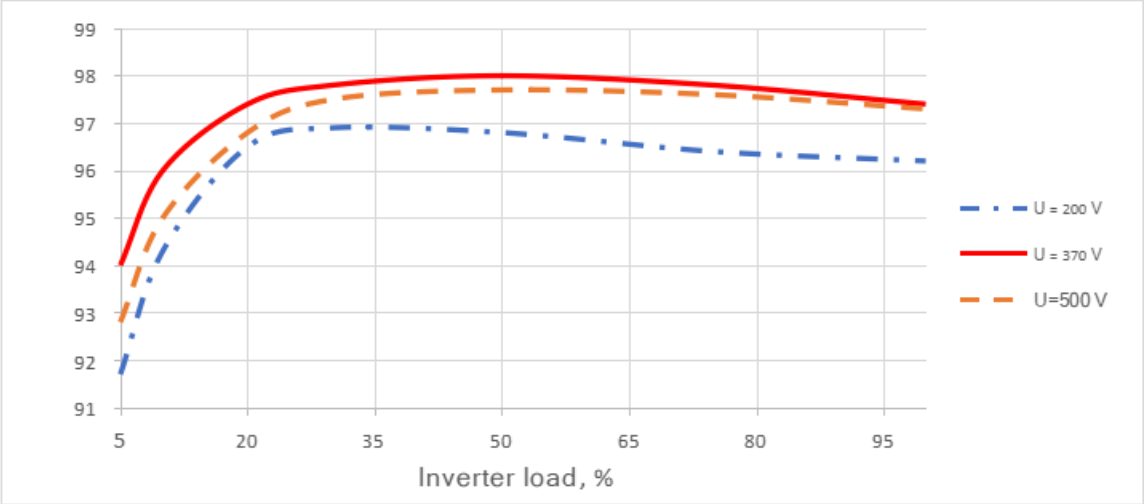
Fotovoltaik blok kuchlanishi nominal qiymatdan chetga chiqqanda invertorning samaradorligi pasayishi kirish doimiy tok kuchlanishini o‘zgaruvchan

tokka aylantirish uchun optimal darajaga moslashtirish bilan bog‘liq qo‘shimcha yo‘qotishlar bilan izohlanadi. PV modullarning nominal quvvati ortib borayotgani va bozorda kichik quvvatli modullar etishmasligi sababli bu muammo, ayniqsa kichik quvvatli stansiyalar uchun tobora dolzarb bo‘lib bormoqda. 3.11 va 3.12-rasmlardagi grafiklardan ko‘rinib turibdiki, fotovoltaik blok kuchlanishi nominal qiymatdan chetga chiqishi invertorning samaradorligini **1–2 %** ga pasaytiradi. Biroq kuchlanishning konversiya samaradorligiga bevosita ta’siridan tashqari, bilvosita ta’sir ham mavjud — qizib ketish tufayli invertor chiqish quvvatining pasayishi.Masalan, 50 kW lik invertorda samaradorlikning 2 % ga pasayishi qo‘shimcha taxminan 1 kW issiqlik chiqishiga olib keladi. Bu qurilma ichidagi haroratni oshiradi. Muayyan harorat chegarasiga etganda invertor quvvat elektronikasini himoya qilish uchun **Temperature Power Derating (harorat bo‘yicha quvvatni cheklash) rejimini yoqadi. Natijada bunday sharoitda butun fotovoltaik stansiyaning real yo‘qotishlari faqat samaradorlik pasayishidan kelib chiqadigan 1–2 % dan ancha yuqori bo‘lishi mumkin. Bundan tashqari, PV blok kuchlanishi past bo‘lganda toklar ortadi, bu esa PV blok va invertor o‘rtasidagi kabeldagi yo‘qotishlarni (Joule–Lenz qonuniga ko‘ra) oshiradi.

Shuning uchun optimal yondashuv quyidagicha: PV blokni shunday loyihalash kerakki, STC sharoitida maksimal quvvat nuqtasidagi kuchlanish (Vmp) invertorning nominal kuchlanishidan yuqori bo‘lsin. Bu yozda (harorat tufayli Vmp pasayganda) real ish kuchlanishi invertorning eng yaxshi ish diapazoniga to‘g‘ri kelishini ta’minlaydi. Bunda issiqlik yo‘qotishlari va qizib ketish xavfi aynan issiq mavsumda, ya’ni sovutish sharoiti yomonlashganda minimallashtiriladi.Qishda esa V_{mp} nominal qiymatdan yuqori bo‘ladi, bu invertorning samaradorligini biroz pasaytirishi mumkin. Biroq past atrof-muhit harorati tufayli qizib ketish xavfi yo‘q, shuning uchun yozgi davrdan farqli o‘laroq, invertor **Temperature Power Derating rejimiga o‘tmaydi. Shu sababli bunday yo‘qotishlar ahamiyatsiz bo‘lib, umumiy energiya ishlab chiqarishga deyarli ta’sir qilmaydi.

Eslatma. Ertalab va kechqurun, invertor yuklamai 20 % dan past bo‘lganda uning samaradorligi optimaldan ancha past bo‘ladi. Biroq bu davrda mutlaq issiqlik

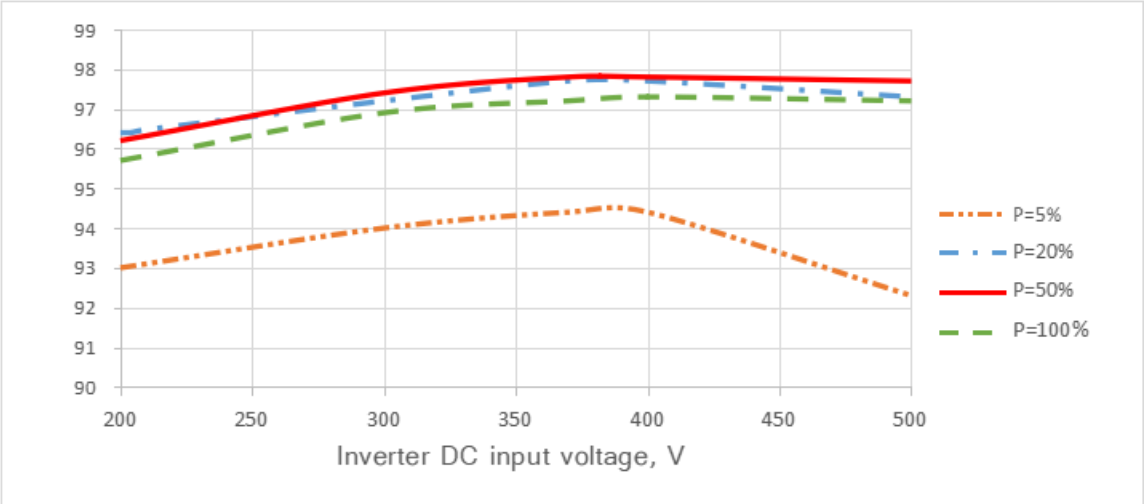
yo‘qotishlari minimal bo‘lgani va sovutish tizimi ularni samarali tarqatgani uchun qurilma qizib ketmaydi.



3.13-rasm. Bir fazali invertorning yuklama darajasiga bog‘liq samaradorligi.

Egri chiziqlarning umumiy xususiyatlari uch fazali invertorga o‘xshash, faqat bir fazali invertor uchun nominal DC kirish kuchlanishi 370 V ni tashkil qiladi (uch fazali uchun esa 650 V).

Bir fazali tizimlar uchun eng aniq va ko‘rgazmali misol — 5 kW quvvatli, ikkita MPPT boshqaruvchisiga ega tarmoq invertoriga asoslangan fotovoltaik stansiya bo‘lib, unda Vmp = 41,02 V parametrli 8 ta JKM630N-66HL4 moduli qo‘llaniladi. Bunday konfiguratsiyada ikkita ulash varianti mavjud:Variant №1 – har biri 4 ta moduldan iborat ikkita fotovoltaik string hosil qilib, Vmp ~200 V atrofida bo‘lgan ikkita stringni ikkita MPPT kirishiga ulash;



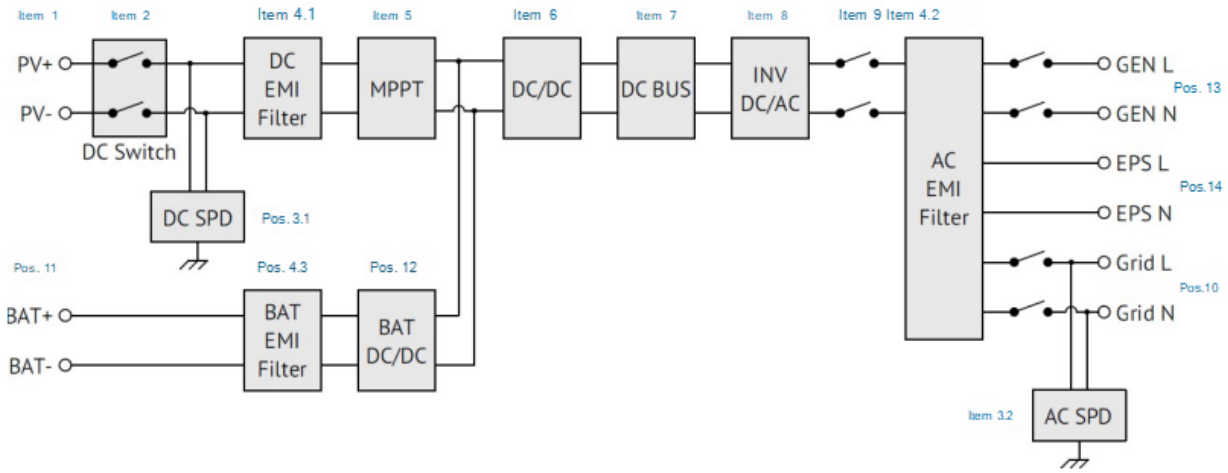
3.14-rasm. Bir fazali invertorning DC kirish kuchlanishiga bog‘liq.

Variant №2 – barcha 8 ta modulni ketma-ket ulab, Vmp ~400 V bo‘lgan bitta fotovoltaik string hosil qilib, uni bitta MPPT kirishiga ulash.Bozordagi ko‘pchilik bir fazali invertorlarda bitta MPPTning maksimal ruxsat etilgan quvvati barcha modullarni bitta MPPTga ulashga imkon beradi. Masalan, SUN2000-5KTL-L1 invertorning bitta MPPT uchun maksimal quvvati 6,6 kW ni tashkil qiladi.Shu sababli, boshqa shartlar teng bo‘lganda ikkinchi variant afzalroqdir, chunki fotovoltaik blokning kuchlanishi nominal qiymatga (ayniqsa yozda) ancha yaqinroq bo‘ladi. Bu birinchi variantga nisbatan qo‘shimcha ~1,5 % yo‘qotishlardan qochish imkonini beradi, nafaqat samaradorlikni oshiradi, balki invertorning issiqlik rejimiga ham ijobiy ta’sir ko‘rsatadi.

§3.5. Gibrid va avtonom invertorlar

Avval aytib o‘tganimizdek, gibrid invertorlar tarmoqqa ulanadigan (grid-tied) invertorlardan bir qancha qo‘shimcha funksiyalar bilan farq qiladi:

- tarmoqdan akkumulyatorlarni zaryad qilish uchun rektifikator;
- akkumulyatorlarni ulash uchun maxsus kirishlar (11-pozitsiya);
- tashqi tarmoq uzilib qolganda muhim yuklamalamalarni ta’minlash uchun favqulodda quvvat chiqishi(EPS — Emergency Power Supply) uchun alohida terminallar (14-pozitsiya);
- ba’zi modellarida dizel-generatorni (DG set) ulash uchun qo‘shimcha kirish (13-pozitsiya).



3.15-rasm. Bir fazali gibrid invertorning sxemasi.

Oldin aytilgan barcha qoidalar – fotovoltaik modullar parametrlari va MPPT boshqaruvchilarining mosligi, generatsiya rejimidagi samaradorlik va tarmoqqa quvvat uzatish masalalari – gibrid invertorlar uchun ham to‘liq dolzarbdir. Keyingi qismda faqat gibrid qurilmalarga xos bo‘lgan, oddiy tarmoq invertorlarida yo‘q parametrlarni ko‘rib chiqamiz.

Akkumulyatorlar bilan ishlash shartlari va cheklovlari:

- Akkumulyator turi – gibrid invertorlar qo‘rg‘oshin-kislotali (Lead-Acid), gel (GEL), AGM, litiy-ion va litiy-temir-fosfat ($LiFePO_4$) akkumulyatorlarni qo‘llab-quvvatlaydi. To‘g‘ri tur tanlash invertor modeli va tizim talablariga bog‘liq. Ayniqsa litiy akkumulyatorlar bilan ishlashda BMS bilan ma’lumot almashish protokollari (RS485, CAN) qo‘llab-quvvatlanishi juda muhim.- Ulanadigan akkumulyatorlar soni** – kichik quvvatli gibrid invertorlarda odatda bitta kirish bo‘ladi. Kuchliroq modellar ikkita mustaqil akkumulyator blokini ulash imkonini beradi.

- Ish kuchlanish diapazoni – past kuchlanishli (LV) 40-60 V va yuqori kuchlanishli (HV) 120-800 V tizimlar mavjud. Ulangan akkumulyatorning kuchlanishi qat’iy ravishda belgilangan diapazonga mos bo‘lishi kerak, aks holda ishga tushmaslik, beqarorlik yoki jihozning buzilishi yuz berishi mumkin.

- Maksimal zaryad/razryad toki – har bir kirish uchun alohida cheklov mavjud. Bu parametr akkumulyator turini tanlash, zaryad vaqtini hisoblash va kabel yuklamaini aniqlash uchun juda muhim. Ko‘p modellar dasturiy cheklovga ega bo‘lib, kichik sig‘imli akkumulyatorlardan boshlab, keyin sig‘imni oshirishga imkon beradi.

- Zaryad strategiyalari – quyoshdan ustunlik bilan zaryadlash, tarmoqdan zaryadlash, vaqt va quvvat bo‘yicha cheklash, SOC diapazonini belgilash, tarif bo‘yicha yoki jadval bo‘yicha ishlash kabi ko‘plab variantlar mavjud. Moslashuvchan sozlash tizim samaradorligini oshiradi.

- Qo‘llab-quvvatlanadigan aloqa interfeyslari – zamonaviy litiy akkumulyatorlar bilan to‘g‘ri ishlash uchun RS485, CAN yoki Modbus TCP kerak.

Bu orqali invertor BMSdan SOC, harorat, tok cheklovlari haqida ma’lumot oladi va energiya saqlash tizimi xavfsiz va optimal ishlaydi.

- Zaryad/razryad samaradorligi – odatda 90–96 %. Yo‘qotishlar konversiya, ichki qarshilik va issiqlik yo‘qotishlari tufayli yuzaga keladi.Hozirgi kunda avtonom (On-Off Grid) invertorlar tarmoqni qo‘llab-quvvatlashi mumkin, lekin gibriddan farqli o‘laroq, tarmoqqa quvvat uzatish (export) funksiyasi yo‘q.Gibrid ham, avtonom invertorlarda ham muhim yuklamalama EPS chiqishiga ulanadi. Tarmoq uzilib qolsa, invertor avtomatik ravishda zaxira rejimga o‘tadi va akkumulyator va/yoki quyosh panellaridan uzluksiz quvvat beradi.Ortiqcha yuklamalanishdan invertor o‘chib qolmasligi uchun barcha ulangan qurilmalarning umumiy quvvati EPS chiqishining texnik talablariga mos bo‘lishi kerak:

- Nominal ko‘rinadigan quvvat (VA);

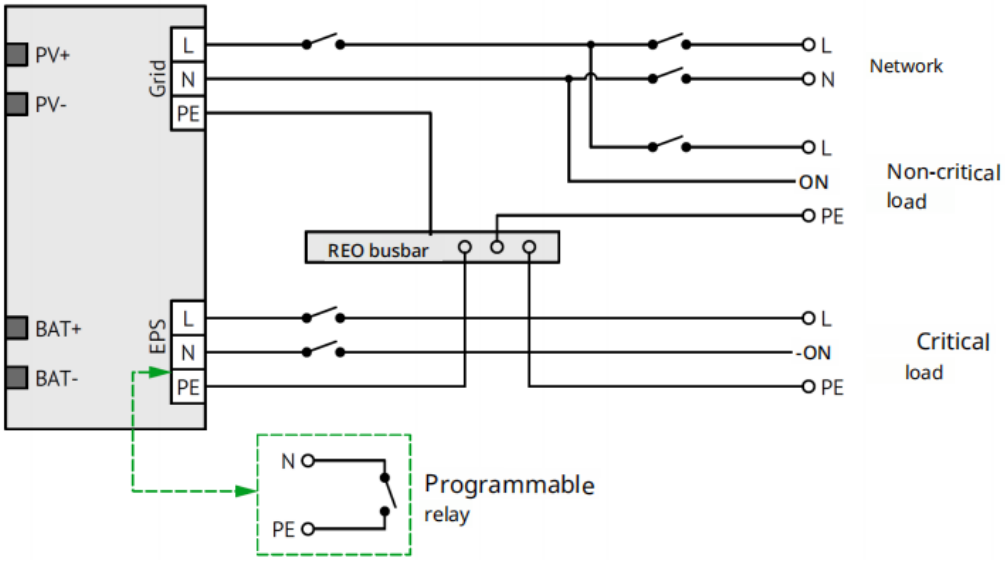
- Eng yuqori (pik) ko‘rinadigan quvvat.

Muhim! Gibrid va avtonom invertorlarning texnik hujjatlarida har doim ko‘rinadigan quvvat (VA) ko‘rsatiladi, aktiv quvvat (W) emas. Maishiy texnika quvvat koeffitsienti odatda 0,7–0,8 bo‘lgani uchun ruxsat etilgan Aktiv yuklamalama deklaratsiya qilingan EPS quvvatidan 20–30 % kam bo‘ladi.Pik yuklama odatda nominal ko‘rinadigan quvvat foizi sifatida va qancha vaqt (masalan, 10 soniya) davomida ushlab turilishi mumkinligi bilan beriladi.

Muhim! Kechasi, quyosh generatsiyasi bo‘lmaganda, ortiqcha yuklama butunlay akkumulyatordan olinadi. Tizimning barqaror ishlashi va akkumulyatorlarning yuklamaini kamaytirish uchun akkumulyator sig‘imi EPS nominal quvvatidan kamida 2 baravar katta bo‘lishi tavsiya etiladi.

Masalan, EPS chiqishi 5 kW bo‘lsa – minimal 10 kW·h, ideal holda 20 kW·h akkumulyator sig‘imi bo‘lishi kerak.Invertorning nominal quvvati cheklanmagan vaqt uchun berilgan bo‘lsa-da, uzoq muddatli og‘ir yuklamalamalarda (masalan, elektromobil zaryadi – bir necha soat) yuklama quvvati invertorning nominal quvvatining 60–70 % dan oshmasligi tavsiya etiladi. Bu jihozning ishonchli va uzoq muddatli ishlashini ta’minlaydi.Gibrid yoki avtonom stansiyani loyihalash va elektr montaj qilishda muhim yuklamaning neytral (nol) simini qolgan yuklamalamalardan

alohida ulash juda muhimdir. Amalda ko‘pincha umumiy shchitdan bitta kabel tarqatiladi, bu esa muhim va muhim bo‘lmagan yuklamalamalarning neytral simlarini alohida ulashni imkonsiz qiladi va butun yuklama bo‘yicha gibrid stansiya tanlashga majbur qiladi.Bu talab shundan kelib chiqadiki, avtonom rejimda tarmoq uzilganda invertor o‘zining izolyatsiya qilingan tizimini yaratadi – o‘z fazasi va neytrali bilan. EPS chiqishining neytralini shahar tarmog‘ining neytrali bilan birlashtirish tok sirkulyatsiyasiga, himoya qurilmalarning noto‘g‘ri ishlashiga, favqulodda o‘chirilishlarga va invertorning shikastlanishiga olib kelishi mumkin. Shuning uchun EPS chiqishiga ulanadigan barcha muhim yuklama liniyalarining faza va neytral simlari alohida o‘tkazilishi va tashqi tarmoqqa ulangan qolgan elektr o‘tkazgichlardan to‘liq izolyatsiya qilinishi shart (3.16-rasm).



3.16-rasm. Gibrid invertor mavjud bo‘lgandagi quvvat ta’minoti sxemasi.

Avtonom rejimda invertor o‘zining ichki quvvat ta’minoti tizimini hosil qiladi – “suzuvchi” neytral bilan, ya’ni nol o‘tkazgich er bilan qat’iy bog‘lanmagan holda. Bunday tizimda faza va nol o‘tkazgichlar er nisbatan, masalan, +110 V va –110 V potentsialga ega bo‘lishi mumkin (invertor konfiguratsiyasiga qarab). Bu nol potentsial nuqtasining “suzib yurishiga” olib keladi va ayrim qurilmalar, ayniqsa erlashga sezuvchan qurilmalar noto‘g‘ri ishlaydi yoki umuman ishga tushmaydi.Bu muammo ko‘pincha maishiy gaz qozonlarida yaqqol namoyon bo‘ladi – ularning aksariyati uchqunli ateşleme yoki olovni aniqlash tizimiga ega bo‘lib, nol

potentsialining holatiga juda sezuvchan. Qat’iy erlangan nol bo‘lmaganda bunday qurilmalar “yerlash xatosi” yoki “fazani teskari ulash”ni aniqlab, ishlashdan bosh tortadi.

Bu muammoni hal qilish uchun ba’zi invertor modellarida o‘rnatilgan N-G rele (Neutral-to-Ground relay)** – nol o‘tkazgichni erga ulovchi rele mavjud. U avtonom rejimda EPS chiqishining nol simini avtomatik ravishda erga ulaydi va sezuvchan qurilmalarning to‘g‘ri ishlashini ta’minlaydi.

Muhim! Bunday erlash tizimining to‘g‘ri ishlashi uchun invertorning erlash konturi (PE) “toza” bo‘lishi shart, ya’ni u tashqi (shahar) tarmoqning nol o‘tkazgichi bilan hech qanday elektr aloqada bo‘lmasligi kerak. Invertorning erlash tizimi bilan markaziy tarmoqning nol o‘tkazgichi o‘rtasida aloqa bo‘lsa, parazit toklar, turli erlash tizimlarining bir-biriga ulanishi yuzaga keladi – natijada invertor beqaror ishlaydi, himoya qurilmalari yolg‘on ishga tushadi va hatto jihozlar shikastlanishi mumkin.

§3.6. Invertorni o‘rnatish talablari va tavsiyalari

Tarmoqqa ulanadigan yoki gibrid invertorni o‘rnatishda eng muhim omillardan biri yong‘inga qarshi xavfsizlikni ta’minlash va issiqlikning samarali chiqarilishidir. Invertorni noto‘g‘ri joylashtirish uning qizib ketishiga, xizmat muddati qisqarishiga, favqulodda o‘chib qolishiga va ba’zi hollarda yong‘in xavfiga olib kelishi mumkin.

Invertor quyidagi talablar asosida o‘rnatilishi lozim:

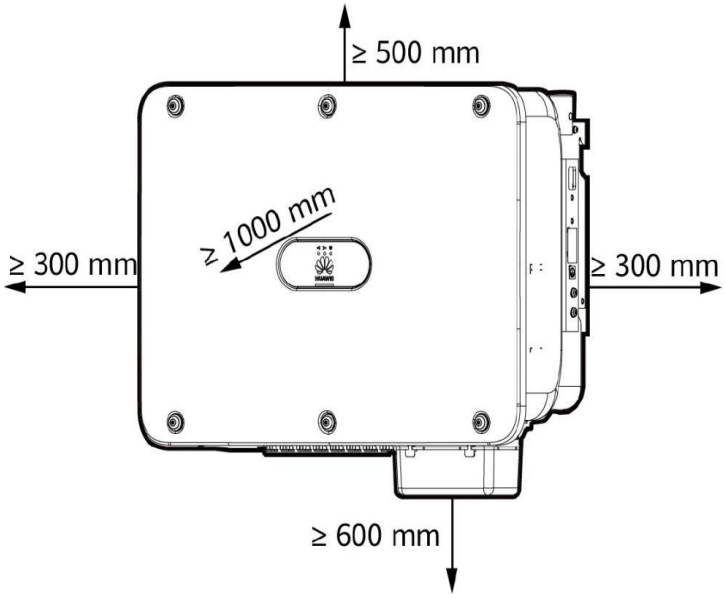
- yonmaydigan va issiqqa chidamli sirtga (masalan, beton, metall, olovga chidamli g‘isht);
- yonuvchan materiallardan uzoqroq (pichan, yog‘och, PVC izolatsiya, yoqilg‘i va h.k.);
- tabiiy yoki majburiy shamollatish mavjud bo‘lgan joyga.

Zamonaviy invertorlar amalda 96–97% samaradorlikka ega, ya’ni quyosh panellari tomonidan etkazib berilgan quvvatning 3–4% qismi issiqlikka aylanadi.

Masalan, 100 kW quvvatli invertor 3–4 kW issiqlik chiqaradi. Ushbu issiqlik samarali chiqarilmasa, qurilma komponentlari qizib ketadi va xizmat muddati qisqaradi.

O‘rnatish bo‘yicha asosiy tavsiyalar:

- Invertorni ishlab chiqaruvchi ko‘rsatmalarida keltirilganidek, faqat vertikal holatda o‘rnatish kerak. Bu sovutish tizimi va ventilyatsiya kanallarining to‘g‘ri ishlashini ta’minlaydi.
- Havoning erkin aylanishi va texnik xizmat ko‘rsatish uchun devorlar, shift va boshqa obyektlardan minimal masofalarni saqlang. 3.17-rasmda Huawei SUN2000-50KTL-M3 invertori uchun zarur masofalar ko‘rsatilgan.
- Invertorni yopiq va shamollatilmaydigan joylarga (chordoq, kichik omborxonalar va derazasi yo‘q xonalar) o‘rnatmang. Yozda bunday xonalarda harorat 60–70°C ga etishi mumkin, bu esa qizib ketishga qarshi himoyaning tez-tez ishga tushishiga va samaradorlikning pasayishiga olib keladi.



3.17-rasm. Huawei SUN2000-50KTL-M3 invertori atrofidagi minimal masofalar talablari.

Invertorni o‘rnatish uchun eng maqbul yechim — uni bino tashqi devoriga yoki quyosh panellari tagida joylashgan texnik konstruksiyaga o‘rnatishdir. Bunda u to‘g‘ridan-to‘g‘ri quyosh nurlaridan himoyalangan bo‘ladi. Bu ayniqsa 10:00 dan

15:00 gacha juda muhim, chunki shu vaqt oralig‘ida quyosh nurlanishi eng yuqori darajaga etadi, invertor maksimal quvvatda ishlaydi va issiqlik ajralishi ham eng yuqori bo‘ladi.Zarurat tug‘ilganda, invertorni to‘g‘ridan-to‘g‘ri quyosh nurlaridan himoya qilish uchun texnik soyabonlar, naveslar yoki panjarali soyali tuzilmalar o‘rnatilishi mumkin. Bunda shamollatish to‘liq ta’minlanishi shart.

Gibrid invertorlar esa batareya saqlanadigan joyga maksimal darajada yaqin joyda o‘rnatilishi zarur, chunki energiya saqlash tizimining to‘g‘ri ishlashi batareyalar bilan invertor orasidagi kabel uzunligi va kesimiga bevosita bog‘liq. Bu ayniqsa past kuchlanishli batareyalar (masalan, 48 V) bilan ishlaydigan invertorlar uchun juda muhim, chunki past kuchlanishda zanjirdagi tok juda yuqori bo‘ladi (100–200 A va undan ko‘proq). Har bir qo‘shimcha metr kabel sezilarli energiya yo‘qotishlari va kuchlanish tushishiga olib keladi; bu esa batareyaning zaryadlanish va razryadlanish rejimini buzadi.

Shu sababli, gibrid invertorlar batareyalar joylashgan xonaning o‘zida, quyidagi shartlarga rioya qilingan holda o‘rnatilishi kerak:

- xona shamollatiladigan bo‘lishi va yetarli havo almashinuvi ta’minlanishi;
- yozgi faslda qo‘shimcha issiqlik chiqarish choralarini ko‘rish;
- invertor va batareyalar uchun talab qilinadigan harorat diapazoni ta’minlanishi (odatda +15°C dan +30°C gacha).

Shuningdek, yong‘in xavfsizligi talablari ham inobatga olinishi lozim. Zarur hollarda tutun datchiklari va favqulodda shamollatish tizimlarini o‘rnatish tavsiya etiladi.

§3.7. Invertor arxitekturalari va himoya tizimlarining evolyutsiyasi

Quyosh panellari rivojlanishi bilan birga invertorlar ham faol modernizatsiya qilinmoqda, natijada fotoelektr stansiyalari arxitekturasi ham uzluksiz rivojlanib bormoqda.

Tarixan invertorlar cheklangan sondagi MPPT-kontrollerlarga ega bo‘lgan, ba’zi modellar esa quvvatidan qat’i nazar, butun invertor uchun atigi bitta MPPT

bilan ishlab chiqarilgan. O‘sha davrda quyosh panellari ham past quvvatli edi. Buning asosiy sababi maksimal quvvat nuqtasidagi tok (Imp) juda kichik bo‘lib, odatda 5–7 A diapazonda bo‘lgan. Hozirgi zamonaviy panellarda bu ko‘rsatkich 16–20 A va undan yuqori bo‘lishi mumkin. Shu sababli har bir modulning quvvati past bo‘lgan va stansiyaning belgilangan quvvatiga erishish uchun juda ko‘p PV-yacheykalar talab etilgan.

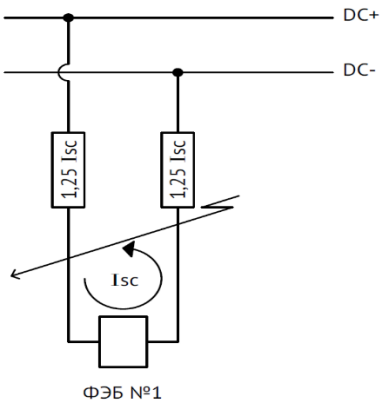
Ushbu omillar natijasida ko‘plab PV-qatorlar bitta MPPT-kontrollerga parallel ulangan. Bundan tashqari, avvalgi avlod invertorlari ichki himoya vositalari—masalan, kuchlanishdan himoya qurilmalari (SPD), yoyi aniqlash va o‘chirish qurilmalari (AFCI), aqlli steyk darajasida uzgichlar (SSLD) va nosozliklarni kuzatish hamda izolatsiya qilish imkonini beruvchi boshqa funksiyalar—bilan jihozlanmagan edi. Shu sababli ishonchli himoyani ta’minlash uchun alohida panel — **Kombiner box** — o‘rnatish doimo zarur bo‘lgan. U o‘z ichiga saqlagichlar va/yoki DC avtomat uzgichlari, shuningdek SPD qurilmalarini olgan. Bu panel DC tomondagi asosiy himoya elementi hisoblangan.

Invertor arxitekturasi o‘zgarishi umumiy xavfsizlik tizimiga qanday ta’sir qilganini tushunish uchun DC tomonidagi Saqlagich va/yoki avtomat uzgich vazifasini, shuningdek ularni qachon o‘rnatish texnik jihatdan asosli ekanini ko‘rib chiqish zarur.Avvalo qayd etish lozimki, DC tomonda o‘rnatilgan saqlagich quyosh modullarini himoya qilish uchun emas, balki teskari tok toki natijasida yuzaga kelishi mumkin bo‘lgan xavfli qizish va yong‘inni oldini olish uchun xizmat qiladi. Masalan, parallel ulangandan birining qisqa tutashuvi sodir bo‘lganda.

Agar MPPT shinasiga faqat bitta PV-qator (string) ulangan bo‘lsa va ushbu qator ichida qisqa tutashuv sodir bo‘lsa (3.18-rasmga qarang), qisqa tutashuv toki faqat shu PV-qator ichida — panellar orasida va qisqa tutashuv nuqtasi o‘rtasida — aylanishda davom etadi. Bunday holatda, invertorga ulangan liniyadagi saqlagichlar orqali tok o‘tmaydi va ular haddan tashqari katta tok bo‘lishiga qaramay ishga tushmaydi.

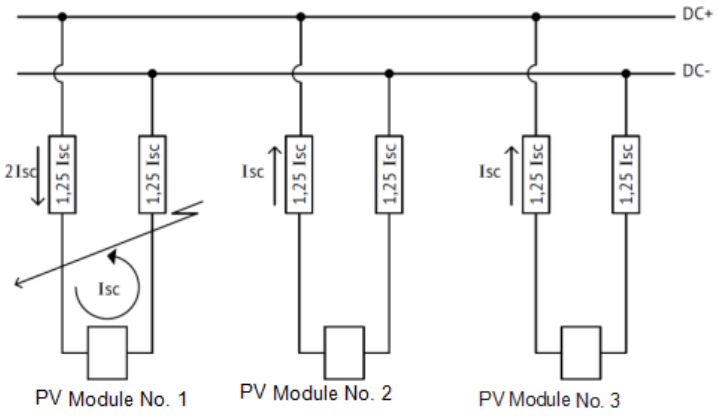
Agar MPPT shinasi bilan birga boshqa PV-modullar ham parallel ulangan bo‘lsa, ulardan biri ichida qisqa tutashuv yuzaga kelganda ishlayotgan boshqa

modullardan **teskari tok** paydo bo‘ladi. Ushbu PV-modullar energiya ishlab chiqarishni davom ettiradi va ularning toki qisqa tutashuv nuqtasiga qarab oqishni boshlaydi.



3.18-rasm. Bitta PV-qatorli tizimda o‘tkazgichlar orasidagi qisqa tutashuvda tok toki.

Bunday holatda, parallel ulangan PV-modullardan kelayotgan tok ularning zanjirlariga o‘rnatilgan Saqlagichlar orqali o‘tadi. Bu jarayon 5.19-rasmda ko‘rsatilgan.



3.19-rasm. Uchta PV modulga ega tizimda o‘tkazgichlar qisqa tutashuvida tok toki.

Muhim! Fotoelektr tizimning to‘g‘ri tok (DC) zanjirlarida Saqlagichning mavjudligi qisqa tutashuv nuqtasida quvvatning avtomatik uzilishini kafolatlamaydi**.** Bu o‘zgaruvchan tok (AC) tarmoqlarida bo‘lgani kabi ishlamaydi. AC tarmog‘ida qisqa tutashuv sodir bo‘lganda, manbadan nosozlik nuqtasiga qarab oqadigan tok keskin oshadi. Tokning bu keskin ortishi avtomat uzgichni ishga tushiradi va u zanjirni darhol uzib, quvvatni o‘chiradi.

Fotoelektr stansiyalarning DC zanjirlarida esa qisqa tutashuv toki odatda maksimal quvvat nuqtasidagi tokdan atigi 5–10% ga yuqori bo‘ladi. Shu sababli DC tomonga o‘rnatiladigan Saqlagichlar yuqori quyosh nurlanishi va yuqori harorat tufayli asossiz ishlamaslik uchun MPP tokidan kamida 25% yuqori nominal bilan tanlanadi. Bu shuni anglatadiki: hatto PV modulning chiqishiga yaqin joyga Saqlagich o‘rnatilgan taqdirda ham, qisqa tutashuv paytida tok Saqlagichni ishga tushirish uchun zarur bo‘lgan qiymatga etmaydi va yopiq konturda oqishda davom etadi. Bu esa nosozlik joyida lokal qizish va natijada yong‘in xavfini yuzaga keltiradi.Shunday qilib, invertorning DC tomoniga o‘rnatilgan Saqlagichlar orqali, parallel ulangan PV modullaridan teskari tok toki, ulardan birida qisqa tutashuv sodir bo‘lganda, davom etadi.Endi quyidagi savolni ko‘rib chiqamiz: parallel ulangan PV modullarining qaysi minimal sonidan boshlab Saqlagichning ishonchli ishlashi standart talablari va fizik jarayon talablariga to‘liq mos keladi?

Saqlagichning ishonchli ishlashi uchun, unda oqadigan teskari tok qisqa tutashuv vaqtida uning nominal qiymatidan kamida 1,25 baravar yuqori bo‘lishi kerak.

$$\boldsymbol{I_{\text{под}} \geq 1,25 \cdot I_{\text{saqlagich}}}$$

NEC 690.8 va IEC 62548 standartlariga ko‘ra, quyosh nurlanishining kuchayishi yoki harorat oshishi natijasida Saqlagichning ishga tushish chegarasi pasayib, noto‘g‘ri ishga tushish (false tripping) holatlarining oldini olish uchun, PV modulining qisqa tutashuv tokidan kamida 1,25 baravar yuqori nominal tokga ega Saqlagich tanlanishi lozim [34], [35].

$$\boldsymbol{I_{saqlagich} \geq 1,25 \cdot I_{qt}}$$

Shunday qilib, Saqlagichning ishonchli ishlashi uchun teskari tok PV modulining qisqa tutashuv tokidan kamida **1,56 baravar yuqori** bo‘lishi kerak.

$$\boldsymbol{I_{saqlagich} \geq 1,25 \cdot I_{qt} = 1.25 \cdot 1.25 \cdot I_{qt}}$$

Shunday qilib, NEC 690.8 va IEC 62548 talablariga muvofiq, agar parallel ulangan PV modullardan keladigan teskari tok qisqa tutashuv tokidan 1,56 baravar

yuqori bo‘lsa, Saqlagich o‘rnatish majburiy hisoblanadi. Chunki aynan shunday tok darajasida Saqlagichning ishonchli ishlash ehtimoli juda yuqori bo‘ladi — bu esa zanjirning uzilishini va shikastlangan PV modulga boshqa modullardan tok berilishining to‘xtatilishini ta’minlaydi.

Eslatma. Ko‘rib chiqilayotgan holatlarda parallel ulangan fotoelektr modullarning barchasi bir xil deb qabul qilingan. Bu esa to‘g‘ri loyihalangan tizimlar uchun odatiy hol sanaladi.Agar parallel ulanadigan PV modullar bir xil xususiyatlarga, bir xil qisqa tutashuv tokiga (I_{qt}) ega bo‘lsa va bir xil ish sharoitida ishlasa, uch yoki undan ortiq modul ulanganda teskari tok shikastlangan modulning I_{sc} qiymatidan ancha yuqori bo‘ladi.

Masalan, bitta modulda qisqa tutashuv yuz bersa, qolgan ikki moduldan keladigan teskari tok $2I_{sc}$ bo‘ladi, bu esa Saqlagichning ishonchli ishlashi uchun zarur bo‘lgan $1{,}56I_{sc}$ chegarasidan yuqori.Saqlagich aynan qisqa tutashuv bo‘lgan zanjirni uzadi va qolgan modullardan kelayotgan tokni cheklaydi. Biroq zarar ko‘rgan PV modulning o‘z ichki elementlaridan oqayotgan tok faol bo‘lib qolishini tushunish muhim.Shu sababli, invertorning avvalgi avlodlarida MPPT soni kam bo‘lgan va har bir MPPT ga 3–5 ta PV string ulanadigan tizimlarda Saqlagich o‘rnatish juda muhim rol o‘ynagan — u teskari tokni kamaytirgan va qo‘shimcha himoya ta’minlagan. Hozir esa zamonaviy invertorning MPPT soni yetarli va samarali. 20 kW dan yuqori quvvatdagi invertorning arxitekturasi odatda 10 kW quvvatga 1 ta MPPT tamoyiliga asoslangan bo‘lib, har bir MPPT da ikki dona PV kirish mavjud.

20 kW dan past quvvatlilarda esa kamida 2 ta mustaqil MPPT mavjud bo‘ladi.

Zamonaviy PV modullarning quvvati oshgani sababli, uch fazali invertorning taxminan 600 V ish kuchlanishli tizimlarida bitta PV string quvvati 10 kW yoki undan yuqori bo‘ladi.Bir fazali invertorning kuchlanishida (360–450 V) esa bitta string quvvati 5–6 kW bo‘ladi. Shu sababli, bugungi kunda bitta MPPT ga ikkidan ortiq string ulashga ehtiyoj qolmagan**.** Ba’zan, ayniqsa 630 W dan yuqori modullarda, hatto bitta string ulanadi. IEC 62109-1/2 standartlariga binoan, invertorning o‘zida teskari tokdan himoya tizimi mavjud. Masalan, Huawei

SUN2000 seriyali invertorning barcha MPPT lari o‘zaro to‘liq galvanik ajratilgan. Bir MPPT dagi PV stringda qisqa tutashuv bo‘lsa, boshqa MPPT larga ulangan modullardan teskari tok kelmaydi. Shu sababli, zamonaviy fotoelektr stansiyalarda Saqlagich avvalgidek asosiy himoya vazifasini bajarmaydi — chunki bitta MPPT ga bir yoki ikki string ulanadi xolos, teskari tok havfi juda past.

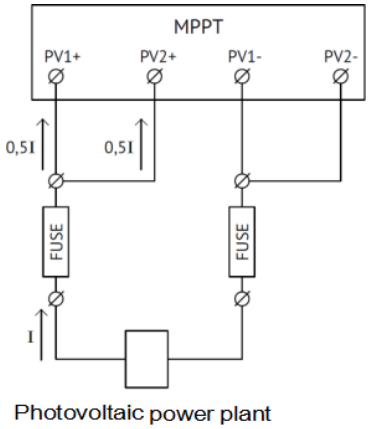
Shunga qaramay, Saqlagich-ajratgich yoki avtomat uzgich o‘rnatish maqsadga muvofiq, chunki:

- invertorning ichki nosozligi paytida tez uzish talab etiladi;
- texnik xizmat ko‘rsatishda (MC4 ni echmasdan) zanjirni xavfsiz sinovdan o‘tkazish mumkin.

Muhim. Saqlagich-ajratgichni **yuklamalama ostida uzish qat’iyan man etiladi** — bu hayot uchun xavfli.

Tunda texnik xizmat ko‘rsatish uchun: 1. Invertorning DC avtomatini o‘chirish. 2. So‘ng Saqlagichni uzish lozim.

Kunduzi esa invertorni dasturiy ta’minot orqali kutish (standby) holatiga o‘tkazish, DC avtomatini o‘chirish, kabelda tok yo‘qligini tester bilan tekshirish va shundan keyin saqlagichni uzish.



3.20-rasm. Yuqori tokga ega bitta PV modulni bitta MPPT ning ikki kirishiga ulash.

Shu bilan birga, ushbu tavsiyalar nisbatan yaqinda paydo bo‘lgan va hali to‘liq amaliy sinovdan o‘tkazilmagan; shuning uchun ularni qo‘llashda ehtiyotkorlik va uskunaning texnik mosligini baholash talab etiladi

4-BOB. FOTOELEKTRIK STANSIYALARINI LOYIHALASH

Ushbu bobda fotoelektrik (FE) stansiyalarning muhandislik amaliyotida geometriyaning asosiy tamoyillari va ularning stansiya samaradorligiga ta’siri yoritiladi. Fotoelektrik stansiyalarini loyihalashda amal qilinishi lozim bo‘lgan asosiy qoidalar va tavsiyalar, jumladan, modullarni joylashtirish, og‘ish burchaklarini belgilash hamda yo‘nalishni tanlash masalalari keltiriladi. Shuningdek, amaldagi real obyektlar asosida joriy etilgan texnik yyechimlar tahlil qilinadi.

Bundan tashqari, quyosh modullari va quvvat kabellarini tanlash, fotoelektrik stansiyaning elektr ta’minoti tizimi elementlari bilan o‘zaro ta’siri, shuningdek stansiyaning xavfsiz va ishonchli ishlashini ta’minlash uchun zarur bo‘lgan erga ulash hamda chaqmoqdan himoya qilish bo‘yicha qisqa sharh beriladi.

§4.1. Fotoelektrik stansiyalarining muhandislik amaliyotida asosiy geometriya

Zamonaviy Fotoelektrik stansiyalari maxsus dasturiy ta’minot va apparat majmualari yordamida modellashtirilishiga qaramay, asosiy geometrik tamoyillarni bilish hisob-kitoblarning to‘g‘riligini tekshirish hamda loyihaning dastlabki bosqichlarida taxminiy baholashlar o‘tkazish uchun zarur bo‘lgan muhim vosita hisoblanadi. Ushbu bo‘limda Fotoelektrik stansiyalarini loyihalash va ishga tushirish jarayonida qo‘llaniladigan geometrik bog‘lanishlar bayon etiladi.

1. To‘g‘ri to‘rtburchak yuzasini hisoblash. To‘g‘ri to‘rtburchakning yuzasi uning uzunligi va eni ko‘paytmasiga teng.

Masalan, JKM590N-72HL4-BDV fotoelektrik modulining eni 1134 mm**,** uzunligi esa 2278 mm ni tashkil etadi. Shuning uchun modul yuzasi quyidagicha aniqlanadi: $\mathbf{S_{PV\ model} = 1.134\ m \cdot 2.278\ m = 2.58\ m^2}$

Amaliyotda soxta belgilarga ega bo‘lgan va pasport ko‘rsatkichlari sun’iy ravishda oshirilgan qalbaki fotoelektrik modullarga duch kelish mumkin. Masalan, modulning haqiqiy quvvati 600 W deb e’lon qilingani holda aslida 500 W bo‘lishi ehtimoldan xoli emas. Shuning uchun muhandislar har doim mos modul sinfiga

tegishli bo‘lgan odatiy samaradorlik diapazoniga tayanishlari va zarurat tug‘ilganda modul yuzasi hamda samaradorligini hisobga olgan holda e’lon qilingan quvvatni tekshirib ko‘rishlari lozim.

Misol. JKM590N-72HL4-BDV fotoelektrik modulining standart sinov sharoitlarida (STC) e’lon qilingan maksimal quvvati 590 W bo‘lib, uning 22,84% samaradorligi ushbu sinf modullari uchun kutiladigan diapazonga mos keladi.

Keling, ushbu qiymat modulning geometrik yuzasiga mos kelishini tekshiramiz:

$$P_{mp} = S_{PVM} \cdot 1000\frac{W}{m^2} \cdot \eta = 1.134m \cdot 2.278m \cdot 1000\frac{W}{m^2} \cdot 0.2284 = 590\ W$$

Ko‘rib chiqilgan misolda modul yuzasi kutilgan samaradorlik bo‘yicha e’lon qilingan quvvatga mos keladi, bu esa pasport ma’lumotlarida ko‘rsatilgan nominal quvvatning to‘g‘riligini tasdiqlaydi. Albatta, bunday hisob-kitob modulning amalda aynan shu samaradorlikda ishlashini kafolatlamaydi; biroq u noto‘g‘ri ko‘rsatkichlarni tezda aniqlash va ba’zan etkazib berish jarayonida uchrab turadigan soxta belgili modullarni chiqarib tashlash imkonini beradi.

2. Aylana uzunligini hisoblash. Aylananing uzunligini hisoblashning klassik formulasi radiusdan foydalanadi; ammo amaliyotda ko‘pincha diametrdan foydalanish qulayroq bo‘ladi. Shu sababli formula ko‘pincha quyidagi ko‘rinishda ifodalanadi: $\boldsymbol{L = \pi \cdot D}$

bu yerda: L – aylana uzunligi, m; D – doiraning diametri, m; π ≈ 3,14 – Pi soni, matematik doimiy.

Amaliyotda ushbu formula, ayniqsa, kabel galtagida qolgan uzunlikni taxminiy baholashda foydalidir. Bunda aylana shaklidagi ilgak (halqa) diametri va qolgan o‘ramlar soni ma’lum bo‘lsa, kabelning taxminiy qoldiq uzunligini aniqlash mumkin bo‘ladi.

Misol. Drum №14 (4.1-rasmga qarang) ga o‘ralgan quvvat kabelining taxminiy uzunligini aniqlaymiz. Dastlabki ma’lumotlar quyidagicha:

- Bo‘sh barabaning yadro (vstavka) diametri: D_1 = 750 mm

- Kabel 3 qatorda**,** har birida 20 tadan o‘ram bilan joylashtirilgan (jami 60 o‘ram)
- O‘ramning tashqi diametri: $D_2 = 940$ mm

4.1-rasm. Kabel barabani.

Har bir qatlamning diametri taxminan kabel diametriga teng miqdorda ortib boradi. Qatlamlarning har birida o‘ramlar soni bir xil bo‘lganligi sababli, barcha qatlamlarning o‘rtacha diametri quyidagicha aniqlanadi

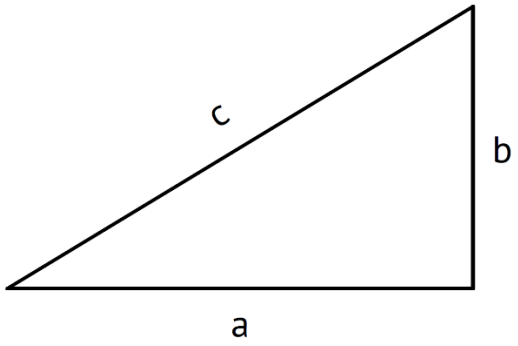
$$\boldsymbol{D_{avg} = \frac{750 + 940}{2} = 845\ mm = 0,845\ m}$$

Keling, barabandagi kabel uzunligini hisoblaymiz:

$$\boldsymbol{L = \pi \cdot D_{avg} \cdot n \approx 3.14 \cdot 0.845m \cdot 60 \approx 159\ m}$$

Shunday qilib, barabandagi kabelning taxminiy qoldiq uzunligi 159 metrga teng.

3. **Pifagor teoremasi.** Pifagor teoremasi – geometriyaning asosiy teoremalardan biri bo‘lib, o‘ng burchakli uchburchakka tatbiq etiladi. Ushbu teorema shuni bildiradiki, gipotenuzaning (4.2-rasmdagi «c» tomoni) kvadrati katetlarning (4.2-rasmdagi «a» va «b» tomonlari) kvadratlari yig‘indisiga teng bo‘ladi va matematik ifodasi quyidagicha: $\boldsymbol{c^2 = a^2 + b^2}$

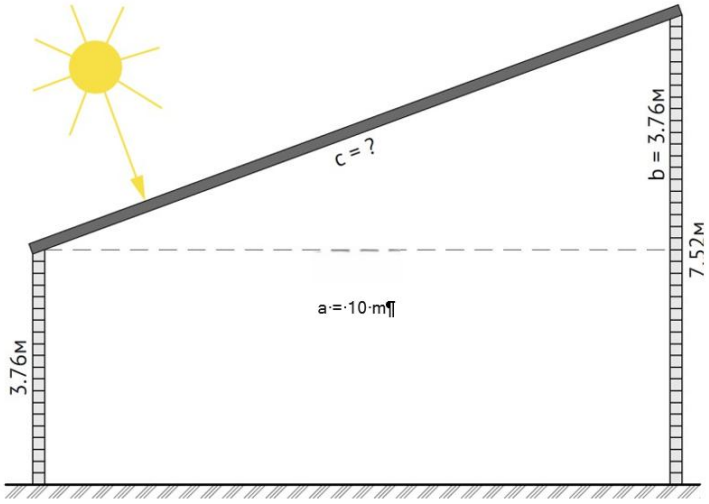


4.2-rasm. Pifagor teoremasi.

Pifagor teoremasi amaliyotda keng qo‘llaniladi, ayniqsa fotoelektrik stansiyasini o‘rnatish uchun mo‘ljallangan maydonning muhandislik geodezik tekshiruvi paytida. U masofalar, balandliklar va diagonallar uzunligini tez va aniq aniqlashni osonlashtiradi, shu bilan maydonni belgilash, kabel tortish va uskunalarni joylashtirish jarayonlarini soddalashtiradi.

Fotoelektrik stansiyasidagi fotoelektrik modullar gorizontal tekislikka nisbatan og‘ish burchagida o‘rnatiladi. Ushbu holatda, «a» katet gorizontal komponentga, «b» katet esa egilgan o‘rnatishning vertikal komponentiga mos keladi. Shu sababli, ushbu katetlar mos ravishda gorizontal va vertikal komponentlar deb ham ataladi.

Misol. Keling, Pifagor teoremasining amaliy qo‘llanilishiga real misolni ko‘rib chiqamiz. 4.3-rasm janubga qaragan ishlab chiqarish ustaxonasining yagona qiya tomining kesimini ko‘rsatadi. Binoning perimetri bo‘ylab shlak blok devorlari mavjud bo‘lib, ularning orasiga profillangan metall tomni ushlab turuvchi metall fermalar o‘rnatilgan.



4.3-rasm. Pifagor teoremasining yagona qiya tomga amaliy qo‘llanilishi.

Amaliyotda, muhandislik geodezik tekshiruv paytida, ba’zan tomga chiqish imkoni bo‘lmaydi, masalan, zinapoya yoki tomga kirish yo‘qligi sababli; ammo tomning egilishi bo‘yicha o‘rnatiladigan fotoelektrik modullar sonini taxmin qilish

zarur bo‘ladi. Bunday hollarda asosiy parametr – bu devorlar orasidagi egilgan tom yuzasining haqiqiy ishchi uzunligi.

Asosiy geometriya, xususan, Pifagor teoremasini bilish, tomga chiqmasdan egilgan tom uzunligini tez va xavfsiz hisoblash imkonini beradi. Buning uchun bitta shlak blok (yoki g‘isht) balandligini o‘lchash va tomning pastki hamda yuqori qirralarida nechta shlak blok (yoki g‘isht) joylashganini sanash kerak. Faraz qilaylik, bitta shlak blok balandligi **188 mm**. Pastki devorda **20** shlak blok, yuqori devorda esa **40** shlak blok joylashtirilgan (4.3-rasm). Bu devorlar orasidagi balandlik farqi **20 shlak blok** ekanligini bildiradi, ya’ni **(40−20)·0.188 = 3.76 m.** Shunday qilib, tomning kesimida uchburchakning vertikal kateti **3,760 m** ni tashkil etadi.

Keyingi qadam – devorlar orasidagi gorizontal masofani o‘lchash; faraz qilaylik, u **10 metr**, bu esa uchburchakning ikkinchi kateti (gorizontal) bo‘ladi.
Pifagor teoremasini qo‘llagan holda, fotoelektrik modullarni o‘rnatish uchun mo‘ljallangan tom egilishi uzunligini (uchburchakning gipotenuzasi) hisoblaymiz:

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{3.760^2 + 10^2} \approx 10.68\ m$$

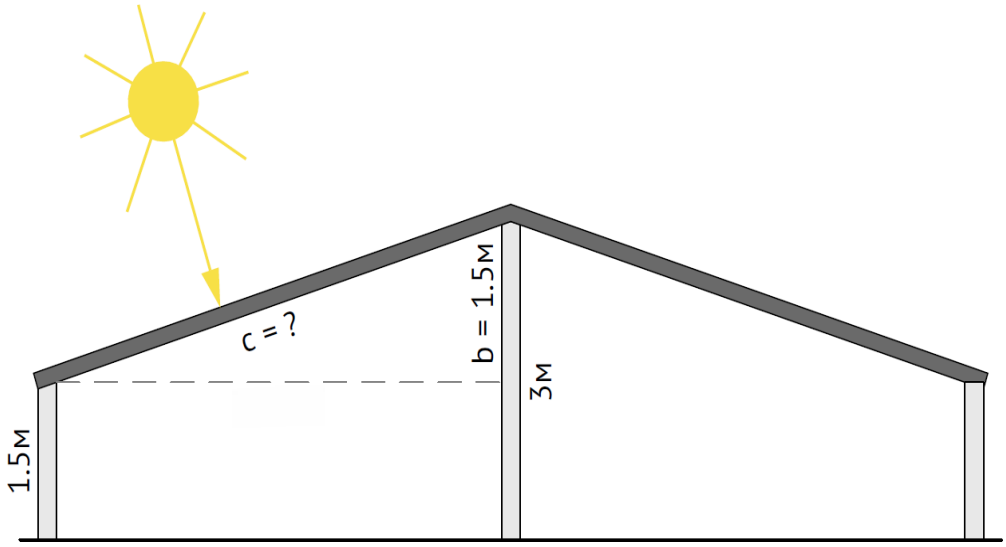
Shunday qilib, egilgan tom yuzasining uzunligi taxminan 10,68 metr ga teng bo‘lib, bu fotoelektrik modullarni joylashtirish mumkin bo‘lgan maydonni taxminiy aniqlash imkonini beradi.

Tomning gorizontal tekislikka nisbatan egilish burchagi Pifagor teoremasi bilan birlashtirilgan trigonometrik munosabatlar yordamida hisoblanishi mumkin. Ushbu usul keyingi bo‘limda batafsil muhokama qilinadi.

Shuningdek, mansardaga kirish imkoniyati mavjud bo‘lsa, ammo tomga chiqib egilish uzunligini to‘g‘ridan-to‘g‘ri o‘lchash imkoni bo‘lmasa, u bilvosita aniqlanishi mumkin. Buning uchun mansarda pollaridan tomning eng past nuqtasigacha bo‘lgan balandlik (vertikal masofa) o‘lchanadi, shuningdek, alohida ravishda chiziq cho‘qqisigacha bo‘lgan balandlik ham o‘lchanadi. Ushbu ikki qiymatning farqi vertikal katetni beradi. Past nuqta va cho‘qqi orasidagi mos keluvchi gorizontal masofa ikkinchi katetni belgilaydi.

Ushbu ikkita qiymat o‘ng burchakli uchburchakni hosil qiladi, va tom egilishi uzunligi (gipotenuza «c») Pifagor teoremasi yordamida osonlik bilan hisoblanadi (4.4-rasm); ko‘rib chiqilgan misolda u quyidagicha bo‘ladi:

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{5^2 + 1.5^2} \approx 5.22m$$



4.4-rasm. Chiziqli tom uchun Pifagor teoremasining amaliy qo‘llanilishi.

1. Asosiy trigonometrik formulalar.

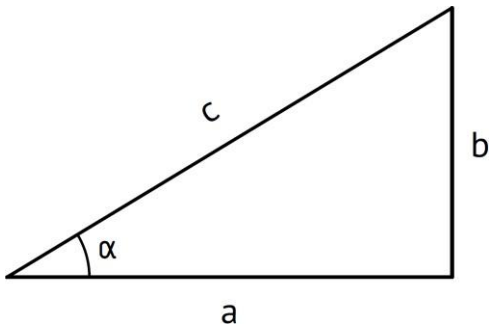
Trigonometria – bu uchburchaklarning tomonlari va burchaklari, shuningdek, sinus, kosinus va tangens kabi trigonometrik funksiyalar o‘rtasidagi munosabatlarni o‘rganadigan matematika bo‘limidir.

Fotoelektrik stansiyalarini loyihalashda trigonometraning ahamiyati katta. Uni qo‘llash orqali muhandis quyidagilarni amalga oshirishi mumkin:

- Belgilangan og‘ish burchagi va modul uzunligiga asoslanib, orqa tayanchlarning balandligini aniqlash;
- Quyosh ko‘tarilish burchagi va obyekt balandligini hisobga olgan holda soyalar uzunligini hisoblash;
- PV modul qatorlari orasidagi minimal ruxsat etilgan masofani aniqlash, shunda qatorlar o‘z-o‘zini soya qilmasligi ta’minlanadi;
- Soyali obyektlardan (binolar, to‘siqlar, daraxtlar va boshqalar) zarur masofani hisoblash;

- Quyosh izlovchi qurilma qurish yoki panellarni belgilangan burchakka yo‘naltirish.

Shunday qilib, trigonometrik bilimlarning asosiy tushunchalari Fotoelektrik stansiyalarini loyihalash va o‘rnatish jarayonidagi muhandislik amaliyotining ajralmas qismi hisoblanadi.



4.5-rasm. Gorizontal yuzaga o‘rnatilgan fotoelektrik modulning og‘ish burchagini aniqlash.

Ushbu bo‘limda fotoelektrik stansiyalarini loyihalash va tahlil qilishda muhandislik hisob-kitoblarida qo‘llaniladigan, 4.5-rasmda ko‘rsatilgan o‘ng burchakli uchburchak bilan ifodalangan asosiy trigonometrik munosabatlar taqdim etiladi:

$$\boldsymbol{sina = b/c} \qquad \boldsymbol{cosa = a/c} \qquad \boldsymbol{tga = b/a} \qquad \boldsymbol{ctga = a/b}$$

bu yerda: sina, cosa, tga va ctga – mos ravishda burchak α ning sinus, kosinus, tangens va kotangens funksiyalari.

Yuqoridagi trigonometrik munosabatlar, egilish burchagi va uchburchakning bir tomonining uzunligi ma’lum bo‘lganda, o‘ng burchakli uchburchakning boshqa tomonini hisoblash imkonini beradi. Biroq amaliyotda tez-tez teskari masala yuzaga keladi — ya’ni ma’lum tomon uzunliklaridan egilish burchagini aniqlash. Bunday hollarda teskari trigonometrik funksiyalardan foydalaniladi:

$$\boldsymbol{a = arcsin(b/c)};\ \ \boldsymbol{a = arccos(a/c)};\ \ \boldsymbol{a = arctg(b/a)};\ \ \boldsymbol{a = arcctg(a/b)}$$

Eslatma. Trigonometrik funksiyalarni hisoblashda kalkulyator yoki kompyuter dasturidan foydalanilganda, burchak o‘lchov birligini — gradus yoki radianlarni — adashtirmaslik juda muhimdir.

Bitta radian π soniga teng bo‘lib, u 180 gradus ga tengdir. Dastur yoki kalkulyator sozlamalarida birlikning to‘g‘ri tanlanganligini tekshirish uchun tanilgan qiymatdan foydalanish tavsiya etiladi, masalan: sin(30°)=0.5

Agar natija boshqacha chiqsa, demak argument gradus o‘rniga radianlarda berilgan bo‘lishi mumkin (yoki aksincha).

Misol. Keling, 4.3-rasmda ko‘rsatilgan yagona qiya tomning og‘ish burchagini aniqlaylik. Buning uchun tom egilishi uzunligini (c – gipotenuza) hisoblash shart emas.

Tomning gorizontal tekislikka nisbatan egilish burchagi quyidagicha hisoblanadi:

$$\boldsymbol{a = arctg(b/a) = arctg(3.76/10) \approx 20.6\ degrees}$$

Keling, 4.4-rasmda ko‘rsatilgan tomning egilish burchagini aniqlaylik:

$$\boldsymbol{a = arctg(b/a) = arctg(1.5/5) \approx 16.7\ degrees}$$

Misol. Gorizontal yuzaga 30° burchak bilan o‘rnatilgan, uzunligi 2278 mm bo‘lgan modullar qatori orasidagi soyani oldini olish uchun zarur bo‘lgan minimal masofani, quyosh ko‘tarilish burchagi 20° da hisoblang (rasmga qarang).

Birinchidan, gorizontal yuzaga 30° burchak bilan o‘rnatilgan 2278 mm uzunlikdagi modulning orqa tayanchining balandligi b ni aniqlaymiz.

$$\mathrm{b} = \mathrm{L} \cdot \sin(30°) = 2278 \cdot 0.5 = 1139\ \mathrm{mm}$$

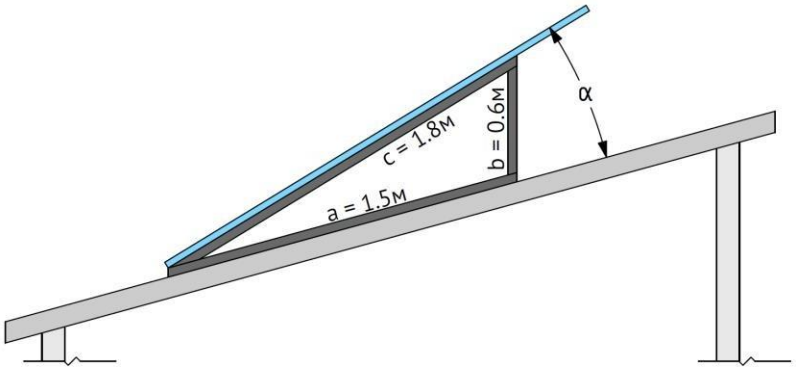
Keyingi qadam – modullar qatori orasidagi masofa X ni aniqlash:

$$\mathrm{X} = \mathrm{b} \cdot \mathrm{ctg}(20°) = 1139 \cdot 2{,}747 = 3128\ \mathrm{mm}$$

Shunday qilib, ko‘rib chiqilgan holatda, quyosh ko‘tarilish burchagi 20° dan yuqori bo‘lganda modullarning soyalanmasligi uchun qatorlar orasidagi masofa kamida 3128 mm bo‘lishi kerak. Biroq amaliyotda cheklangan joy tufayli har doim ham bunday masofani saqlash mumkin emas. Shu sababli, fotoelektrik modullarning og‘ish burchagi ko‘pincha qishki soyani oldini olish uchun kamaytiriladi, chunki bu

odatda optimal burchakdan chekinishdan ko‘ra PV stansiyaning elektr energiyasi ishlab chiqarishiga ko‘proq ta’sir qiladi.

5. Uchburchakning uch tomonining uzunliklariga asoslanib og‘ish burchagini hisoblash. Ba’zan amaliyotda, burchak o‘lchagich vositasi mavjud bo‘lmagan hollarda, uchburchakli konstruksiyaning og‘ish burchagini aniqlash zarur bo‘ladi. Bunday holat, masalan, egilgan tomlarga tayanch konstruksiyalarini o‘rnatishda, to‘g‘ri burchakli bo‘lmagan, ixtiyoriy uchburchak hosil bo‘lganda uchraydi.



$$cosa = \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2 \cdot a \cdot c}$$

4.6-rasm. Tayanch konstruksiyaning tomga nisbatan og‘ish burchagini aniqlash.

Misol. 4.6-rasmda ko‘rsatilgan uchburchakli konstruksiyaning tom yuzasiga nisbatan og‘ish burchagini aniqlang.

$$a = arccos\left(\frac{a^2 + c^2 - b^2}{2 \cdot a \cdot c}\right) = arccos\left(\frac{1.5^2 + 1.8^2 - 0.6^2}{2 \cdot 1.5 \cdot 1.8}\right) \approx 18.2$$

§4.2. Fotoelektrik stansiyalarning klassifikatsiyasi

Fotoelektrik stansiyalarni loyihalash bilan bog‘liq masalalarni ko‘rib chiqishdan oldin, ularning klassifikatsiyasini taqdim etish maqsadga muvofiqdir. Garchi bu bo‘linish biroz an’anaviy bo‘lsa-da, u tipik konfiguratsiyalarni aniqlash va tizim ishlab chiqilayotgan maqsadli guruhni aniqroq belgilash imkonini beradi.

Fotoelektrik stansiyalarini ulanish arxitekturasi va invertor turiga qarab klassifikatsiya qilish:

- **Grid On (yoki Grid Tied) fotoelektrik stansiyasi** – markazlashtirilgan elektr ta’minoti tizimi (EPS) bilan integratsiyalashgan fotoelektrik stansiyasidir. Bunday stansiya faqat tarmoqdan olingan referens kuchlanish mavjud bo‘lganda ishlaydi, ya’ni markazlashtirilgan quvvat stansiyasida kuchlanish mavjud bo‘lganda. Gridga ulangan fotoelektrik stansiyaning asosiy maqsadlari: tashqi tarmoqdan elektr energiyasi iste’molini kamaytirish va/yoki ortiqcha elektr energiyasini shartnoma asosida yoki rag‘batlantirish dasturlari (masalan, "yashil tarif") doirasida tarmoqqa etkazishdir.

Gridga ulangan fotoelektrik stansiyada faqat referens kuchlanish mavjud bo‘lganda ishlashga mo‘ljallangan **grid invertor** ishlatiladi. Tarmoqda kuchlanish yo‘qolsa yoki uning parametrlari ruxsat etilgan chegaralardan oshsa, invertor avtomatik ravishda ishlab chiqarishni to‘xtatadi.

Eslatma. Gridga ulangan invertor uchun referens kuchlanish sifatida faqat markazlashtirilgan quvvat stansiyasidan olinadigan kuchlanish emas, balki dizel generator kabi alternativ manbalar ham ishlatilishi mumkin. Bunday holatda gridga ulangan invertor ishlashni davom ettirishi mumkin; ammo, mustaqil quvvat tizimi sharoitida kuchlanish va chastota parametrlarini barqaror saqlash hamda quvvat balansini ta’minlash uchun qo‘shimcha choralar ko‘rilishi zarur (batafsil ma’lumotni 4.6-bo‘limda topish mumkin).

- **Gibrid fotoelektrik stansiyasi (Hybrid)** – markazlashtirilgan stansiyasi bilan integratsiyalashgan fotoelektrik stansiyasi bo‘lib, gridga ulangan fotoelektrik stansiyadan farqli o‘laroq, u tarmoqdagi referens kuchlanish mavjud bo‘lmagan holatda ham ishlay oladi. Markazlashtirilgan stansiyasi o‘chirilgan taqdirda, gibrid tizim EPS (Emergency Power Supply) chiqishiga ulangan kritik yuklamani uzluksiz quvvat bilan ta’minlaydi. Bu quvvat fotoelektrik modullar va batareyalar orqali ishlab chiqariladi, ular energiyani saqlash, quvvat balansini ta’minlash va tizim parametrlarini barqarorlashtirish vazifalarini bajaradi. Bunday stansiyada gibrid invertor ishlatiladi.

Zamonaviy gibrid invertorlarning aksariyatida dizel generator to‘plamini (DHZ) ulash uchun maxsus terminal mavjud bo‘lib, shuningdek, markazlashtirilgan quvvat stansiyasidan quvvat bo‘lmagan hollarda batareya zaryadi belgilangan darajadan pastga tushganda DHZ ni avtomatik ishga tushirish uchun rele chiqishi ham mavjud.

- **Avtonom Fotoelektrik stansiyasi (Off-Grid)** — klassik ma’noda — markazlashtirilgan quvvat stansiyasiga ulanmagan va tashqi quvvat manbalaridan to‘liq mustaqil fotoelektrik stansiya hisoblanadi. Iste’molchilarga quvvat faqat fotoelektrik modullar va batareyalar orqali ta’minlanadi; ular energiyani saqlab, quyosh radiatsiyasi bo‘lmagan davrlarda etkazib beradi. Shu bilan birga, zamonaviy mustaqil invertorlar ko‘pincha batareyani zaryadlash uchun tashqi tarmoqqa yoki dizel generator blokiga (DGU) ulanish imkonini beradi, lekin energiyaning tarmoqqa qaytarilishini ta’minlamaydi. Bunday qurilmalar odatda **on/off-grid invertorlar** deb ataladi, chunki ular to‘liq avtonom rejimda ham, faqat zaxira quvvat manbai sifatida tarmoq bilan ishlash imkonini beradi. Tashqi manbadan zaryadlash funksiyasining mavjudligi batareya sig‘imini kamaytirish imkonini beradi, chunki u uzoq davom etadigan bulutli ob-havo yoki iste’mol oshishi davrida qayta zaryadlashni ta’minlaydi.

Fazalar soniga ko‘ra klassifikatsiya:

- **Bir fazali** – uy-joylar va bir fazali kirish va bir fazali elektr hisoblagichga ega kichik obyektlarda ishlatiladi. Odatiy holda quvvat ko‘rsatkichlari 5–10 kWgacha o‘rnatiladi. O‘zgarmas tok tomonidagi kuchlanish **220 V** ni tashkil etadi. Bunday tizimlarda **bir fazali invertor** qo‘llaniladi.
- **Uch fazali tizim** – tijorat, ma’muriy va sanoat obyektlarida qo‘llaniladi, odatda o‘rnatilgan quvvat **10 kW va undan yuqori** bo‘ladi. O‘zgarmas tok tomonidagi kuchlanish **380 V** ni tashkil etadi. Bu fazalar bo‘yicha yuklamani teng taqsimlashni ta’minlaydi va uch fazali quvvat manbai mavjud bo‘lgan obyektlarda ishlatiladi. Shuningdek, uch fazali kirish va uch fazali elektr hisoblagichi bilan jihozlangan xususiy uy-joylarda ham qo‘llaniladi. Bunday tizimlarda **uch fazali invertor** ishlatiladi.

Fotoelektrik stansiyalarini qo‘llanilish hajmi bo‘yicha klassifikatsiyasi:

- **Shaxsiy sektor (Uy-joy darajasi)** – odatda bir fazali tizimlarda quvvat koʻrsatkichlari **6 kWgacha**, uch fazali tizimlarda esa **20 kWgacha** boʻlgan fotoelektrik tizimlarni oʻz ichiga oladi. Ba'zi hollarda quvvat koʻrsatkichlari bir fazali tizimlarda **10 kWgacha**, uch fazali tizimlarda esa **50 kWgacha** oshirilishi mumkin; ammo bunday oʻrnatish mavjud tarmoq liniyasining cheklangan quvvat sharoitida lokal tarqatish tarmogʻiga ortiqcha yuklama tushirish xavfini oshiradi. Bunday hollarda tarmoq operatori bilan alohida texnik muvofiqlashtirish talab qilinadi va zarur boʻlsa, transformator podstansiyasiga maxsus ta'minot kabeli oʻrnatilishi kerak.
- **Tijorat va sanoat sektori (C&I — Commercial & Industrial)** – tijorat binolari, omborlar, ishlab chiqarish obyektlari va boshqa infratuzilma saytlariga oʻrnatilgan uch fazali Fotoelektrik stansiyalarini oʻz ichiga oladi. Oʻrnatilgan quvvat odatda 20–1000 kW oraligʻida boʻladi. Bunday tizimlar odatda obyektning kirish-taqsimot qurilmasi (IDD) ga yoki transformator podstansiyasining past kuchlanishli (0,4 kV) busbarlariga bevosita ulanadi.
- **Sanoat sektori (Utility-Scale)** – quvvat xaridi shartnomalari yoki ulgurji elektr bozori doirasida tarmoqqa elektr ta'minoti uchun moʻljallangan 1 MW va undan yuqori quvvatli katta gridga ulangan Fotoelektrik stansiyalarini oʻz ichiga oladi. Bunday obyektlar toʻliq ishlaydigan elektr ishlab chiqarish birliklari sifatida qaraladi. Utility-Scale tizimlarda ishlatiladigan invertorlar odatda **Oʻrta Kuchlanishli (Medium Voltage) invertorlar** kategoriyasiga kiradi, AC tomonidagi chiqish kuchlanishi 0,8 kV ni tashkil qiladi. Quvvat tizimiga integratsiya qilish uchun step-up transformatorlar ishlatiladi, ular invertor chiqish kuchlanishini obyekt kategoriyasi va tashqi elektr ta'minoti sxemasiga qarab 10 kV, 35 kV yoki 110 kV ga aylantiradi. Bunday fotoelektrik stansiyalarning ulanish nuqtasi odatda oʻrta yoki yuqori kuchlanish tomonida joylashadi va quvvat tizimi parametrlarini hisobga olgan holda maxsus texnologik ulanish loyihasini ishlab chiqishni talab qiladi.

Gibrid Fotoelektrik stansiyalarini batareya turiga koʻra klassifikatsiyasi:

- **Past kuchlanishli batareyali gibrid tizimlar (LV — Low Voltage)** – odatda batareya ishlash kuchlanishi 40–60 V oralig‘ida bo‘ladi. Bu yechimlar asosan shaxsiy sektor uchun mo‘ljallangan bir fazali gibrid fotoelektrik stansiyalarda qo‘llaniladi. O‘rnatilgan quvvat odatda 12 kWgacha, ammo bozorda 16 kWgacha quvvatga ega invertor modellar ham mavjud.

Uch fazali gibrid invertorlar, past kuchlanishli batareya banklarini qo‘llab-quvvatlaydi va ularni quvvat ko‘rsatkichlari **20 kWgacha** bo‘lgan tizimlarda ishlatish mumkin, bu past kuchlanishli arxitekturani nafaqat uy-joylarda, balki kichik tijorat yoki shaxsiy uch fazali o‘rnatishlarda ham qo‘llash imkonini beradi. Ammo quvvat oshishi bilan batareya tomonidagi tok sezilarli darajada oshadi, bu esa yo‘qotishlarni ko‘paytiradi, katta kesimli kabellar talabini keltirib chiqaradi va umumiy samaradorlikni kamaytiradi. Shu sababli, **10–15 kWdan yuqori o‘rnatilgan quvvatli tizimlarda** odatda yuqori kuchlanishli (HV) batareya arxitekturasi ishlatiladi, bu invertorning barqaror va samarali ishlashini past toklarda ta’minlaydi.

- **Yuoqori kuchlanishli batareyali gibrid tizimlar (HV — High Voltage)** – batareyalar nominal kuchlanishi odatda **120 V dan 600 V va undan yuqori** bo‘ladi. Bu tizimlar asosan o‘rta va yuqori quvvatli uch fazali gibrid fotoelektrik stansiyalarda, ya’ni **10 kW va undan yuqori** quvvatlar uchun ishlatiladi. Batareya tomonidagi yuqori kuchlanishli arxitektura toklarni kamaytiradi, quvvat yo‘qotilishini pasaytiradi, kichik kesimli simlardan foydalanish imkonini beradi va issiqlik va o‘tkazish yechimlarini soddalashtiradi, bu ayniqsa kuchli invertorlar uchun muhimdir. HV gibrid tizimlar shaxsiy uch fazali obyektlar va kichik tijorat o‘rnatishlarda keng qo‘llaniladi.

- **Muhim!** Past kuchlanishli (LV) tizimlar uchun mo‘ljallangan batareya banklari **hech qachon** yuqori kuchlanishli (HV) arxitekturaga ulanishi mumkin emas. Bunday batareyalarning ishlash kuchlanishi, izolyatsiya sinfi va ichki kommutatsiya bo‘yicha dizayn cheklovlari mavjud. Past kuchlanishli batareyani yuqori kuchlanishli invertorga ulash yoki HV arxitekturasi ichida ishlatishga urinish izolyatsiya buzilishi, ortiqcha qizish, komponentlarning ishdan chiqishi va natijada

olov yoki yong‘inga olib kelishi mumkin. Shu sababli, gibrid tizimlarni loyihalashda invertor va batareya tizimi orasidagi kuchlanish mosligini ishlab chiqaruvchilarning texnik hujjatlari va amal qiluvchi xavfsizlik qoidalariga muvofiq ta’minlash muhimdir.

§4.3. Fotoelektrik stansiyalarini loyihalashning asosiy prinsiplari va ko‘rsatmalari

Avvalgi bo‘limda Fotoelektrik stansiyalarining klassifikatsiyasi keltirilgan edi. Umuman olganda, yuqorida sanab o‘tilgan barcha tizim turlari uchun **fotoelektrik massivlarni shakllantirish va ularni invertorga ulash prinsiplari o‘xshashdir**, chunki ular yagona elektrotexnika talablariga va standartlariga amal qiladi.

Gibrid va avtonom fotoelektrik stansiyalar bilan gridga ulangan stansiyalar o‘rtasida **asosiy farq** ularning maqsadi va loyihalash metodologiyasiga taalluqlidir.

- **Gridga ulangan quvvat stansiyalari** uchun asosiy maqsad yillik elektr energiyasi ishlab chiqarishni maksimal darajaga etkazishdir, chunki bunday o‘rnatmalar odatda tijorat samaradorligi uchun mo‘ljallangan — xarajatlarni kamaytirish yoki energiyani tarmoqqa sotish. Belgilangan tarif sharoitida PV modullarning og‘ish burchagi va azimut parametrlari yillik ishlab chiqarishni maksimal qilish uchun tanlanadi, odatda janubga yo‘naltirilgan va gorizontalga nisbatan optimal burchakda.
- **Gibrid tizimlarda**, ishlab chiqarishni maksimal qilishdan tashqari, asosiy vazifa markazlashtirilgan quvvat tizimi o‘chirilgan hollarda kritik yuklamalamalarga zaxira quvvat etkazishdir. Chunki qishki sovuq davrda elektr uzilishi iste’molchilar uchun ayniqsa muhim, shuning uchun gibrid fotoelektrik stansiyani loyihalashda **PV modullarining og‘ish burchagini qishki ishlab chiqarishni oshirish maqsadida oshirish** talab qilinishi mumkin — hatto bu yozgi oylar davomida ishlab chiqarish kamayishiga olib kelsa ham.
- **Avtonom tizimlarda**, dizayn faqat iste’mol profilini tahlil qilish asosida amalga oshiriladi, chunki tashqi quvvat tarmog‘idan yordam olinmaydi. Bunda

asosiy e’tibor maksimal ishlab chiqarishga emas, balki kun davomida teng taqsimlangan ishlab chiqarish va ishonchli quvvat ta’minotiga qaratiladi.

Shuning uchun, imkon qadar, ba’zi PV massivlar janubi-sharqga, ba’zilari janubi-g‘arbga yo‘naltiriladi, bu esa ertalab va kechki soatlarda ishlab chiqarishni oshirish imkonini beradi. Bundan tashqari, qishki ishlab chiqarishni oshirish uchun og‘ish burchagi ko‘paytirilishi tavsiya etiladi, kunlar qisqa bo‘lgan davrda mavjud quyosh oynasidan maksimal foydalanish muhim, hatto bu yozda ishlab chiqarish kamayishiga olib kelsa ham.

Biroq, yuqorida sanab o‘tilgan xususiyatlar asosan **PV modullarining yo‘nalishi** — ularning og‘ish burchagi, azimut va natijada qatorlar orasidagi masofa bilan bog‘liq; ya’ni kun va yil davomida ishlab chiqarish profiliga ta’sir qiluvchi parametrlar. Shu bilan birga, **PV massivlar sonini, har bir massivdagi modullar sonini va ularning elektr xususiyatlarini invertor parametrlari bilan mosligini tanlash** barcha turdagi stansiyalar — gridga ulangan, gibrid yoki mustaqil bo‘lishidan qat’i nazar bir xil qoladi. Shu sababli, ushbu masalalar bo‘yicha keyingi muhokama gridga ulangan fotoelektrik stansiya misolida olib boriladi, chunki bu eng universal va tipik yechim hisoblanadi.

Tizim arxitekturasidagi asosiy farqlar. Bir fazadan uch fazaga o‘tishda tizim arxitekturasida asosiy farq **to‘g‘ri tok tomonidagi kuchlanish mosligi** bilan bog‘liq. Uch fazali invertorlarda DC kirishdagi nominal ishlash kuchlanishi odatda bir fazali modellarnikiga nisbatan **1,7 marta yuqoriroq** bo‘ladi. Bu PV massivini optimal kuchlanish darajasiga etish uchun ko‘proq modulni seriyali ulashni talab qiladi.

Gibrid tizimlarda batareya arxitekturasi fazalar soniga bog‘liq. Odatda, bir fazali yechimlar past kuchlanishli (LV) batareya tizimlarini ishlatadi, uch fazali tizimlar esa yuqori kuchlanishli (HV) batareyalarni qo‘llaydi. Shuningdek, past quvvatli uch fazali gibrid tizimlar, past kuchlanishli batareyalarga asoslangan holatlar ham mavjud.

Fotoelektrik modullar va invertorlarning rivojlanishi. So‘nggi yillarda PV modullar tez rivojlandi, asosan ularning quvvat ko‘rsatkichlarini oshirish orqali, bu

esa asosan tokni ko‘paytirish bilan amalga oshiriladi. Bir necha yil oldin bozorda maksimal quvvat tokiga ega modullar taxminan 10–11 A bo‘lgan bo‘lsa, bugungi kunda bu ko‘rsatkich 16 A dan oshdi va bifacial effektni hisobga olganda 20 A gacha etishi mumkin.

Invertor texnologiyasi ham rivojlanib, yangi talablar asosida asosan MPPT trackerlar sonini oshirish va ish tokini kengaytirish bilan moslashadi. Biroq, invertorlarning rivojlanish tezligi modullar elektr xususiyatlarining o‘sish tezligidan biroz orqada qoladi, ayniqsa MPPT ga ruxsat etilgan kirish toklariga nisbatan. Shu sababli, ceteris paribus, past tokga ega PV modullar afzalroq hisoblanadi, chunki bu mos invertorlarni tanlash imkonini kengaytiradi va MPPT kirish toklarini oshirish xavfini kamaytiradi.

Invertor texnologiyasi ham rivojlanib, yangi talablar asosida asosan MPPT trackerlar sonini oshirish va ish tokini kengaytirish bilan moslashadi. Biroq, invertorlarning rivojlanish tezligi modullar elektr xususiyatlarining o‘sish tezligidan biroz orqada qoladi, ayniqsa MPPT ga ruxsat etilgan kirish toklariga nisbatan. Shu sababli, ceteris paribus, past tokga ega PV modullar afzalroq hisoblanadi, chunki bu mos invertorlarni tanlash imkonini kengaytiradi va MPPT kirish toklarini oshirish xavfini kamaytiradi.

Tavsiyalar. Fotoelektrik stansiyalar uchun tipik yechimlarni ishlab chiqish o‘rniga, **asosiy talablar va texnik tavsiyalar tizimini** belgilash ko‘proq mantiqiydir, bu esa real amaliy vaziyatlarni tahlil qilish imkonini beradi. Bu yondashuv nafaqat dizayn prinsiplari chuqurroq tushunishni ta’minlaydi, balki zamonaviy PV tizimlarni amalga oshirishda yuzaga keladigan real sharoit va muammolarga moslash imkonini beradi.

Fotoelektrik stansiyalarni loyihalashning asosiy prinsiplari va ko‘rsatmalari.

1. **O‘rnatilgan hisoblagich turiga asoslanib fazalar sonini aniqlash.** Bu masala shaxsiy sektor uchun PV stansiyalarini loyihalashda ayniqsa dolzarb, ammo kichik tijorat obyektlarida ham uchraydi. Loyihalashdan oldin o‘rnatilgan elektr hisoblagich turini mustaqil ravishda tekshirish zarur, chunki amaliyotda binoga

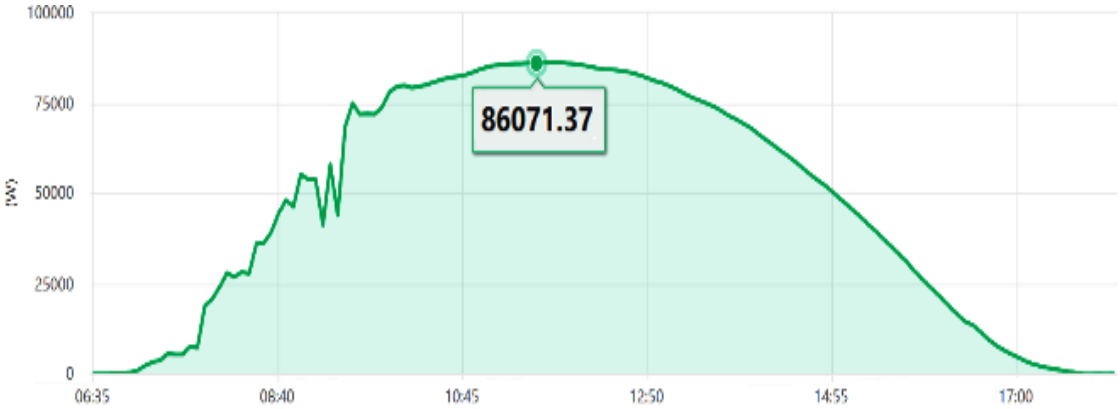
berilgan kirish fazalari soni va hisoblagich tomonidan qayd etilgan fazalar soni o‘rtasida chalkashliklar bo‘ladi.

Ko‘pincha, uy-joyning asosiy taqsimlash paneliga uch faza va neytral o‘tkazgich keladi; ammo keyin u faza tanlash kaliti orqali yo‘naltiriladi va faqat bir faza bir fazali hisoblagichga ulanadi. Bunday hollarda, uch fazali ta’minot mavjud bo‘lsa ham, bir fazali PV stansiyasini loyihalash talab qilinadi, mijoz alohida uch fazali hisoblagich o‘rnatishga rozi bo‘lmasa.

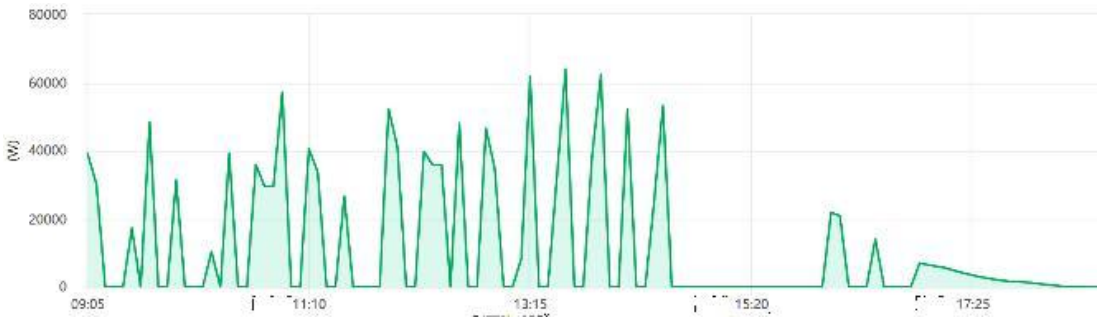
2. **PV stansiyani tarqatish tarmog‘iga ulashga tayyorligini baholash.** PV stansiyani loyihalashdan oldin uni mavjud tarqatish tarmog‘iga integratsiya qilish mumkinligini baholash zarur. Asosan, invertordan ulanish nuqtasigacha bo‘lgan ta’minot kabeli parametrlari — minimal holatda transformator podstansiyasining 0,4 kV busbarlariga qadar — tekshirilishi kerak. Kabelning kesimi va uzunligi ruxsat etilgan darajalarni (uzluksiz ruxsat etilgan tok va ruxsat etilgan kuchlanish tushishini) ta’minlashiga ishonch hosil qilish zarur, PV stansiya ishlab chiqargan quvvatni to‘liq eksport qilgan holatda.

Afsuski, amaliyotda bu masalalar ko‘pincha faqat jihoz o‘rnatishning oxirgi bosqichida yuzaga keladi, va tarmoq PV stansiyaning quvvat chiqishini qabul qilishga tayyor emasligi aniqlanadi. Bu lokal kuchlanish oshishi va ruxsat etilgan chegaralardan chiqish xavfini keltirib chiqaradi.

Masalan, 4.7-rasmda 100 kW nominal quvvatga ega bir xil gridga ulangan PV stansiyaning kunlik ishlab chiqarish profilini ko‘rsatadi, u ikki xil parallel 0,4 kV tarqatish tarmog‘iga ulanadi, har biri turli tarqatish nuqtalaridan oziqlantiriladi.



A. Tarmoqqa ulanish №1



B. Tarmoqqa ulanish №2

4.7-rasm. Turli taqsimlash tarmoqlariga ulanganda fotoelektr stansiyasining (FES) chiqish quvvati grafigi.

4.7-rasmda ko‘rsatilganidek, **Tarmoq konfiguratsiyasi №1** Fotoelektrik stansiyasini ulash uchun qulay sharoitlarni ta’minlaydi, **Tarmoq №2** esa bunday imkoniyatni bermaydi, chunki uzatish liniyasi sig‘imi cheklangan va stansiyaning to‘liq quvvatini tarmoqqa uzatishga ruxsat bermaydi.

Invertorning chiqish quvvati oshgani sari, 0,4 kV tomonida kuchlanish keskin oshadi. Agar liniya kuchlanishi **orrtacha ruxsat etilgan kuchlanish chegarasidan** (bu holatda 439 V) oshsa, invertor avtomatik tarzda ishlab chiqarishni to‘xtatadi va tarmoq kuchlanishi barqarorlashgach qayta ishga tushadi.

Eslatma: Ushbu misolda invertordagi **dinamik kuchlanish nazorati funksiyasi (P-U funktsiyasi)** yoqilmagan. Ushbu funksiya invertorga chiqish kuchlanishi belgilangan xarakteristika bo‘yicha oshgani sari PV stansiyaning chiqish quvvatini avtomatik kamaytirishga imkon beradi. Shu orqali favqulodda himoya yoki invertor o‘chirishsiz, kuchlanish belgilangan darajada barqarorlashtiriladi.

Ushbu misolda, **fotoelektrik stansiyasini Tarmoq №2 ga ulash bilan bir necha jiddiy muammolar darhol yuzaga keladi**.

- Birinchidan, stansiya deyarli elektr energiyasi ishlab chiqara olmaydi, chunki invertor ruxsat etilgan kuchlanish chegarasidan oshib ketgani sababli muntazam o‘chadi va tizim ishlamay qoladi.

- Ikkinchidan, bir necha marta o‘chib-yoqish va takroriy sinxronizatsiya urinishlari invertorga zarar etkazishi yoki uning ishlash muddatini sezilarli darajada qisqartirishi mumkin.
- Bundan tashqari, fotoelektrik stansiya o‘zi ham tarmoqda mahalliy kuchlanish oshishining manbaiga aylanadi: liniya sig‘imi etarli bo‘lmaganda va mahalliy iste’mol kam bo‘lsa, invertor tarmoqning yaqin qismlarida kuchlanishni oshirishni boshlaydi. Bu mavzu bo‘yicha batafsil ma’lumotni [42]-manbada topish mumkin.

Agar ortiqcha kuchlanishdan himoya (overvoltage protection) o‘chirib qo‘yilsa, kuchlanish nazariy jihatdan 500 V yoki undan yuqori darajaga etishi mumkin, bu esa ushbu tarmoqqa ulangan uy va sanoat elektr uskunalari uchun jiddiy zarar xavfini yaratadi.

Shuning uchun **tarmoq holati va ulanish parametrlarini** loyihalash jarayonini boshlashdan oldin baholash zarur. Zarurat tug‘ilganda, invertordan taqsimlash nuqtasigacha yoki boshqa mos tarmoq tuguniga alohida liniya (kabel) o‘rnatilishi lozim.

Fotoelektrik stansiyalar ulanish zichligi oshib borayotgan hududlarda, ya’ni bir nechta PV stansiyalar bir xil taqsimlash liniyasiga ulangan hollarda, ularning **tarqatish tarmog‘iga va butun quvvat tizimiga qo‘shilgan ta’sirini** keng qamrovli baholash talab qilinadi.

Bu masala ayniqsa qishloq taqsimlash tarmoqlariga PV stansiyalarini integratsiya qilganda dolzarb bo‘ladi, chunki bunday tarmoqlar ko‘pincha uzun uzatish liniyalari va cheklangan o‘tkazgich sig‘imiga ega bo‘ladi. Ko‘p hollarda, taqsimlash nuqtasidan iste’molgacha bo‘lgan liniya uzunligi 600 metrgacha yoki undan ko‘p bo‘lishi mumkin, va eng uzoq uyga PV stansiyani ulashda, stansiya to‘liq quvvat eksport qilganda liniya bo‘ylab sezilarli kuchlanish oshishi xavfi mavjud.

3. Elektr hisoblagich tizimi o‘tkazish sig‘imini baholash. Ushbu masala oldingi bo‘limga kiritilishi mumkin bo‘lsa-da, alohida ko‘rib chiqish tavsiya etiladi. Chunki **fotoelektrik stansiyasi har doim elektr hisoblagichdan keyin ulanadi**, quvvat eksport qilinayotgan hollarda barcha ishlab chiqarilgan quvvat hisoblagich

orqali o‘tadi - to‘g‘ridan-to‘g‘ri (agar to‘g‘ridan-to‘g‘ri ulanish bo‘lsa) yoki tok transformatorlari orqali.

Hisoblagichning ruxsat etilgan yuklama xususiyatlari uning texnik pasportida ko‘rsatilgan; ammo taxminiy hisoblashlar uchun quyidagi qiymatlar ishlatilishi mumkin:

Bir fazali hisoblagich uchun maksimal ruxsat etilgan tok odatda 60 A**;**

Uch fazali to‘g‘ridan-to‘g‘ri ulanish hisoblagichi uchun maksimal tok har fazada 100 A**,** ammo tavsiya etilgan tok, barcha uch fazaga teng taqsimlangan holda, har fazada **30 A** dan oshmasligi kerak.

Eslatma: 60 A va 100 A qiymatlari ishlab chiqaruvchilar tomonidan **+25°C dan oshmagan atrof-muhit haroratida**, etarli shamollatish va yuqori sifatli terminal bloklari va ulanish moslamalari bilan ishonchli kontaktni ta’minlagan holda berilgan.

Shuningdek, tarmoqda **kuchlanish pasayishi (undervoltage)** holatida invertor chiqish tokini oshirib (maksimal darajagacha) kuchlanish tushishini kompensatsiya qilishini hisobga olish zarur, agar undervoltage himoyasi yoqilmagan bo‘lsa.

To‘g‘ridan-to‘g‘ri ulanish uchun maksimal ruxsat etilgan invertor quvvatiga tavsiyalar:

- **Bir fazali hisoblagichlar uchun:** invertor quvvati **10 kW dan oshmasligi**, maksimal chiqish tokini **45 A gacha** bo‘lishi tavsiya etiladi;
- **Uch fazali hisoblagichlar (to‘g‘ridan-to‘g‘ri ulanish) uchun:** invertor quvvati **20 kW gacha**, maksimal faza chiqish tokini **33–35 A** bo‘lishi tavsiya etiladi;
- **40 kW dan yuqori quvvatli PV stansiyalar**, ya’ni faza toki **64 A** dan oshganda, **oraliq tok transformatorlaridan** foydalanish tavsiya etiladi.

4. Taqsimlash tarmog‘iga optimal ulanish nuqtasini aniqlash. Fotoelektrik stansiyasini ulash uchun optimal nuqtani tanlash **quvvat tizimining samaradorligiga bevosita ta’sir qiladi** va quvvat yo‘qotishlarini sezilarli darajada

kamaytiradi. Optimal ulanish nuqtasi har bir loyiha uchun alohida aniqlanishi kerak, quyidagi omillar hisobga olinadi:

- PV stansiyaning o‘rnatilgan quvvati;
- Ob’ektning hisoblangan yuklama quvvati;
- Mavjud tarmoq konfiguratsiyasi.

Kichik va o‘rta quvvatli PV stansiyalarning aksariyati **ichki talabni qondirishga mo‘ljallangan**; bunday hollarda, stansiyani **iste’mol nuqtasiga yaqin joyga ulash mantiqiy yechim** hisoblanadi. Bu kabel liniyasidagi issiqlik yo‘qotishlarini kamaytiradi va natijada quvvat tizimining umumiy energiya samaradorligini oshiradi.

Shunga qaramay, ba’zi hollarda texnik shartnomalar **0,4 kV transformator podstantsiyasi shinalariga to‘g‘ridan-to‘g‘ri ulanishni** qat’iy talab qilishi mumkin, hatto bu muhandislik va iqtisodiy nuqtai nazardan optimal yechim bo‘lmasa ham. Bunday hollarda, taklif qilingan o‘zgartirishlarni oldindan asoslab (masalan, yo‘qotishlarni kamaytirish, energiya samaradorligini oshirish, xarajatlarni tejash va yangi liniya tortishning texnik zaruriyati yo‘qligini ko‘rsatish) **tegishli tarmoq tashkilotlari bilan ulanish nuqtasini qayta muzokara qilish** mumkin.

Misol. 50 kW quvvatga ega **gridga ulanadigan Fotoelektrik stansiyasi** sanoat binosining tomiga o‘rnatilgan. **Grid invertori** birinchi qavatdagi elektrotexnika xonasida, **asosiy taqsimlash paneli (MDB)**ga yaqin joylashgan-masofa 5 metr (4.8-rasm A).

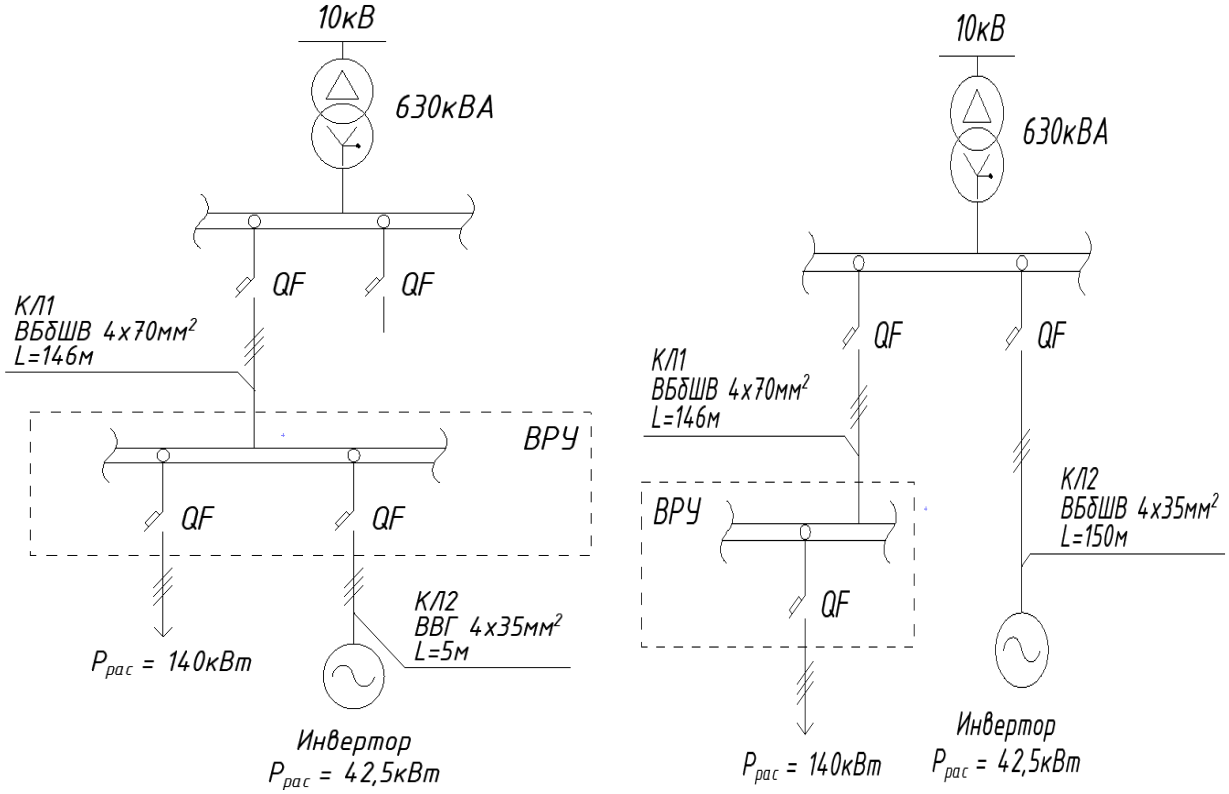
Loyiha hujjatlariga ko‘ra, **switchboard (VRU) ga hisoblangan yuklama** 140 kW, **fotoelektrik stansiya (PV plant) quvvati** esa 42,5 kW, ya’ni butun stansiya ishlab chiqarilgan quvvat ichki iste’molga yo‘naltiriladi, tarmoqqa eksport qilinmaydi. Shu sababli, invertorni ulash uchun **optimal nuqta VRU** bo‘lib, eng qisqa yo‘lni ta’minlaydi va yo‘qotishlarni minimal qiladi.

Shu bilan birga, switchboard (VRU)dan taqsimlash nuqtasigacha (DP) bo‘lgan **mavjud kabelning kesimi va uzunligi** PV stansiyaning to‘liq quvvatini markazlashtirilgan quvvat tizimiga (EPS) xavfsiz uzatishni ta’minlaydi — shu

jumladan ichki iste’mol bo‘lmagan hollarda, masalan, dam olish kunlari va bayramlarda.

Biroq, berilgan **texnik shartnomalarga** ko‘ra, ulanish uchun majburiy shart — invertordan 150 metr masofadagi transformator podstantsiyasi **0,4 kV shinalariga maxsus kabel o‘rnatish** (4.8-rasm B) bo‘lib, bu talab **asossiz quvvat yo‘qotishlariga** olib keladi — PV stansiya umumiy chiqish quvvatining **4% gacha** yo‘qotilishi kabel bo‘lagi orqali (invertordan taqsimlash nuqtasigacha va keyin switchgearga) yuzaga keladi.

Shuningdek, yangi kabel tortish jarayoni **texnik xavf-xatarlar**ni o‘z ichiga oladi, jumladan, yer osti kommunikatsiyalarining shikastlanish ehtimoli, ayniqsa joriy qurilish hujjatlari mavjud bo‘lmagan hollarda.



4.8-rasm. Fotoelektrik stansiyasini mavjud elektr ta’moniti tizimiga ulash variantlari.

5. Joylashuv imkoniyatlarini baholash. Loyihalashning eng murakkab va shu bilan birga eng muhim bosqichlaridan biri — **fotoelektrik modullarni (PVM) joylashtirish joyi va usulini tanlash**.

Loyiha bosqichida **PV stansiyaning quvvatini**, mavjud maydonga modullarni optimal joylashtirish orqali aniqlash zarur, bu jarayonda modulning yo‘nalishi, burilish burchagi va qatorlar oralig‘i hisobga olinadi. **Qaytarma yondashuv** — mijozning talabiga ko‘ra dastlab stansiya quvvati belgilanib, so‘ngra modullar joylashuvi sun’iy tarzda moslashtirilishi noto‘g‘ri hisoblanadi. Bu ko‘pincha texnik xatolarga, uskuna samaradorligining pasayishiga yoki soya va issiqlik rejimi qoidalarining buzilishiga olib keladi.

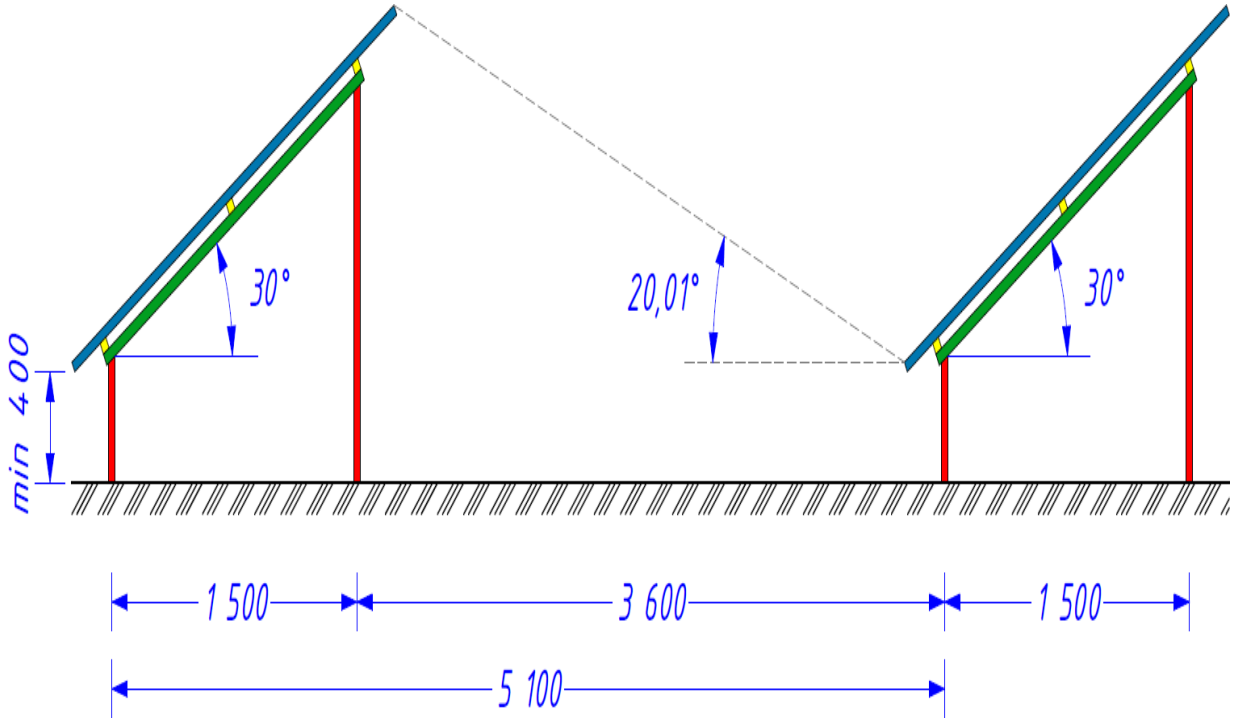
Agar PV modullar **tekis, ochiq er maydoniga**, ayniqsa qishloq hududlarida, joylashtirilsa, sharoitlar soddalashtiriladi. **Tarmoqqa ulanadigan va yillik ishlab chiqarishni maksimal qilishga mo‘ljallangan PV stansiyalar** uchun, modullarni gorizontal tekislikka nisbatan **taxminan 30° burchak bilan** o‘rnatish tavsiya etiladi, bu O‘zbekistonning kengliklariga yaqin optimal burchak hisoblanadi.

Qatorlar oralig‘i shunday tanlanishi kerakki, quyoshning balandligi **20° dan oshganda qatorlar orasida soya tushmasin**. Bu shart modullarning faol yuzasiga to‘g‘ridan-to‘g‘ri quyosh nurlari tushishini **kuniga kamida to‘rt soat — taxminan 10:30 dan 14:30 gacha**, hatto qishki quyosh turg‘unligi paytida ham ta’minlaydi, bu paytda quyoshning balandligi minimal bo‘ladi. Qatorlar oralig‘ini ortiqcha oshirish amaliy emas, chunki bu er maydonining samarali ishlatilmasligiga va egallangan hududning sezilarli kengayishiga olib keladi, elektr energiyasini sezilarli darajada oshirmasdan.

Shuningdek, e**r yuzasi bilan PV modulning pastki qirrasi orasida kamida 40 sm bo‘shliq** saqlanishi tavsiya etiladi, bu ayniqsa qishki yog‘ingarchilik ko‘p bo‘lgan hududlarda **qarni yig‘ilishining oldini olish** va pastki elementlarga soya tushmasligini ta’minlaydi. 4.9-rasm – maydon cheklovlari bo‘lmagan erga o‘rnatiladigan PV modullar uchun optimal joylashuv sxemasi.

PV modullarni **bino tomiga o‘rnatish** holatida vaziyat ancha murakkablashadi, chunki standart loyihaviy yechimlar bu holatda qo‘llanilmaydi. Har bir tomning o‘ziga xos xususiyatlari mavjud, jumladan: geometrik shakli, asosiy yo‘nalishlarga nisbatan yo‘nalishi, burilish burchagi, tashuvchi qobiliyati, shuningdek, muhandislik kommunikatsiyalari, ventilyatsiya uskunalari va

soyalangan zonalarning mavjudligi. Shuning uchun har bir tom uchun alohida **muhandislik tahlili va texnik baholash** zarur bo‘lib, unda struktura xususiyatlari va yil davomida quyosh nurlanishi hisobga olinadi.

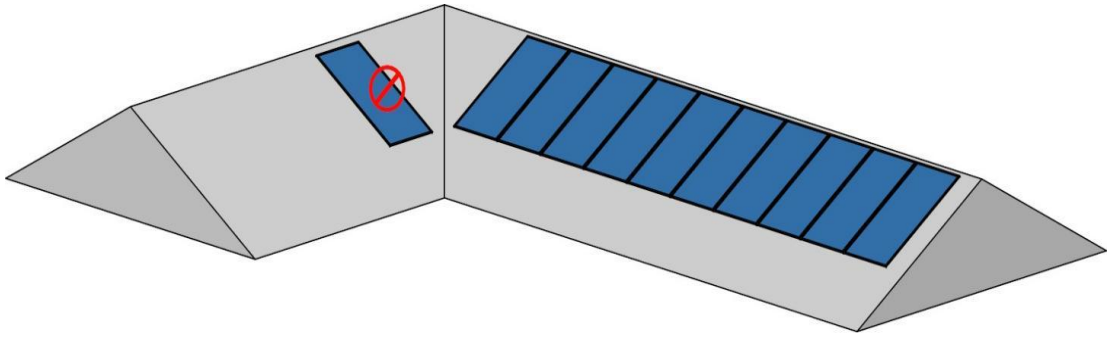


4.9-rasm. Yerga o‘rnatiladigan PV modullar uchun optimal joylashuv variant.

Tomga o‘rnatishda PV modullarini joylashtirish bo‘yicha tavsiyalar:

- Agar **tomning nishabi 15° dan oshsa**, modullar tom yuzasiga parallel tarzda o‘rnatilishi mumkin, shart shuki, modulning orqa tomi va tom orasida **tabiiy sovutish uchun kamida 100–300 mm havo bo‘shlig‘i** saqlansin.
- **Fotoelektrik panellar** bir xil sharoitda o‘rnatilgan modullardan tashkil topishi kerak, **bir xil burilish burchaklari va azimutlarda** bo‘lishi lozim — bu MPPT ishlashini to‘g‘ri ta’minlaydi va barqaror energiya ishlab chiqarishni kafolatlaydi.
- Imkon qadar, modullar vertikal holda o‘rnatilishi tavsiya etiladi (uzun tomoni yuqoriga qarab) — bu tavsiya ayniqsa **Half-Cut modullar** uchun muhim, chunki pastki qism soyalangan holatda ham modulning yuqori yarmi energiya ishlab chiqarishni davom ettirishi mumkin (masalan, qor bilan qoplanish).

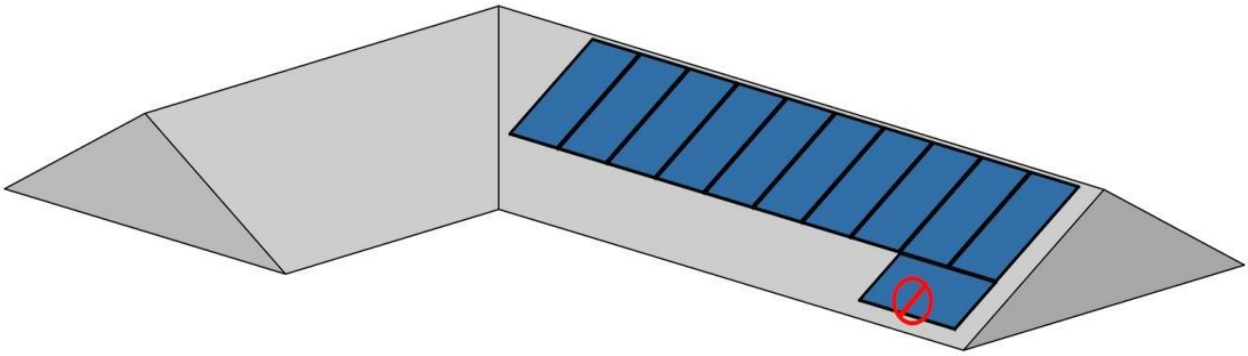
- Turli **azimut yo‘nalishidagi modullar** bir xil PV blok (PVB) ichida birlashtirilmasligi kerak, chunki bu MPPT ishlashida nomutanosiblikka olib keladi va modul sonini ko‘paytirishning afzalliklarini bekor qiladi (4.10-rasmga qarang).



4.10-rasm. O‘rnatish azimuti farq qiluvchi bitta modulni o'z ichiga olgan fotoelektrik blok.

Ko‘rib chiqilgan holatda, qo‘shimcha azimutga ega bo‘lgan modulni qo‘shishdan ko‘ra, **kamroq sondagi modullardan tashkil topgan, ammo bir xil o‘rnatish sharoitlariga ega bo‘lgan fotoelektrik blokni (PVB)** saqlab qolish maqsadga muvofiqdir. Bunday yondashuv MPPTning barqaror ishlashini ta’minlaydi va umumiy ishlab chiqarish samaradorligini oshiradi.

- PV modullar sonini oshirish maqsadida ularni **bir nechta vertikal qatorda (bir-birining ostiga)** joylashtirish tavsiya etilmaydi. Chunki pastki qatorda joylashgan modullar:
- **kuchli changlanish**, **qorning uzoq vaqt erimay turishi**, natijasida to‘liq yoki qisman quvvat ishlab chiqarishning pasayishiga olib keladi.



4.11-rasm. O‘rnatish yo'nalishi (orientatsiyasi) farq qiluvchi bitta modulni o'z ichiga olgan fotoelektrik blok.

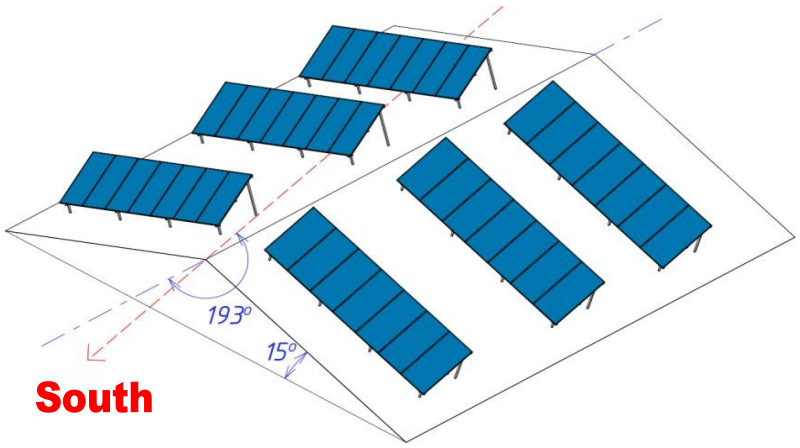
Quyida amaliy tajribadan olingan bir misol keltiriladi. U fotoelektrik stansiya blokini **mutlaqo bir xil sharoitlarda ishlovchi modullardan** shakllantirishning qanchalik muhimligini yaqqol ko‘rsatadi.

Misol tariqasida, **qiya tomga o‘rnatilgan** fotoelektrik stansiya ko‘rib chiqiladi. Tomning markaziy o‘qi janubi-g‘arb tomonga yo‘naltirilgan bo‘lib, **azimuti 193°** ni tashkil etadi (4.12-rasm). Fotovoltaik modullar tomning sharqiy va g‘arbiy yonbag‘irlarida, **har uchta gorizontal qator** ko‘rinishida joylashtirilgan.

Barcha modullar bir xil sharoitda o‘rnatilgan:

- **Azimut:** 193°
- **Gorizontalga nisbatan og‘ish burchagi:** 30°

Bu holat modullarni bir xil yoritilish va bir xil ish rejimiga ega bo‘lishini ta’minlaydi, natijada PVB ichida MPPT barqaror ishlaydi va energiya ishlab chiqarish maksimal bo‘ladi.

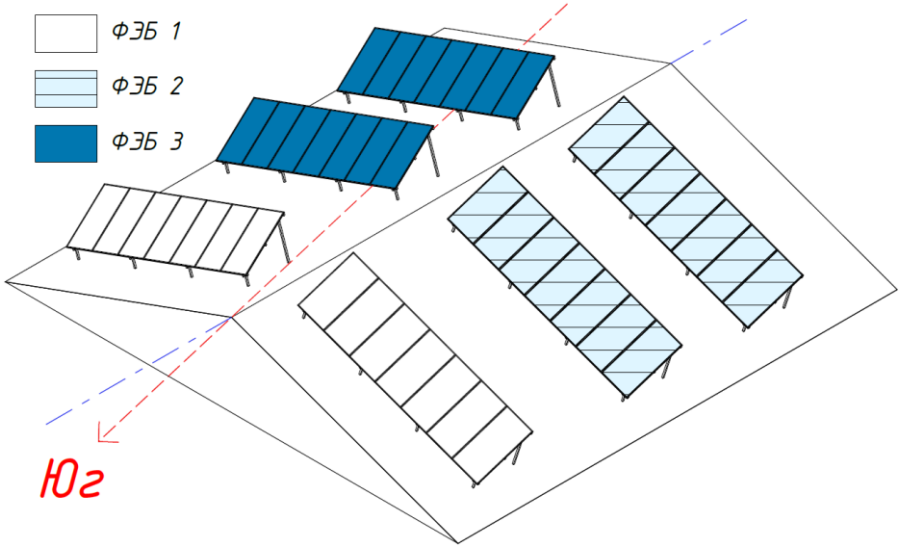


4.12-rasm. Ikki qiyali (ikki nishabli) tomga o‘rnatilgan fotoelektr stansiya.

Loyihalash jarayonida tomning geometrik parametrlari inobatga olingan: qatorlar orasidagi masofa hamda tomning qirrasi (konstruksion cho‘qqisi)dan quyosh panellarining yuqori qatorigacha bo‘lgan oraliq **o‘zaro soyalashuvni minimal darajaga tushirish uchun optimallashtirilgan**. Hisob-kitoblar shuni ko‘rsatdiki, quyoshning 193° azimutida qatorlar orasidagi **eng katta o‘zaro soyalashuv burchagi 20° dan oshmaydi**, bu esa barqaror energiya ishlab chiqarishni ta’minlovchi qabul qilinadigan me’yordir.

Tajriba o‘tkazish maqsadida, bir xil modullardan foydalanilgan holda, turli ulanish sxemalariga ega uch xil **fotoelektrik blok (FEB)** shakllantirildi (4.13-rasm):

- **FEB №1** - 7 ta fotovoltaik moduldan tashkil topgan bo‘lib, modullar ikkala yonbag‘irga: sharqiy va g‘arbiy tomonga joylashtirilgan;
- **FEB №2** - faqat sharqiy yonbag‘irda joylashgan 14 ta moduldan iborat;
- **FEB №3** - faqat g‘arbiy yonbag‘irdagi 14 ta moduldan tashkil topgan.



4.13-rasm. Fotoelektr blokni shakllantirish sxemasi.

Har bir fotoelektr (FE) massivi alohida MPPT kontrollerga ulandi, bu esa ular o‘rtasidagi o‘zaro ta’sirni to‘liq bartaraf etib, mustaqil ishlashini ta’minladi. 4.1-jadvalda har bir FE massivining yillik elektr energiyasi ishlab chiqarish ko‘rsatkichlari keltirilgan.

Ma’lumotlardan ko‘rinib turibdiki, №2 va №3-sonli FE massivlarining ishlab chiqarishi mos ravishda 26 % va 19 % yuqori bo‘lgan. Bu holat №1-sonli FE massivining turli yonboshlarda, ya’ni har xil orientatsiya va yo‘nalishda o‘rnatilgan modullardan tashkil topgani bilan izohlanadi. Bunday sharoitda modullar o‘rtasida tok mos kelmasligi (mismatch) yuzaga kelib, umumiy ishlab chiqarishni pasaytirgan.

№2 va №3-sonli FE massivlari esa tegishlicha sharqiy va g‘arbiy yonboshlarda joylashgan bir xil sharoitdagi modullardan tashkil topgani sababli, moduliyn toki bir

xil bo‘lib, MPPT kontrollerlar yil davomida haqiqiy maksimum quvvat nuqtasiga yaqin ishlash imkoniga ega bo‘lgan.

Shuningdek, sharqiy yonboshdagi modullardan tashkil topgan №2 FE massivining ishlab chiqarishi g‘arbiy yonboshdagi №3 massivga nisbatan yuqoriroq bo‘lishi binoning azimut orientatsiyasi bilan bog‘liq bo‘lib, tonggi radiatsiyani qabul qilish sharoitlari sharqiy tomonda yaxshiroqdir.

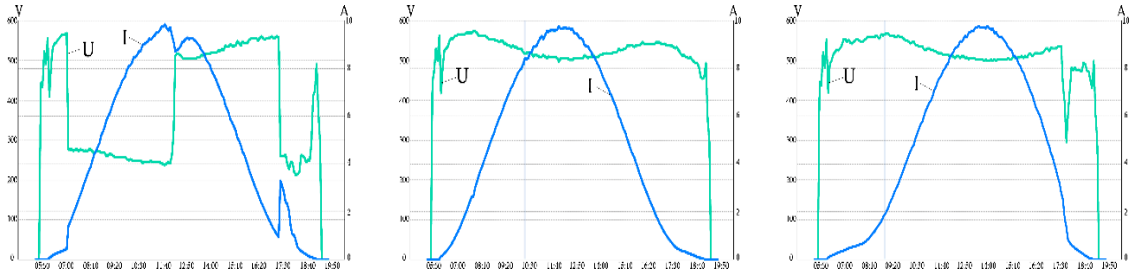
4.1-jadval. 2023 yil 1 sentyabrdan 2024 yil 31 avgustgacha bo‘lgan davrda №1, №2 va №3 FE bloklarning elektr energiyasi ishlab chiqarishi

Sana	**Elektr energiya ishlab chiqarilishi, kWh**		
	PV Module №1	**PV Module №2**	**PV Module №3**
09/01/2023–11/30/2023 (kuz)	2302	2925 (+27%)	2642 (+15%)
12/01/2023–02/29/2024 (qish)	1309	1790 (+37%)	1616 (+24%)
03/01/2024–05/31/2024 (bahor)	2449	2897 (+28%)	2797 (+14%)
06/01/2024 – 08/31/2024 (yoz)	2705	3441 (+27%)	3343 (24%)
01.09.2023 – 31.08.2024	8765	11053 (+26%)	10398 (+19%)

№1-sonli fotoelektr blokining (PVB) ishlab chiqarishdagi kamayishi MPPT kontrollerining operatsion xususiyatlari bilan bog‘liq. Kontroller, ayrim modullar sharqiy tomonda o‘rnatilganda (kunning birinchi yarimida ko‘proq aks etgan quyosh nurini qabul qiladi), boshqa modullar g‘arbiy tomonda bo‘lganda (kunning ikkinchi yarimida shunaqa yorug‘likni qabul qiladi), maksimal quvvat nuqtasini aniqlashda qiyinchiliklarga duch keladi.

Shu sababli, bitta PV zindagi modullar turli yorug‘lik sharoitlarida ishlaydi, shu jumladan, to‘g‘ridan-to‘g‘ri va aks etgan quyosh nurining nisbatlari turlicha bo‘ladi, bu esa MPPTning optimal ish rejimiga rioya qilishni qiyinlashtiradi. Natijada, kuchlanishda o‘zgarishlar ro‘y beradi va chiqish quvvati pasayadi.

4.14-rasmda 2024 yil 31 avgustda uchta PV zindasi uchun kuchlanish va tok qiymatlari qisqacha taqdim qilingan. Qayd etilganidek, №1-sonli PV zindasida kuchlanish tushishi kuzatilgan, bu esa ishlab chiqarishning kamayishiga olib keladi.



A. FEB №1 B. FEB №2 C. FEB №3

4.14-rasm. 2024 yil 31 avgust kuni №1, №2 va №3 FEB (PV) bloklari uchun DC tomonidagi kuchlanish va tok grafigi.

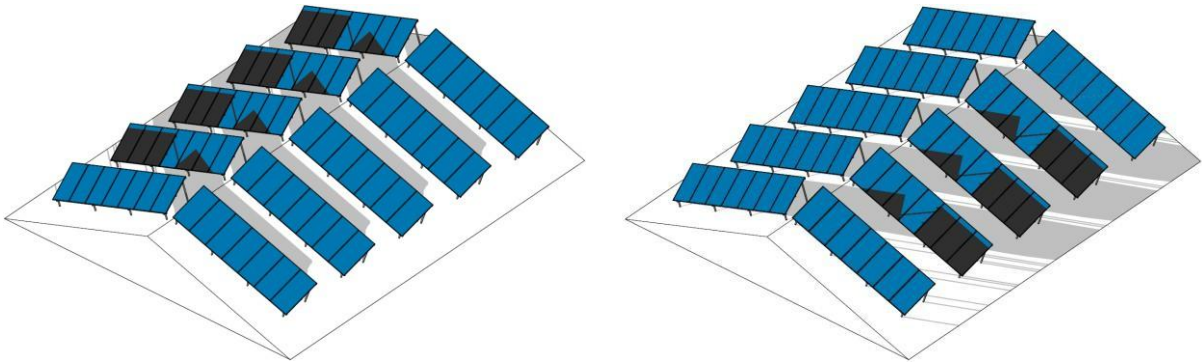
Shunga o‘xshash MPPT kontrollerining ishlash xatti-harakati boshqa, qiya tomli tomlarda o‘rnatilgan fotoelektr stansiyalarda ham qayd etilgan, bu erda bitta PV blokining modullari turli tomlarga joylashtirilgan. Bu bitta PV blokida turli yo‘nalishdagi yoritilish MPPTning beqaror ishlashiga sabab bo‘lishini va umumiy elektr energiyasi ishlab chiqarish hajmini kamaytirishini tasdiqlaydi.

Afsuski, amaliyotda fotoelektr stansiyalar ko‘pincha PVB №1 ga o‘xshash prinsiplarda modulalar bilan bog‘langan holda loyihalashtiriladi, chunki bu yechim elektr o‘rnatish ishlarini sezilarli darajada soddalashtiradi. Biroq, o‘rnatish qulayligi energiya samaradorligi talablaridan ustun bo‘lmasligi kerak.

Shuningdek, bir tom qiya yuzaga joylashtirilgan modullarni guruhlashning muhim afzalligi – o‘zaro soya tushish natijasida yuzaga keladigan ishlab chiqarish yo‘qotishlarini lokalizatsiya qilishdir. Albatta, ideal yechim – o‘zaro soya tushishni to‘liq bartaraf etishdir; ammo real sharoitlarda, ayniqsa qishda, orqa qator modullari quyoshning past burchagi va qatorlar orasidagi cheklangan masofa tufayli tom ustidagi yuqori modullardan soya olishi mumkin.

Bunday hollarda, har bir tom uchun alohida PV zindasi bloklarini shakllantirish orqali, ishlab chiqarish yo‘qotishlari faqat tegishli bloklarga ta’sir qiladi: tonggi soya g‘arbiy tomondagi modullarga ta’sir qiladi (6.15-rasm A), kechki

soya esa sharqiy tomondagi modullarga ta’sir qiladi (6.15-rasm B). Biroq, agar turli tomlardagi modullar bitta PV zindasi blokiga birlashtirilsa, har qanday bo‘limdagi soya butun blokning samaradorligini pasaytiradi, chunki MPPT kontroller eng kam yoritilgan modulni kuzatadi.



A. Tonggi soya B. Kechki soya

4.15-rasm. Qish mavsumida fotovoltaik modullarda yuzaga kelishi mumkin bo‘lgan o‘zaro soya tushish.

6. PV modul va invertor xususiyatlarining mosligini ta’minlash. Fotoelektr stansiyaning xavfsiz va barqaror ishlashi uchun PV modulning elektr xususiyatlari va alohida fotovoltaik elementlarning invertor parametrlariga mosligi ta’minlanishi zarur. Asosiy talablar quyidagilardir:

- PV modulning maksimal quvvatdagi kuchlanishi (U_mp) invertorning MPPT kuchlanish diapazoniga mos kelishi kerak. Ushbu shartga rioya qilinmasa, invertor maksimal quvvat nuqtasini to‘liq aniqlay olmaydi va fotoelektr stansiya samarador ishlamay qolishi yoki ishga tushmay qolishi mumkin.
- PV modulning hisoblangan minimal haroratdagi maksimal kuchlanishi (U_{OC}) invertorning ruxsat etilgan maksimal kirish kuchlanishidan oshmasligi kerak. Ushbu shart buzilganda invertor ishlamay qolishi mumkin, chunki ruxsat etilgan kirish kuchlanishidan oshish komponentlarning elektr yaxlitligiga zarar etkazadi va kirish sxemalariga shikast etkazadi.
- PV modulning maksimal quvvat nuqtasidagi toki (I_{mp}) MPPT kontrolleri va unga mos PV kirishining ruxsat etilgan maksimal tokidan oshmasligi kerak. Agar bitta MPPTga ikki parallel PV modul ulangan bo‘lsa, hisob-kitob ikki modulning

umumiy tokini hisobga olishi lozim, bu limitni oshmasligi shart. Shart bajarilmasa, tok ruxsat etilgan maksimal darajaga cheklanadi va potentsial energiya ishlab chiqarish yo‘qotiladi. Bundan tashqari, tok chegarasining oshishi MPPT sxemalarida issiqlik ko‘payishiga olib keladi, bu esa ortiqcha qizish, komponentlarning ishlash muddatining qisqarishi va ba’zi hollarda invertorning favqulodda o‘chishi yoki shikastlanishiga sabab bo‘ladi. Boshqa shartlar teng bo‘lsa, past tokli fotovoltaik modullarga afzallik berilishi tavsiya etiladi.

- PV elementning qisqa tutashuvdagi toki (I_qt) invertor kirishidagi ruxsat etilgan maksimal qisqa tutashuv tokidan oshmasligi kerak. Shuningdek, tavsiya etiladi tok rezervini kamida 25% darajada saqlash; ya’ni haqiqiy qisqa tutashuv toki ruxsat etilgan maksimal qiymatning 80% dan oshmasligi lozim, bu kirish sxemalarining ishonchliligi va issiqlik barqarorligini ta’minlaydi. Ko‘pchilik hollarda, agar maksimal quvvatdagi tok (I_mp) sharti bajarilsa, ushbu shart avtomatik tarzda bajariladi.

Agar bitta MPPTga ikki PV modul parallel ulangan bo‘lsa, hisob-kitobda ikkala zindanning umumiy qisqa tutashuv toki hisobga olinishi lozim.

Ushbu shartga rioya qilinmasa, invertor kirish sxemasi ortiqcha yuklamalanishi, himoya qurilmalarining ishlashi, quvvat komponentlarining ortiqcha qizishi va ba’zi hollarda uskuna shikastlanishiga olib kelishi mumkin.

PV modullarning umumiy quvvati MPPT kontrollerining ruxsat etilgan maksimal quvvatidan oshmasligi lozim. Agar bitta MPPTga ikki PV modul parallel ulangan bo‘lsa, hisob-kitobda ikkala modulning umumiy o‘rnatilgan quvvati inobatga olinishi kerak.

Ushbu shartga rioya qilinmasa, MPPT maksimal quvvat nuqtasidan past tok tomon chekinayotganda kontroller tomonidan majburiy quvvat cheklanishi tufayli energiya ishlab chiqarish yo‘qotilishi yuz beradi. Bundan tashqari, MPPTni maksimal quvvat chegarasida ishlatish issiqlik yuklamaini oshiradi, bu sxema komponentlarining tezroq eskirishiga, sovutish samaradorligining pasayishiga va invertorning ishlash muddatining qisqarishiga olib keladi. Shu sababli, MPPTni

maksimal sig‘imga etkazmaslik, balki kamida 10–20% zaxira qoldirish tavsiya etiladi, ayniqsa yuqori atrof-muhit harorati sharoitida.

Agar bitta MPPTga ikki PV massiv ulangan bo‘lsa, u holda modul bloklari xususiyatlari, egilish burchagi va azimut bo‘yicha bir xil bo‘lishi shart. Ushbu talab bajarilmasa, MPPT kontrolleri ikki blokning turli sharoitlarda ishlashiga sababli umumiy maksimal quvvat nuqtasini aniqlay olmaydi, natijada energiya yo‘qotilishi yuz beradi. Shuningdek, parallel ulangan PV massivlar orasida kuchlanish farqi mavjud bo‘lsa, zindonlar orasida orqaga tok paydo bo‘lishi mumkin, bu mahalliy ortiqcha qizish, sxema nomutanosibligi va qo‘shimcha energiya yo‘qotilishiga olib keladi. Ushbu hodisani oldini olish uchun, bitta MPPTga faqat elektr va geometrik jihatdan bir xil massivlar ulanadi.

Bitta MPPT kontrolleriga ulangan PV modullar kuchlanishi bir xil bo‘lishi kerak. Turli MPPT kontrollerlariga ulangan modullar orasidagi kuchlanish farqi 150 Vdan oshmasligi lozim, bu ichki tok taqsimoti yoki himoya sxemalarining ishga tushishini oldini oladi (DC BUS UNBALANCE). Ammo eng maqbul yechim barcha PV modullar kuchlanishini tenglashtirishdir, bu balanslashni soddalashtiradi va invertor barqarorligini oshiradi.

Boshqa shartlar teng bo‘lsa, har bir MPPT kontrolleriga faqat bitta PV modul zindoni ulanadigan tarzda tizim konfiguratsiyasini tanlash tavsiya etiladi. Bu MPPT samaradorligini maksimal qiladi, maksimal quvvat nuqtasini aniqlashni soddalashtiradi va parallel PV modul zindonlari orasidagi tok aylanishi xavfini yo‘q qiladi. Shuningdek, tizimning umumiy barqarorligi va ishonchliligini oshiradi. Favqulodda holatlarda, masalan, qisqa tutashuvda, ikkinchi parallel ulangan PV modul zindoni bo‘lmagani sababli qo‘shni sxemadan orqaga tok yuz bermaydi va natijada xato joyidagi tok kamayadi.

7. Invertor samaradorligini oshirish choralari. Bu muhim jihat bo‘lib, afsuski, ko‘pincha muhandislar tomonidan e’tiborsiz qoladi. Invertorning samaradorligiga ta’sir qiluvchi omillar 4.4-bo‘limda muhokama qilingan. Tizim samaradorligini oshirishning eng samarali usullaridan biri PV massivini shunday loyihalashki, maksimal quvvatdagi kuchlanish (U_mp) invertorning nominal ishlash

kuchlanishiga yaqin bo‘lsin. Bu invertordagi kuchlanish oshirish bosqichidagi yo‘qotishlarni minimallashtiradi va natijada umumiy konversiya samaradorligini oshiradi.

Boshqa shartlar teng bo‘lsa, fotovoltaik modul massivini shunday sozlash tavsiya etiladi, maksimal quvvatdagi kuchlanish (V_mp) yozgi davrda nominal kuchlanishga iloji boricha yaqin bo‘lsin — aynan shu paytda issiqlik sharoitlari eng og‘ir va invertorning sovutish samaradorligi sezilarli darajada pasayadi. Ushbu sharoitlarda samaradorlikni maksimal qilish va issiqlik hosil bo‘lishini minimallashtirish muhim, bu ortiqcha qizish, quvvat cheklanishi va uskuna ishlash muddatining qisqarishini oldini oladi.

Qishda, fotovoltaik modul kuchlanishi nominaldan biroz yuqori bo‘ladi, bu issiqlik yo‘qotilishining oshishiga olib keladi; ammo sovutish sharoitlari qulayroq bo‘lgani uchun invertor ishlashiga sezilarli ta’sir qilmaydi.

Afsuski, so‘nggi yillarda PV modullarining quvvat ko‘rsatkichlari asosan tokning oshishi hisobiga o‘sdi, ishlash kuchlanishi esa amalda o‘zgarmadi. Natijada, invertor nominal kuchlanishiga yaqin standart kuchlanishda yig‘ilgan PV modullarning quvvati sezilarli darajada oshdi. Shu sababli, zamonaviy yuqori quvvatli PV elementlardan foydalanganda, V_mp atrofidagi bitta PV modulning umumiy quvvati osongina 10 kWgacha etadi va ba’zi hollarda oshib ketadi.

PV modullar va invertor nominal sharoitlari orasidagi nomuvofiqlikning eng muhim oqibati, faqat 1–2% samaradorlik pasayishi emas, balki issiqlik hosil bo‘lishining oshishi va invertor ichidagi haroratning ko‘tarilishidir. Masalan, 100 kW quvvatli PV stansiyada invertor samaradorligi atigi 2% kamayishi taxminan 2 kW qo‘shimcha issiqlik yo‘qotishiga olib keladi. Invertorning issiqlik balansini nominal kuchlanishda ishlash uchun loyihalangan, shuning uchun bu holat qurilma ichidagi haroratni oshiradi, ayniqsa yozda. Natijada, ortiqcha qizish tufayli invertor chiqish quvvati keskin kamayadi (temperature derating), shuningdek, elektron komponentlarning tezroq eskirishi va qisqarishi yuz beradi, bu esa uskuna ishlash muddati va tizim ishonchliligiga salbiy ta’sir ko‘rsatadi.

§4.4. Amaliy tajriba asosida loyiha yechimlarini tahlili

Ushbu bo‘limda O‘zbekiston bozorida mavjud bo‘lgan fotoelektr modullar va invertorlarni hisobga olgan holda, amaliy tajribaga asoslangan loyiha yechimlari ko‘rib chiqilgan.

1. 100 kW quvvatli tarmoqqa ulangan fotovoltaik tizim.

Loyiha yechimi: Huawei SUN2000–100KTL-M2 invertori (4.2-jadval) va 160 ta Jinko Solar JKM630N-66HL4M-BDV fotovoltaik modullari (4.3-jadval).

4.2– jadval. Huawei SUN2000-100KTL-M2 invertorining asosiy elektr xususiyatlari.

Parametr	**Qiymat**
Invertorning nominal aktiv quvvati	100 kW
cosφ=1 sharoitida invertorning maksimal aktiv quvvati	110 kW
Maksimal DC kirish kuchlanishi	1100 V
Ishlash MPPT kuchlanish diapazoni	200–1000 V
To‘liq yuklamada MPPT kuchlanish diapazoni	540–800 V
Ishga tushish kuchlanishi	200 V
Nominal kuchlanish	600 V
Maksimal ruxsat etilgan MPPT tok	30 A
Maksimal qisqa tutashuv toki	40 A
Maksimal MPPT quvvati	21 kW
MPPT soni	10

4.3 –jadval. MPPT kirish parametrlarining asosiy xususiyatlari

Parametr	**Qiymat**
MPPT uchun kirishlar soni (Har bir MPP treker uchun maksimal kirishlar soni)	2
Har bir kirish uchun maksimal tok (Har bir string uchun maksimal kirish tok)	20 A

4.4 –jadval. Jinko Solar JKM630N-66HL4M-BDV fotovoltaik modulining asosiy elektr xususiyatlari.

Parametr	**STC**	**BNPI**
Maksimal quvvat (Pmax), W	630	630
Maksimal quvvatdagi kuchlanish (Vmp), V	41,02	41,04
Maksimal quvvatdagi tok (Imp), A	15,36	16,95
Ochiq doira kuchlanishi (Voc), V	49,48	49,46
Qisqa tutashuv tok (Isc), A	16,20	17,90
FIK, %	23,32	–
Voc ning harorat koeffitsienti, %/°C	-0,25	–
Isc ning harorat koeffitsienti, %/°C	0,045	–
Pmp ning harorat koeffitsienti, %/°C	-0,29	–

Yechim: 10 ta fotovoltaik blok shakllantirish, har biri 16 ta PV moduldan iborat. Bitta PV blokdagi fotovoltaik modullar bir xil qiyalik burchak va azimutga ega bo‘lib, bitta qatorga o‘rnatiladi.

1.1. STC sharoitida barcha fotovoltaik modullarning quvvati:

$$\boldsymbol{P_{mp\,STC} = 160 \cdot P_{mp} = 160 \cdot 130 = 100.8\ kW}$$

Umumiy ma’lumot uchun, -20°C minimal harorat sharoitida nazariy chiqarish quvvati quyidagicha taqdim etiladi:

$$\mathrm{P_{mp}} = \mathrm{N} \cdot \mathrm{P_{mp\,STC}} \cdot (1 + \mathrm{K_p} \cdot \frac{(\mathrm{t} - 25)}{100} = 160 \cdot 630 \cdot (1 - 0.29 \cdot \frac{-20 - 25}{100})$$

$$= 114\ \mathrm{kW}$$

Shuni ta’kidlash kerakki, bunday chiqish quvvati O‘zbekiston sharoitida amalda deyarli erishib bo‘lmaydi. Bu hodisa shundan kelib chiqadiki, tok elementlardan oqganda ularni qizdiradi, natijada amaldagi harorat hisoblangan minimal darajadan oshadi.

Bundan tashqari, mintaqadagi quyosh nuri darajasi odatda STC parametrlariga asos bo‘lgan standart 1000 W/m² dan past bo‘ladi. Hatto kamdan-kam hollarda element harorati −20 °C ga yaqinlashib, quyosh nuri 1000 W/m² ga

etganda ham, invertor ish nuqtasini Volt-Amper xususiyat chizig‘i bo‘ylab siljitish orqali chiqish quvvatini cheklaydi.

Umumiy ma’lumot uchun, maksimal hisoblangan element harorati +70 °C bo‘lgan sharoitda nazariy chiqish quvvati quyidagicha:

$$P_{mp} = N \cdot P_{mp\,STC} \cdot (1 + K_p \cdot \frac{(t - 25)}{100} = 160 \cdot 630 \cdot (1 - 0.29 \cdot \frac{70 - 25}{100}) = 87.6\ kW$$

Ko‘rsatilganidek, yozgi davrda quyosh panellari tomonidan ishlab chiqarilgan quvvat haroratning oshishi sababli kamayadi, bu esa invertorning qisman yuklamaini kamaytirishga yordam beradi. Muhimi, tok tomondagi harorat sababli yuzaga keladigan ishlab chiqarish kamayishini invertorning ichki aylanishdagi yo‘qotishlari bilan aralashtirmaslik kerak.

Minimal hisoblangan dizayn harorati −20 °C bo‘lgan PV modulning maksimal ochiq davr kuchlanishi (Voc) quyidagicha:

$$V_{OC} = N \cdot V_{OC\,STC} \cdot (1 + K_p \cdot \frac{(t - 25)}{100} = 16 \cdot 49.48 \cdot (1 - 0.25 \cdot \frac{-20 - 25}{100}) = 880\ V$$

Hisoblangan maksimal ochiq davr kuchlanishi MPPT ning ishlash diapazonidan oshmaydi, uning yuqori chegarasi 1000 V ga teng.

1.2. Minimal dizayn harorati −20 °C bo‘lgan PV modulning maksimal quvvat kuchlanishi (Vmp) quyidagicha:

$$V_{mp} = N \cdot V_{mp\,STC} \cdot (1 + K_p \cdot \frac{(t - 25)}{100} = 16 \cdot 41.02 \cdot (1 - 0.25 \cdot \frac{-20 - 25}{100}) = 730\ V$$

Minimal dizayn harorati sharoitida Vmp butun yuklama MPPT kuchlanish diapazonida joylashgan bo‘lib, bu invertorga maksimal quvvatni etkazish imkonini beradi.

1.3. Maksimal dizayn element harorati +70 °C bo‘lgan PV modulning maksimal quvvat kuchlanishi (Vmp) quyidagicha:

$$\boldsymbol{V_{mp} = N \cdot V_{mp\,STC} \cdot (1 + K_p \cdot \frac{(t - 25)}{100}}$$

$$\boldsymbol{= 16 \cdot 41.02 \cdot (1 - 0.25 \cdot \frac{70 - 25}{100}) = 582V}$$

Hisoblangan maksimal element haroratida maksimal quvvat kuchlanishi (Vmp) nominal kuchlanishga yaqin bo‘lib, bu invertor samaradorligini oshiradi va

qo‘shimcha issiqlik yuklamalanishini oldini oladi. Bu, ayniqsa, yuqori harorat sharoitlarida muhim, chunki issiqlikni samarali tarqatish qiyinlashadi.

Eslatma. Hisoblangan maksimal element harorati o‘rnatish hududiga qarab farq qilishi mumkin. Keltirilgan misollarda 70°C qiymati qabul qilingan, chunki bu fotovoltaik modulning texnik pasportida ko‘rsatilgan ish harorati diapazonining yuqori chegarasiga mos keladi. Shu bilan birga, ishlab chiqaruvchi vakillari modul sinovlari +85°C gacha haroratda o‘tkazilganini ta’kidlamoqda; ammo bu ma’lumot rasmiy texnik spetsifikatsiyada hujjatlashtirilmagan va mahsulot datasheetiga kiritilmagan.

1.4. Maksimal qisqa tutashuv toki (+70°C maksimal hisoblangan element haroratida)

Maksimal hisoblangan element haroratida PV modulining qisqa tutashuv toki MPPT kontrollerining maksimal ruxsat etilgan kirish tokidan oshmasligi kerak. Shu bilan birga, termal barqarorlikni va invertor kirish zanjirlarining ishonchliligini ta’minlash maqsadida tavsiya etiladi, qisqa tutashuv toki maksimal qiymatning 80% ni oshmasligi kerak. Agar bir MPPT ga ikki PV modul parallel ulangan bo‘lsa, ikki modulning jami qisqa tutashuv toki hisobga olinadi.

$$\boldsymbol{I_{sc} = I_{sc\,STC} \cdot (1 + K_I \cdot \frac{(t - 25)}{100} = 16.20 \cdot (1 + 0.045 \cdot \frac{70 - 25}{100})}$$
$$\boldsymbol{= 16.52A}$$

BNPI sharoitida (+70°C maksimal hisoblangan element haroratida) PV modulining maksimal qisqa tutashuv toki quyidagicha bo‘ladi:

$$\boldsymbol{I_{sc} = I_{sc\,BNPI} \cdot (1 + K_I \cdot \frac{(t - 25)}{100} = 17.90 \cdot (1 + 0.045 \cdot \frac{70 - 25}{100}) = 18.3A}$$

MPPT invertor kirishidagi ruxsat etilgan maksimal qisqa tutashuv toki 40 A bo‘lganligi va har bir MPPT faqat bitta fotovoltaik modulga ulanganligi sababli, tok xavfsizlik marjasi ikki barobardan oshadi.

1.5. Fotovoltaik modullar va fotovoltaik massivning maksimal quvvat nuqtasidagi toki (Imp) bilan invertor kirishi (PV input) mosligini tekshirish:

$$\boldsymbol{I_{max\,PV\,input} = 20A > I_{mp\,STC} = 15.36A}$$

Shu bilan, agar mos keluvchi MC4 turidagi konnektorlar ishlatilsa va ulanishlar ishonchli tarzda mahkamlangan bo‘lsa, bitta PV massivni invertor kirishiga ulash PV kirishining ortiqcha qizishini keltirib chiqarmaydi.

1.6. Har bir MPPT ga faqat bitta PV modul ulanishini hisobga olib, PV modul toki bilan MPPT ning ruxsat etilgan maksimal tokiga muvofiqlikni tekshirish:

$$\boldsymbol{I_{max\ MPPT} = 30A > I_{mpSTC} = 15.36A}$$

MPPT kirishidagi ruxsat etilgan maksimal tok kuchi, PV modulning maksimal quvvat nuqtasidagi tok kuchidan ikki baravardan ortiq katta. Shu bilan invertor tomonidagi tok kuchi cheklanishiga bog‘liq yo‘qotishlar oldi olinadi.

1.7. Har bir MPPT ga faqat bitta PV modul ulanayotganini hisobga olib, PV modulning quvvat ko‘rsatkichini MPPT ning ruxsat etilgan maksimal quvvat ko‘rsatkichiga muvofiqligini tekshirish:

$$\boldsymbol{P_{max\ MPPT} = 21kW > P_{mpSTC\ PV\ module} = 16 \cdot 630 = 10.08kW}$$

MPPT kirishidagi ruxsat etilgan maksimal quvvat, fotovoltaik blok (PV modul) o‘rnatilgan quvvatidan ikki baravardan ortiq yuqori. Shu bilan invertor tomonidagi quvvat cheklanishiga bog‘liq yo‘qotishlar bartaraf etiladi.

Xulosa. Taklif qilingan yechim quyidagi jihatlarga ko‘ra optimal hisoblanadi:

- Har bir MPPT faqat bitta fotovoltaik modulning (PVM) maksimal quvvat nuqtasini kuzatishi tufayli maksimal MPPT samaradorligi ta’minlanadi.
- Elektr xavfsizligi oshiriladi, chunki qo‘shni PVM lardan keladigan qisqa tutashuv toki faqat bitta PVM MPPT-ga ulanib, oldi olinadi.
- PV modullarning optimal ishlash kuchlanishi, ayniqsa yoz davrida ta’minlanadi, bu invertor samaradorligini oshiradi va issiqlik yo‘qotishlarini kamaytiradi.
- Turli MPPT larga ulanadigan barcha PV modullarning kuchlanishi bir xil bo‘lib, bu nafaqat tizim loyihalash, ishga tushirish va ekspluatatsiyasini soddalashtiradi, balki umumiy DC shinadagi yuklamani teng taqsimlaydi va invertor barqarorligini oshiradi.
- Ikki baravardan ortiq tok zaxirasi ta’minlanadi, bu esa issiqlik hosil bo‘lishining kvadratga bog‘liqligini hisobga olganda, to‘rt baravardan ortiq issiqlik

zaxirasini beradi va MPPT hamda boshqa invertor komponentlarining xizmat muddatini uzaytiradi.

O‘zbekiston sharoitidagi quyosh nuri darajasi va yetarli maydon mavjudligi hamda mijozning roziligi bilan barcha PVPP bloklaridagi modul sonini 16 tadan 17 taga oshirish mumkin. Shu tarzda, har biri 17 moduldan iborat 10 ta PVPP bloki yig‘ish orqali o‘rnatilgan quvvat minimal qo‘shimcha xarajat bilan oshiriladi va yillik ishlab chiqarish hajmi ortadi.

Har bir PVPP blokiga bitta fotovoltaik modul qo‘shish, chiqish quvvati va kuchlanishni oshiradi, tok esa o‘zgarmaydi, chunki modullar ketma-ket ulangan. Shu bilan birga, MPPT invertoridagi ruxsat etilgan quvvat va maksimal kirish kuchlanishi bo‘yicha ulanadigan imkoniyatni qo‘shimcha tekshirish talab etiladi.

1.8. STC sharoitida barcha fotovoltaik modullarning jami quvvati:

$$\mathbf{P_{mp\,STC} = 170 \cdot P_{mp} = 16 \cdot 630 = 107.1\ kW}$$

1.9. Minimal dizayn harorati −20 °C da PV modulning maksimal ochiq davr kuchlanishi (Voc):

$$\boldsymbol{V_{oc} = N \cdot V_{oc\,STC} \cdot (1 + K_V \cdot \frac{(t - 25)}{100}}$$

$$\mathbf{= 17 \cdot 49.48 \cdot (1 - 0.25 \cdot \frac{-20 - 25}{100}) = 936V}$$

Maksimal hisoblangan ochiq zanjir kuchlanishi MPPTning ishlash kuchlanishi diapazonini oshmaydi, uning yuqori chegarasi 1000 V.

1.10. Minimal dizayn harorati −20 °C da PV modulning maksimal quvvat kuchlanishi (V_{mp}):

$$V_{mp} = N \cdot V_{mp\,STC} \cdot (1 + K_V \cdot \frac{(t - 25)}{100} = 17 \cdot 41.02 \cdot (1 - 0.25 \cdot \frac{-20 - 25}{100}) = 776\ V$$

V_{mp} minimal dizayn haroratida to‘liq yuklama MPPT voltaj diapazonida joylashgan bo‘lib, bu invertorning maksimal quvvat etkazib berish qobiliyatini ta’minlaydi.

1.11. Maksimal hisoblangan element harorati +70 °C da PV modulning maksimal quvvat voltaji (Vmp):

$$V_{mp} = N \cdot V_{mp\,STC} \cdot (1 + K_V \cdot \frac{(t - 25)}{100}$$

$$= 17 \cdot 41.02 \cdot (1 - 0.25 \cdot \frac{70 - 25}{100}) = 618\,V$$

Maksimal hisoblangan element haroratida (Vmp) maksimal quvvat voltaji nominal voltajga yaqin bo‘lib, bu invertorning samaradorligini oshiradi va qo‘shimcha issiqlik stresslarining oldini oladi.

1.12. Faqat bitta PV modul bitta MPPT ga ulanganligini hisobga olgan holda PV modulning quvvat ko‘rsatkichi va MPPT maksimal ruxsat etilgan quvvati mosligini tekshirish:

$$P_{max\,MPPT} = 21kW > P_{mp\,STV\,PV\,module} = 17 \cdot 630 = 10.7\,kW$$

MPPT ga ruxsat etilgan maksimal kirish quvvati PV modulning nominal quvvatidan deyarli ikki barobar yuqori. Shu sababli, invertorning quvvatni cheklash tufayli yuzaga keladigan yo‘qotishlar bartaraf etiladi.

Shunday qilib, har bir fotovoltaik blok uchun 17 ta PV modul bilan konfiguratsiya tanlangan invertor va PV modullar kombinatsiyasi uchun optimal hisoblanadi. O‘zbekistondagi yuqori quyosh nurlanishi darajalarini hisobga olgan holda bu usul uskunaning quvvat salohiyatini maksimal samarali ishlatishga imkon beradi, ruxsat etilgan elektr parametrlarini oshirmasdan.

Amaliyotda, kamdan-kam hollarda, barcha mavjud invertor kirishlari to‘liq ishlatiladigan fotovoltaik stansiyalar mavjud. 10 kWdan ortiq quvvatga ega PV stansiya uchun bu faqat har bir PV blokdagi modullar sonini mantiqsiz kamaytirish orqali amalga oshirilishi mumkin. Masalan, tahlil qilingan holatda 20 ta kirishga ulanish uchun PFB faqat 8 moduldan tashkil etilishi kerak bo‘ladi. Ushbu yechim texnik jihatdan maqbul emas, chunki bu voltajni ikki barobar kamaytiradi va shu bilan invertorning samaradorligini pasaytiradi (nominal darajaga etkazish uchun voltajni qo‘shimcha oshirish zarurati paydo bo‘ladi). Shu bilan birga, tok ikki barobar oshadi, invertor kirishida maksimal ruxsat etilgan tokga etadi va issiqlik yo‘qotishlari ortadi. Bundan tashqari, quyosh kabeli xarajatlari ham oshadi — talab qilinadigan miqdor ko‘payishi tufayli.

2. Quvvatlari 20–60 kWgacha bo‘lgan fotovoltaik stansiyalar 10 kWgacha quvvat uchun bitta MPPT bilan jihozlangan invertorlardan foydalanadi. PV modullarning quvvati ortishi bilan invertor konfiguratsiyalari mos ravishda moslashtiriladi. Hozirgi bozor invertorlarida har 10 kWgacha quvvat uchun bitta MPPT nazoratchisi mavjud. Shuning uchun, 20, 30, 40, 50 va 60 kW quvvatga ega modellarda odatda mos ravishda 2, 3, 4, 5 va 6 MPPT mavjud bo‘ladi. Bunday hollarda, 100 kWli stansiya misolida tavsiya etilgan yondashuvni qo‘llash maqsadga muvofiq — har bir MPPTga faqat bitta PV modul zanjirini ulash.

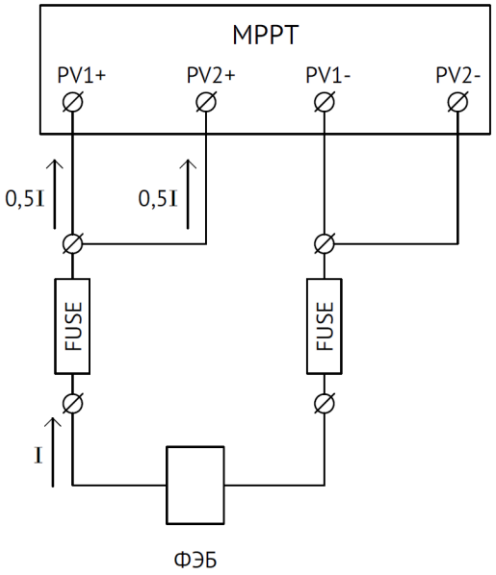
Har bir zanjir uchun maksimal ruxsat etilgan tokga (Max. input current per string) alohida e’tibor berish zarur. Ko‘plab invertorlar bir MPPTda jami tokni 32 A gacha ruxsat etsa-da, ishlab chiqaruvchilar (shu jumladan texnik konsultatsiyalar orqali) har bir kirish uchun 16 A dan oshmaslikni tavsiya qiladi. Ushbu qiymat bozor PV modullari uchun ko‘pchilik hollarda maqbul hisoblanadi, ayniqsa amaldagi quyosh nurlanishi darajalarini hisobga olgan holda.

Ammo, so‘nggi paytlarda 700 W va undan yuqori quvvatga ega modullar ko‘proq paydo bo‘lmoqda, ularning maksimal quvvat nuqtasidagi toki 18–20 A ga yaqinlashadi. Bunday modullarni ishlatish yuqori e’tibor talab qiladi, chunki:
• ularning yuqori quvvati asosan samaradorlik oshishi bilan emas, balki maydon (korpus) oshishi orqali erishiladi,

• og‘irligi va o‘lchami kattalashadi,

• ortiqcha toklar invertorning kirish sxemalari, konnektorlar va kabel ulanishlarida ortiqcha isish xavfini keltirib chiqarishi mumkin.

Shu nuqtai nazardan, imkon qadar har doim past quvvatli va toki 16 A gacha bo‘lgan modullarga ustuvorlik berish tavsiya etiladi. Agar biror sababga ko‘ra bunday modullardan foydalanish zarur bo‘lsa, oldindan invertor ishlab chiqaruvchisi texnik yordamiga murojaat qilib, har bir kirish uchun ruxsat etilgan maksimal tokni aniqlashtirish lozim. Bunday hollarda, ba’zi ishlab chiqaruvchilar bitta PV modulini bir MPPT ning ikkita kirishiga ulashni tavsiya qiladi, bu orqali har bir kirishga tushadigan tok yarimga kamaytiriladi (qarang: 4.16-rasmga qarang).



4.16 –rasm. Yuqori tokli bitta PV modulni bitta MPPTning ikkita kirishiga ulash.

3. 50 kW quvvatga ega fotovoltaik elektr stansiyasi, to‘rtta MPPT bilan jihozlangan invertorlardan foydalanilgan holat.

Bozorda 10 kW quvvatga bir MPPT ga nisbatan kamroq MPPT kontrollerlariga ega invertorlar mavjud. Misol sifatida, eng keng tarqalgan invertorlardan biri — Huawei SUN2000-50KTL-M3 invertoriga asoslangan dizayn yyechimini ko‘rib chiqamiz. Bu invertor to‘rtta MPPT bilan jihozlangan va nominal quvvati 50 kW. Invertorning asosiy elektr xususiyatlari 4.4-jadvalda keltirilgan.

4.4–jadval. Huawei SUN2000-50KTL-M3 invertorining asosiy elektr xususiyatlari.

Parametr	**Qiymat**
Invertorning nominal aktiv quvvati	50 kW
Invertorning maksimal aktiv quvvati (cosφ=1)	55 kW
Maksimal DC kirish kuchlanishi	1100 V
MPPT ishlash kuchlanish diapazoni	200–1000 V
To‘liq yuklamada MPPT kuchlanish diapazoni	530–800 V
Ishga tushirish kuchlanishi	200 V
Nominal kuchlanish	600 V

MPPT uchun maksimal ruxsat etilgan tok	30 A
Maksimal qisqa tutashuv toki	40 A
MPPT maksimal quvvati	18.3 kW
MPPT soni	4
Har bir MPPT uchun kirishlar soni	2
Har bir kirish uchun maksimal tok	20 A

Jinko Solar mahsulotlariga e’tibor qaratadigan bo‘lsak, hozirgi O‘zbekiston bozorida asosan ikki turdagi fotovoltaik modullar mavjud: 66 elementli konfiguratsiyalar (66HL4 seriyasi) va 72 elementli konfiguratsiyalar (72HL4 seriyasi). Keyinchalik, ikkala variant Huawei SUN2000-50KTL-M3 invertori bilan mosligini hisobga olgan holda ko‘rib chiqiladi.

Avvalo, ilgari 100 kW quvvatga ega fotovoltaik stansiya konfiguratsiyasida ishlatilgan va isbotlangan optimal yyechim bo‘lgan Jinko Solar JKM630N-66HL4M-BDV modulini (4.3-jadval) ko‘rib chiqamiz. Bu yechim, har bir 10 kW o‘rnatilgan quvvatga bitta MPPT nazoratchi bilan jihozlangan invertorni ishlatishda ham dolzarb hisoblanadi.

JKM630N-66HL4M-BDV moduliga asoslangan yyechim 80 ta fotovoltaik modulni, jami 50,4 kW o‘rnatilgan quvvat bilan, 5 ta fotovoltaik blokka (PVB) joylashtirishni o‘z ichiga oladi, har bir blok 16 moduldan iborat. Kirish kuchlanishlari nuqtai nazaridan, Huawei SUN2000-100KTL-M2 va SUN2000-50KTL-M3 invertorning xarakteristikasi amalda bir xil. Har bir PV massividagi modul soni o‘zgarmaganligi sababli 100 kW stansiya uchun ilgari amalga oshirilgan barcha hisob-kitoblar bu erda ham amal qiladi.

Biroq, jami PV massivlari soni besh bo‘lganligi va invertorning to‘rtta MPPT nazoratchisi mavjudligi sababli, ikkita PV massivi bitta MPPT nazoratchisiga ulanadi. Shu sababli, mos MPPT kirishida tok va quvvat reytinglarining mosligini qayta tekshirish zarur.

Ilgari hisoblanganidek, bir fotovoltaik blokning maksimal qisqa tutashuv toki (PV blok) dizayn maksimal element harorati +70°C sharoitida STC sharoitida 16,52

A va BNPI sharoitida 18,3 A ni tashkil qiladi. Ikkita PV bloki bitta MPPT ga ulanganligi sababli, ularning yig‘ma toki hisobga olinadi. Shu tariqa MPPT kirishidagi qisqa tutashuv toki STC sharoitida 33 A va BNPI sharoitida 36,6 A ni tashkil qiladi, bu esa ruxsat etilgan maksimal 40 A dan past.

Rekomendatsiya qilingan 25% xavfsizlik marjasi bu yerda ta’minlanmagan bo‘lsada, qiymatlar O‘zbekistonning amaldagi iqlim sharoitini hisobga olganda qabul qilinadigan chegaralarda qoladi, chunki quyosh nuri BNPI maksimal qiymatlariga deyarli yetmaydi.

Kritikroq tekshiruv MPPT uchun maksimal ruxsat etilgan ishchi tokiga tegishli. Ikkita PV modulning maksimal quvvat nuqtasidagi yig‘ma toki STC sharoitida 30,7 A va BNPI sharoitida 33,9 A ni tashkil qiladi. Ko‘rinib turibdiki, ma’lum darajadagi quyosh nuri sharoitida MPPTning maksimal ruxsat etilgan qiymati (30 A) oshishi mumkin. Biroq, MPPT nazoratchisi tokni belgilangan limitdan oshirishga ruxsat bermaydi; 30 A ga etganda u ish nuqtasini quvvatni kamaytirish tomon siljitadi, shu bilan chiqish generatsiyasini cheklaydi. Bu ayniqsa yuqori insolyatsiya davrida qisman yo‘qotishlarga olib keladi.

Shunga qaramay, O‘zbekiston sharoitida bunday holatlar kam va qisqa muddatli bo‘ladi. Amaliy kuzatishlarga ko‘ra, yil davomida tok kuchi ko‘pincha 15 A dan oshmaydi. Shu sababli, formal tarzda sezilarli generatsiya yo‘qotishlari kutilmaydi va bu yyechim qabul qilinadigan hisoblanadi.

Biroq, muhimroq masala shundaki, MPPT maksimal tok chegarasiga yaqin ishlaydi (30 A), bu esa kuch komponentlarining tezroq eskirishiga, issiqlik tarqalishining ortishiga va invertorning uzoq muddatli ishonchliligining pasayishiga olib kelishi mumkin. Shu sababli, imkoniyat bo‘lsa bunday yyechimlardan qochish tavsiya etiladi.

Keling, ikki PV modulning jami quvvatini bitta MPPT maksimal ruxsat etilgan quvvatiga mosligini tekshiramiz:

$$\boldsymbol{P_{max\ MPPT} = 18.3kW < 2.2_{mp\ STC\ PV\ module} = 2 \cdot 16 \cdot 630 = 20.2kW}$$

Ko‘rinib turibdiki, ikki PV modulning quvvati bitta MPPT quvvatidan oshadi; shuning uchun MPPT chiqish quvvatini 18,3 kWda cheklaydi va ko‘p vaqt davomida shu cheklovda ishlaydi (power clipping).

Ushbu muammo MPPT nazoratchilari orasida yuklamani qayta taqsimlash orqali hal qilinishi mumkin: 6 ta fotovoltaik blok (PVB) hosil qilish — har biri 13 moduldan iborat to‘rtta blok va har biri 14 moduldan iborat ikki blok. Shu konfiguratsiyada, 13 modulga ega to‘rtta PV blok ikkita MPPT nazoratchisiga juftlangan holda ulanadi, natijada har bir nazoratchida jami quvvat taxminan 16,4 kW ni tashkil qiladi.

Biroq, bu yechim MPPT nazoratchilariga kirish tokining ortishi muammosini butunlay hal qilmaydi, ularning toki hali ham 30 A ga etadi va yangi texnik muammo — PV bloklar (PVB) kuchlanishining pasayishi yuzaga keladi. Bu esa ayniqsa yoz oylarida, 13 moduldan iborat PV massiv kuchlanishi 500 V dan pastga tushishi mumkinligi sababli invertorning qo‘shimcha issiqlik yo‘qotishlariga olib keladi.

Izoh. Ko‘rib chiqilgan misollarda PV modullari soni shunday tanlanganki, stansiyaning jami o‘rnatilgan quvvati invertorning nominal quvvat reytingiga imkon qadar yaqin bo‘lsin. Buning sababi shundaki, O‘zbekistondagi ko‘plab tijorat loyihalarida shartnoma quvvati va shu bilan birga o‘rnatish qiymati fotovoltaik stansiyaning nominal quvvatiga asoslanadi.Agar mijoz tomonidan bunday cheklovlar mavjud bo‘lmasa, ko‘proq PV massivlardan foydalanish tavsiya etiladi — barcha fotovoltaik bloklarda (PV bloklarda) modullar soni teng bo‘lishi hisobga olinadi. Bu yondashuv dizayn va o‘rnatishni soddalashtiradi, tok va kuchlanish balansini saqlashni osonlashtiradi hamda invertorning yanada bir xilda va samarali ishlashini ta’minlaydi.

Endi 72 ta elementli fotovoltaik modullarga asoslangan muqobil dizayn yechimini ko‘rib chiqamiz — Jinko Solar JKM600N-72HL4-BDV, uning asosiy elektr xususiyatlari 4.5-jadvalda keltirilgan. Ushbu dizayn yechimi 84 moduldan iborat bo‘lib, ular 6 ta fotovoltaik blokka (PV blok) birlashtiriladi, har biri 14 modulni o‘z ichiga oladi. Shulardan to‘rtta fotovoltaik blok ikki MPPTga ulangan

bo‘ladi, har MPPTga ikki PV blok biriktiriladi, qolgan ikkita blok esa boshqa ikki MPPTga ulanadi, har MPPTga bitta PV blok biriktiriladi.

4.5-jadval. JKM600N-72HL4-BDV modulining asosiy elektr xususiyatlari.

Parametr	**STC**	**BNPI**
Maksimal quvvat (P_{max}), W	600	660
Maksimal quvvat kuchlanishi (V_{mp}), V	44,45	44,66
Maksimal quvvatdagi tok (I_{mp}), A	13,50	14,78
Ochiq davr kuchlanishi (V_{oc}), V	53,30	53,33
Qisqa tutashuvdagi tok kuchi (I_{sc}), A	14,19	15,49
FIK, %	23,23	—
V_{oc} ning harorat koeffitsienti, %/°C	-0,25	—
I_{sc} ning harorat koeffitsienti, %/°C	0,045	—
P_{mp} ning harorat koeffitsienti, %/°C	-0,29	—

3.1. STC sharoitida barcha fotovoltaik modullarning quvvati:

$$\boldsymbol{P_{mp\,STC} = 6 \cdot 14 \cdot P_{mp} = 84 \cdot 600 = 50.4\ kW}$$

3.2. Minimal dizayn harorati −20°C bo‘lgan paytda PV modulining maksimal hisoblangan ochiq davr kuchlanishi:

$$\boldsymbol{V_{oc} = N \cdot V_{oc\,STC} \cdot (1 + K_V \cdot \frac{(t - 25)}{100} = 14 \cdot 53.30 \cdot (1 - 0.25 \cdot \frac{-20 - 25}{100})}$$

$$\boldsymbol{= 830\ V}$$

Maksimal hisoblangan ochiq zanjir kuchlanishi MPPTning ishchi kuchlanish diapazonini oshmaydi, uning yuqori chegarasi 1000 V. 3.3. PV modulining minimal loyihaviy harorati −20°C bo‘lgan paytdagi maksimal quvvat kuchlanishi (Vmp):

$$\boldsymbol{V_{mp} = N \cdot V_{mp\,STC} \cdot (1 + K_V \cdot \frac{(t - 25)}{100} = 14 \cdot 44.45 \cdot (1 - 0.25 \cdot \frac{-20 - 25}{100})}$$

$$\boldsymbol{= 692V}$$

V_{mp} minimal loyihaviy haroratda to‘liq yuklanmalangan MPPT kuchlanish diapazonida joylashgan bo‘lib, invertorning maksimal quvvatni etkazish imkoniyatini ta’minlaydi.

3.4. PV modulining maksimal hisoblangan element harorati +70°C bo‘lgan paytdagi maksimal quvvat kuchlanishi (Vmp):

$$\boldsymbol{V_{mp} = N \cdot V_{mp\,STC} \cdot (1 + K_V \cdot \frac{(t-25)}{100} = 16 \cdot 44.45 \cdot (1 - 0.25 \cdot \frac{70-25}{100})}$$

$$\boldsymbol{= 552\,V}$$

Hisoblangan maksimal element haroratida Vmp nominal qiymatdan 50 V past bo‘ladi. Hisob-kitob maksimal mumkin bo‘lgan ishlash harorati uchun bajarilgani hisobga olinsa, bu natija maqbul hisoblanadi. Bundan tashqari, olingan Vmp qiymati to‘liq yuklama ostida MPPT kuchlanish diapazonida qoladi.

3.5. PV modulining maksimal hisoblangan element harorati +70°C bo‘lgan paytdagi maksimal qisqa tutashuv toki (Isc):

$$\boldsymbol{I_{sc} = I_{sc\ STC} \cdot (1 + K_I \cdot \frac{(t-25)}{100} = 14.19 \cdot (1 + 0.045 \cdot \frac{70-25}{100}) = 14.47V}$$

BNPI sharoitida, maksimal hisoblangan element harorati +70°C bo‘lgan paytdagi maksimal qisqa tutashuv toki (I_{sc}):

$$\boldsymbol{I_{sc} = I_{sc\ BNPI} \cdot (1 + K_I \cdot \frac{(t-25)}{100} = 15.49 \cdot (1 + 0.045 \cdot \frac{70-25}{100}) = 15.8A}$$

STC sharoitida umumiy qisqa tutashuv toki 30 A ni oshmaydi, bu MPPT kirishidagi maksimal ruxsat etilgan tokga nisbatan 25% dan ortiq zaxira beradi.

3.6. Ikki fotovoltaik blokning (PFB) maksimal quvvat nuqtasidagi jami tok (Imp) STC sharoitida 27 A, BNPI sharoitida 29,56 A bo‘lib, MPPT kirishidagi 30 A ruxsat etilgan qiymatni oshmaydi. O‘zbekistonning iqlim sharoitlarini hisobga olganda, cho‘qqi soatlarida ham jami tok odatda 26 A dan oshmaydi. Shu sababli, ushbu konfiguratsiyada MPPT yuklanishi JKM630N-66HL4M-BDV modullariga asoslangan yechimga nisbatan pastroq bo‘lib, bu invertorning issiqlik rejimi va ishonchliligiga ijobiy ta’sir ko‘rsatadi.

3.7. Ikki PV massivni MPPT ga ulashni hisobga olgan holda PV massiv quvvati va MPPT maksimal ruxsat etilgan quvvati mosligini tekshirish:

$$\boldsymbol{P_{max\,MPPT} = 18.3kW < 2 \cdot P_{mp\,STV\,PV\,module} = 2 \cdot 14 \cdot 600 = 16.8\,kW}$$

Xulosa. Taqdim etilgan hisob-kitoblardan ko‘rinib turibdiki, Huawei SUN2000-50KTL-M3 invertori uchun — konfiguratsiyada bitta MPPT ga ikkita

fotovoltaik blokni (PVB) ulash talab etilgan holatda — 72HL4 arxitekturasiga ega modullardan foydalanish 66HL4M modullariga nisbatan aniqroq va muvozanatli yechimdir. 72 ta elementli modullar pastroq tok va yuqoriroq kuchlanish beradi, bu esa tok ortiqcha yuklanishini oldini olish, issiqlik yo‘qotishlarini kamaytirish va MPPT ni optimal kuchlanish diapazonida ishlashini ta’minlashga imkon beradi, har bir PVB uchun kamroq fotovoltaik modul (PVM) talab qilinadi.

Amalda “bir MPPT — bir PV zanjir” sxemasini amalga oshirib bo‘lmaydigan hollarda, kamroq tokli va yuqoriroq kuchlanishli fotovoltaik modullardan foydalanish optimal yechim hisoblanadi. Bunday modullar odatda invertor kirishlarida yuklamani samarali taqsimlash, issiqlik yo‘qotishlarini kamaytirish va MPPT ni optimal diapazonda ishlashini ta’minlash imkonini beradi.
Shuningdek, past tokli, yuqori kuchlanishli modullar xususiy sektordagi fotovoltaik elektr stansiyalarida deyarli har doim ustun tanlov hisoblanadi.

6.3-bo‘limda allaqachon Huawei SUN2000-10KTL-M1-HC invertori va JKM630N-78HL4 hamda JKM630N-66HL4 modullari asosida 10 kW quvvatga ega fotovoltaik stansiya dizayn yechimi batafsil ko‘rib chiqilgan. Ushbu mavzuga qaytmaymiz, lekin JKM630N-78HL4 varianti texnik va ekspluatatsion xususiyatlar kombinatsiyasi bo‘yicha afzallikni berganini ta’kidlash lozim.

Eslatma. 78HL4 va 72HL4 seriyali fotovoltaik modullar tok xususiyatlari bo‘yicha amalda deyarli bir xil hisoblanadi. 78HL4 modul seriyasining oshirilgan quvvati modul tuzilishiga qo‘shilgan olti qo‘shimcha kremniy elementlari orqali yuqoriroq chiqish kuchlanishi hisobiga erishiladi. Shuning uchun taqqoslash uchun keltirilgan misollarda 66HL4M seriyasidan modullar va 72HL4 yoki 78HL4 seriyasidagi modullardan biri ishlatilgan — bu esa ko‘rib chiqilayotgan masalaning mohiyatini tushuntirish maqsadiga eng mos keladigan modulga bog‘liq. 4.6 va 4.7-jadvalda 72HL4 va 78HL4 seriyali fotovoltaik modullarning asosiy elektr xususiyatlari keltirilgan.

4.6-jadval. 72HL4 seriyali PV modullarining asosiy elektr xususiyatlari.

Pmp, W	**575**	**580**	**585**	**590**	**595**	**600**

Vmp, V	43,73	43,88	44,02	44,17	44,31	44,45
Imp, A	13,15	13,22	13,29	13,36	13,43	13,50
Voc, V	52,30	52,50	52,70	52,90	53,10	53,30
Isc, A	13,89	13,95	14,01	14,07	14,13	14,19
FIK, %	22,26	22,45	22,65	22,84	23,03	23,23

4.7-jadval. 78HL4 seriyali PV modullarining asosiy elektr xususiyatlari.

Pmp, W	**625**	**630**	**635**	**640**	**645**	**650**
Vmp, V	47,54	47,70	47,86	48,02	48,17	48,33
Imp, A	13,15	13,21	13,27	13,33	13,39	13,45
Voc, V	56,95	57,08	57,21	57,34	57,47	57,60
Isc, A	13,80	13,86	13,92	13,98	14,04	14,10
FIK, %	22,36	22,54	22,72	22,90	23,07	23,25

4. Kichik quvvatli fotovoltaik stansiyalarni loyihalash. Kichik quvvatli fotovoltaik stansiyalar odatda ikkita MPPT kontroller bilan jihozlanadi. Biroq, fotovoltaik modullarning quvvat reytingi, asosan tokning ortishi hisobiga oshgani sababli, nominal qiymatga yaqin kuchlanishda fotovoltaik bloklar (PVB) loyihalashtirish qiyinlashadi, ayniqsa ikkala MPPT kontroller ishlatilganda.

Baxtga qarshi, 6 kW dan kam quvvatga ega ko‘plab invertorlarda har bir MPPT uchun ruxsat etilgan maksimal quvvat invertorning nominal quvvatidan yuqori bo‘ladi. Masalan, 6 kW yoki undan kam quvvatga ega yagona fazali Huawei invertorlar uchun har bir MPPT uchun maksimal ruxsat etilgan quvvat 6,6 kW ni tashkil etsa, shu quvvatdagi uch fazali invertorlar uchun har bir MPPT 8,8 kW gacha etadi. Bu shuni anglatadiki, voltaj talablari bajarilganda bitta MPPT dan foydalanish mumkin, bu esa ko‘proq modul soniga ega fotovoltaik stringlarni yig‘ishga va shu bilan optimal ishlash kuchlanishini ta’minlashga imkon beradi.

Bu yechim shuningdek, parallel ulanishlar sonini kamaytirib, quyosh kabellari xarajatlarini qisqartirishga yordam beradi. Bundan tashqari, DC tarmoqdagi tokni

kamaytirish kabeldagi issiqlik yo‘qotilishini ham ikki baravar kamaytiradi, chunki issiqlik yo‘qotilishi va tok o‘rtasidagi bog‘liqlik kvadratga teng. Masalan, nominal DC tomon kuchlanishi 600 V bo‘lgan 6 kW quvvatga ega uch fazali fotovoltaik stansiyada 10 ta JKM600N-72HL4-BDV moduldan tashkil topgan bitta fotovoltaik blok (PVB) konfiguratsiyasini ishlatish ma’qul, bunda STC sharoitida maksimal quvvat nuqtasi kuchlanishi (Vmp) taxminan 444,5 V bo‘ladi. Bu erda tizimni 5 modulli ikkita PVBdan qurish, ularning kuchlanishi 222 V bo‘lishi, tavsiya qilinmaydi.

Ko‘pgina zamonaviy yagona fazali invertorlarning maksimal ruxsat etilgan kuchlanishi 600 V, nominal kuchlanishi esa taxminan 360 V; MPPT ishchi kuchlanish diapazoni esa odatda 560 V gacha etadi.

Shuning uchun, masalan, 8 ta JKM630N-72HL4-BDV modulga asoslangan 5 kW gacha quvvatga ega yagona fazali fotovoltaik stansiya uchun bitta MPPT kirishiga ulangan yagona fotovoltaik blok (PPB) konfiguratsiyasidan foydalanish tavsiya etiladi. Avvalo, jami maksimal quvvat MPPT uchun ruxsat etilgan maksimal quvvat reytingiga mos kelishini ta’minlash zarur.

Bunday fotovoltaik stansiya konfiguratsiyasi uchun, PPB ning minimal dizayn haroratida kuchlanishi quyidagicha bo‘ladi:

$$\boldsymbol{V_{oc} = N \cdot V_{oc\,STC} \cdot (1 + K_V \cdot \frac{(t - 25)}{100} = 8 \cdot 57.08 \cdot (1 - 0.25 \cdot \frac{-20 - 25}{100})}$$

$$\boldsymbol{= 508\,V}$$

Fotovoltaik modulning maksimal hisoblangan element haroratida (+70 °C) maksimal quvvat kuchlanishi (Vmp):

$$\boldsymbol{V_{mp} = N \cdot V_{mp\ STC} \cdot (1 + K_V \cdot \frac{(t - 25)}{100}}$$

$$\boldsymbol{= 8 \cdot 47.70 \cdot (1 - 0.25 \cdot \frac{70 - 25}{100}) = 340V}$$

Bu, ayniqsa, xususiy sektor tizimlari uchun muhimdir, chunki invertorlar ko‘pincha yashash yoki texnik xonalarda aktiv ventilyatsiyasiz o‘rnatiladi. Bunday sharoitlarda yoz oylarida qo‘shimcha issiqlik tarqalishi invertorning o‘zida va

xonada ortiqcha haroratning ko‘tarilishiga olib keladi, bu esa issiqlik boshqaruvini buzadi va jihozning ishonchliligini kamaytiradi.

Bu omil gidrid (gibrid) invertorlar uchun yanada muhim bo‘ladi, chunki ular har doim batareya saqlash tizimlari bilan birga ichki xonada o‘rnatiladi.

Bunday muhitda havoning haroratining oshishi batareya saqlash tizimining ishchi haroratiga bevosita ta’sir qiladi, bu esa tez qarish, quvvatning kamayishi va hatto termal degradatsiyaga olib keladigan sharoitlarni yuzaga keltirishi mumkin. Shuning uchun, PV modul konfiguratsiyasini to‘g‘ri tanlash va optimal kuchlanishni ta’minlash orqali issiqlik tarqalishini kamaytirish butun tizimning ishonchliligi va xizmat muddatini oshirishda asosiy ahamiyatga ega omil hisoblanadi.

§4.5. Kabel tanlash

Kabel tanlash fotovoltaik stansiyaning ishonchli ishlashi va uning xavfsizligiga ta’sir qiluvchi eng muhim omillardan biridir.

Avvalo, quyosh kabelini to‘g‘ridan-to‘g‘ri tok (DC) tarafidagi, ya’ni fotovoltaik moduldan invertorning DC kirish qismigacha bo‘lgan bo‘limni ko‘rib chiqamiz.

Quyosh kabeliga qo‘yiladigan asosiy texnik talablar quyidagilardan iborat:

- U fotovoltaik tizimlar uchun amaldagi standartlarga muvofiq, 1500 Vgacha (DC) kuchlanishli doimiy tok sxemalarida uzoq muddat ishlashga mo‘ljallangan bo‘lishi kerak;
- Ikki qavatli izolyatsiya majburiy – quyosh kabellari ichki va tashqi izolyatsiyaga ega bo‘lishi lozim, bu esa yuqori elektr kuchlanishiga chidamlilik, qisqa tutashuvdan himoya, mexanik shikastlanish va atrof-muhit ta’siridan himoyani ta’minlaydi. Termoset materiallari, masalan, kross-bog‘langan polietilen (XLPE) keng qo‘llaniladi;
- Yuqori issiqlik chidamliligiga ega bo‘lishi zarur – kabel materiali atrof-muhit harorati 90°C gacha va qisqa muddatli o‘tkazuvchi harorati 120°C gacha bo‘lgan holatda izolyatsiya buzilmasdan ishlashga chidashi kerak;

- Tashqi ta’sirlarga chidamliligi bo‘lishi shart — ya’ni UV nurlanishi, ozon, yuqori namlik va kondensat, shuningdek, moylar, kislotalar, ishqorlar va shunga o‘xshash moddalar ta’siriga chidashi lozim;
- Yuqori yong‘inga chidamlilik xususiyatiga ega bo‘lishi zarur — kabel LSZH (Low Smoke Zero Halogen) talablarga mos kelishi va yonishni qo‘llab-quvvatlamasligi, yong‘in paytida kam tutun chiqarishi va zaharli gazlarni chiqarishdan saqlanishi, shuningdek, guruhlangan holda o‘rnatilganda yong‘in tarqalishini cheklashi kerak;
- Uzoq xizmat muddati bo‘lishi kerak — kabelning dizayni va materiali fotovoltaik o‘rnatish sharoitlariga mos ravishda kamida 25 yil ishonchli ishlashni ta’minlashi lozim: kunlik harorat o‘zgarishlari, yomg‘ir, quyosh nurlanishi, shamol va vibratsiyalar.

Hozirgi kunda O‘zbekistonda eng keng tarqalgan quyosh kabellari H1Z2Z2-K va PV1-F turlari hisoblanadi. Ularning asosiy xususiyatlari 6.8-jadvalda keltirilgan. Yangi loyihalar uchun H1Z2Z2-K kabelidan foydalanish tavsiya etiladi, chunki u ishlash ko‘rsatkichlari bo‘yicha ustun va zamonaviy Yevropa standarti EN 50618 talablariga to‘liq javob beradi. PV1-F kabeli eski TUV 2 Pfg 1169/08.2007 standartiga muvofiq ishlab chiqarilgan bo‘lsa-da, bir qancha parametrlar bo‘yicha, xususan maksimal ruxsat etilgan kuchlanish, issiqlik chidamliligi va atrof-muhit ta’siriga chidamlilik bo‘yicha kamroq afzalliklarga ega.

4.8-jadval – H1Z2Z2-K va PV1-F kabellari xususiyatlarini solishtirish

Parametr	**H1Z2Z2-K**	**PV1-F**
Standart	EN 50618	TUV 2 Pfg 1169/08.2007
Nominal kuchlanish, V (DC)	1500	1000
Ishlash harorati, °C	–40…+90	–40…+90
Maksimal o‘tkazuvchi harorati, °C	+120	+120
UV chidamlilik	Yuqori	O‘rta

O‘tkazuvchi materiali	Qoplangan mis (bükilgan, 5-sinf)	Qoplangan mis (bükilgan, 5-sinf)
Izolyatsiya va qoplama materiali	Kross-bog‘langan polietilen (XLPE)	Termoplastik yoki kross-bog‘langan poliolefing
Ikki qavatli izolyatsiya	Ha	Ha
LSZH	Ha	Har doim emas (Ishlab chiqaruvchiga bog‘liq)
Ozon, namlik, kimyoviy moddalar ta’siriga chidamlilik	Yuqori	Cheklangan
Xizmat muddati	≥ 25 yil	≤ 25 yil
Tashqi muhitga mosligi	Ha (qo‘shimcha himoyasiz)	Ha, lekin cheklangan darajada

So‘nggi paytlarda bozorlarda alyuminiy o‘tkazuvchili quyosh kabellari paydo bo‘la boshladi; ba’zi o‘rnatuvchilar loyihaning xarajatini kamaytirish maqsadida ularni ishlatadi — ko‘pincha mijozga to‘g‘ri xabar berilmasdan yoki roziligi olinmasdan. Bunday amaliyot, ayniqsa past va o‘rta quvvatli tizimlarda, jumladan tomga o‘rnatiladigan fotovoltaik modullar uchun, qabul qilinmaydi.

Alyuminiy kabellar to‘g‘ridan-to‘g‘ri tokli (DC) zanjirlar uchun talab qilinadigan ishonchlilik va xavfsizlik standartlariga javob bermaydi. Ular korroziyaga moyil, ulanish joylarida kontakt qarshiligi oshadi, o‘rnatishdagi xatoliklarga sezgir, va muntazam texnik xizmat talab qiladi. Kirish imkoniyati cheklangan, harorat yuqori va atrof-muhit ta’siri (UV nurlar, namlik, chang) mavjud sharoitlarda ularni ishlatish ortiqcha qizish, izolyatsiyaning erishi, kontaktlarning buzilishi va natijada yong‘in xavfi keltirib chiqarishi mumkin.

Xalqaro standartlarga muvofiq, fotovoltaik tizimlarning DC tomonida faqat mis o‘tkazuvchilar (imkon qadar qoplangan) ishlatilishi kerak. Ushbu talabdan har qanday chekinish oldindan mijoz bilan kelishilgan bo‘lishi va texnik hamda huquqiy jihatdan asoslangan bo‘lishi lozim.

4.9-jadval H1Z2Z2-K turidagi kabellar uchun uzoq muddatli ruxsat etilgan tok qiymatlarini ko‘rsatadi, o‘rnatish usuliga qarab, eng ko‘p ishlatiladigan kesimlar — 4 mm² va 6 mm² uchun, hisoblangan +60°C atrof-muhit haroratida. Ushbu ma’lumotlar bino tomi va ochiq maydonlarda quyosh kabellari o‘rnatishning tipik ish sharoitlarini aks ettiradi. Ko‘pincha turli PV modullardan bir nechta kabel o‘rnatilishi sababli hisob-kitoblarni eng yomon holat (guruhli kabellar) bo‘yicha amalga oshirish tavsiya etiladi.

4.9-jadval – Quyosh kabeli H1Z2Z2-K uchun uzluksiz ruxsat etilgan tok qiymatlari.

Kesim, mm²	**Havo ichida yakka o‘rnatish, A**	**Sirtga yakka o‘rnatish, A**	**Sirtga guruh (bundle) o‘rnatish, A**
4	55	52	44
6	70	67	57

Ta’kidlash joizki, berilgan qiymatlar taxminiy hisoblanadi; tok yuklamaini aniqroq tanlash uchun mos kabel ishlab chiqaruvchisining texnik hujjatiga murojaat qilish tavsiya etiladi. O‘zbekiston sharoitida zamonaviy fotovoltaik modullarning toki kamdan-kam hollarda 16 A dan oshadi; shuning uchun 4 mm² va 6 mm² kesimli kabellar odatda uzoq muddatli ruxsat etilgan tok qiymatlariga javob beradi.

Shu bilan birga, imkoniyat bo‘lsa, 6 mm² kesimli kabellarni ishlatish tavsiya etiladi, chunki ular nafaqat pastroq yo‘qotishlar va yuqori issiqlik marjasini ta’minlaydi, balki ulanadigan nuqtalarda — MC4 konnektorlar, sig‘ortalar terminallari va boshqa o‘tkazuvchi elementlarda kontakt maydonini oshiradi. Ushbu joylar zaif yoki noto‘g‘ri kontakt sharoitida ortiqcha qizib ketish va yonish xavfi yuqori bo‘lgan hudud hisoblanadi.

6 mm² kesimli kabeldan foydalanishning qo‘shimcha afzalligi — liniyada kuchlanish tushishini kamaytiradi. MPPT nazoratchisi va butun tizimning to‘g‘ri ishlashi uchun fotovoltaik moduldan invertorning DC kirish qismigacha bo‘lgan kabel bo‘lagida kuchlanish tushishi 2% dan oshmasligi, afzalroq holatda esa 1% ichida bo‘lishi tavsiya etiladi. Bu yondashuv quvvat yo‘qotilishini kamaytiradi,

maksimal quvvat nuqtasini kuzatish barqarorligini oshiradi va o‘rnatilgan tizimning umumiy samaradorligini yaxshilaydi.

Shundan kelib chiqib, PV modul va invertor o‘rtasidagi masofani cheklovchi shart paydo bo‘ladi. Agar kuchlanish tushishi 2% dan oshsa, kabel kesimini kattalashtirish yoki PV modul va invertor o‘rtasidagi masofani qisqartirish qat’iyan tavsiya etiladi. 4 mm² o‘rniga 6 mm² kesimli kabel ishlatish ruxsat etilgan masofani 1,5 baravar oshiradi.

Misol. Fotovoltaik modulni 600 V ish kuchlanishi (Vmp) va maksimal quvvatdagi toki (Imp) 15 A bilan invertorga ulashda, PV modul va invertor orasidagi masofa 100 metr bo‘lganda, 6 mm² kesimli quyosh kabelidagi kuchlanish tushishini hisoblang.

Ijobiy va salbiy o‘tkazuvchilarni hisobga olgan holda, kabel liniyasining qarshiligi:

$$R = p \cdot \frac{L}{S} \approx 0.0175\ \Omega \cdot \frac{mm^2}{m} \cdot \frac{200m}{6mm^2} \approx 0.58\ \Omega$$

Kuchlanish tushuvi

$$\Delta U\ =\ I_{mp} \cdot R = 15 \cdot 0.58 = 8.7\ V$$

Shunday qilib, kuchlanish tushishi taxminan 8,7 V yoki 1,45% ni tashkil etdi.

Endi, invertorni ulash nuqtasiga quvvat kabeli bo‘limini tanlashni batafsilroq ko‘rib chiqaylik. Quyosh kabellari uchun, odatda 99% hollarda 1×6 mm² kesimli H1Z2Z2-K kabel etarli bo‘lsa-da, quvvat kabelini tanlashda ancha ehtiyotkorlik talab etiladi. Quvvat kabelini tanlashda nafaqat tok yuklamalamasi va ruxsat etilgan kuchlanish tushishini hisobga olish, balki izolyatsiya materiali va o‘rnatish muhiti ham muhimdir — ochiq tom, podval, er osti kanali, kabel tray, yoki ichki simlashtirish. Bu sharoitlar to‘g‘ridan-to‘g‘ri kabel brendi va kesimining tanlanishiga ta’sir qiladi.

Birinchidan, kabelning ruxsat etilgan tok yuklamalamasini belgilovchi asosiy omil — izolyatsiya eskirish tezligi bo‘lib, u ish paytidagi o‘tkazgich haroratiga bevosita bog‘liq. Shunday qilib, kabelning tok ko‘tarish qobiliyati quyidagi parametrlar kombinatsiyasi bilan belgilanadi:

O‘tkazgich materiali – o‘tkazgichning maxsus elektr qarshiligi qancha past bo‘lsa, tok o‘tishi paytida shuncha kam issiqlik hosil bo‘ladi. Shunga ko‘ra, bir xil sharoitda, qarshiligi past materialdan (masalan, mis) tayyorlangan kabel yuqori qarshilikka ega materialdan (masalan, alyuminiy) tayyorlangan kabelga nisbatan yuqori tokni isitmasdan tashishi mumkin.

Masalan, +25°C atrof-muhit haroratida havoda yotqizilgan mis o‘tkazgichli VVGng kabel 4×50 mm² ning ruxsat etilgan tok qiymati 167 A ni tashkil qiladi. Shu o‘rnatish sharoitida alyuminiy o‘tkazgichli AVVGng kabel 4×50 mm² esa faqat 126 A ruxsat etilgan tokga ega.

● **Izolyatsiya materiali** – har bir izolyatsiya turi o‘zining ruxsat etilgan ishlash haroratiga ega. Shunga ko‘ra, boshqa sharoitlar bir xil bo‘lsa, izolyatsiya materialining issiqlikka chidamliligi qancha yuqori bo‘lsa, kabel shuncha yuqori issiqlik yuklamalamasiga bardosh bera oladi va shu bilan kabel orqali tok sharoitdagi ruxsat etilgan haroratdan oshmasdan shuncha yuqori bo‘lishi mumkin.

Masalan, PvPGng(A)-HF kabi kesishgan polietilen (XLPE) izolyatsiyali kabellar o‘tkazgich harorati 90°C gacha doimiy ishlashga mo‘ljallangan bo‘lib, qisqa muddatli ortiqcha qizib ketish 120°C gacha ruxsat etiladi. Shu bilan birga, poli-vinil xlorid (PVC) izolyatsiyali kabellar, masalan VVGng, doimiy ishlash uchun faqat 70°C gacha va qisqa muddatli ishlash uchun 90°C gacha ruxsat etiladi. Shunday qilib, XLPE kabellar bir xil kesimdagi PVC izolyatsiyali kabellarga nisbatan o‘rnatish sharoitida 10–20% ko‘proq tok tashiy oladi. Masalan, havoda o‘rnatilgan VVGng 4×50 mm² kabelning ruxsat etilgan toki 187 A bo‘lsa, PvPGng(A)-HF 4×50 mm² kabelning ruxsat etilgan toki, bir xil kesim va mis o‘tkazgich bilan, 209 A ni tashkil qiladi.

● **Atrof-muhit harorati** – atrof-muhit harorati qancha past bo‘lsa, kabeldan issiqlik chiqarilishi shuncha samarali bo‘ladi. Bu ruxsat etilgan o‘tkazgich haroratini oshirmasdan yuqori tokni tashishga imkon beradi. PVC izolyatsiyali kabellar uchun tok tashish qobiliyati havoda +25°C va yerda +15°C atrof-muhit haroratida, o‘tkazgich dizayn harorati esa +70°C da belgilangan. Kesishgan polietilen (XLPE)

izolyatsiyali kabellar uchun tok tashish qobiliyati havoda +30°C va erda +20°C atrof-muhit haroratida, o‘tkazgich dizayn harorati esa +90°C da standartlashtirilgan. Atrof-muhit harorati oshgan sayin, issiqlik chiqarish yomonlashadi va kabel maksimal ishlash haroratiga tezroq etadi. Shu sababli, ruxsat etilgan tokni kamaytirish uchun korreksiya faktorlarini qo‘llash kerak. Bu masala xonalar, podval, texnik zonalar va shunga o‘xshash iliq muhitlarda kabellar yotqizilganda ayniqsa muhimdir. PVC izolyatsiyali VVG va AVVG turidagi kabellar (6.10-jadval) eng issiqlikka sezgir bo‘lib, XLPE kabellarga nisbatan pastroq ruxsat etilgan o‘tkazgich harorati va harorat oshishi bilan tokning ruxsat etilgan kamayish egri chizig‘iga ega.

4.10–jadval. Havo haroratiga ko‘ra kabel toklari uchun korreksiya koeffitsiyentlari.

t, °C	**< -5**	**0**	**+5**	**+10**	**+15**	**+20**	**+25**	**+30**	**+35**	**+40**	**+45**	**+50**
K	1,29	1,24	1,20	1,15	1,11	1,05	1,00	0,94	0,88	0,81	0,74	0,67

Fotovoltaik elektr stansiyalari uchun tijoratda mavjud bo‘lgan variantlar orasida eng optimal yechim — bu XLPE (cross-linked polyethylene) izolyatsiyali kabellarni ishlatish, masalan, PvPGng(A)-HF, u Yevropa VDE standartlariga mos keladi va N2XH-O/J deb belgilanadi. Ushbu kabel turidan zamonaviy binolarda, muhandislik inshootlarida va yuqori yong‘inga chidamlilik talab qilinadigan quvvat ta’minoti tizimlarining kritik qismlarida foydalaniladi.

PvPGng(A)-HF kabelini deşifrlash: **Pv** — XLPE izolyatsiya, yuqori issiqlik va elektr kuchlanishiga chidamlilikni ta’minlaydi; **P** — halogenlarsiz polimer qoplama, olovga chidamli va toksik gaz chiqarmaydi; **G** — ko‘p tolali egiluvchan tok o‘tkazuvchi kabel; **ng(A)** — kabel guruh holida o‘rnatilganda olovni yoymaydi; A kategoriyasi eng yuqori yong‘inga chidamlilik darajasini bildiradi; **HF (Halogen Free)** — halogenlarsiz izolyatsiya va qoplama, kam tutun va gaz chiqishi bilan, LSZH (Low Smoke Zero Halogen) standartlariga mos.

CIS bozorida esa ko‘proq **VVGng** (yoki VVGng(A)-LS) kabeli ishlatiladi. Ammo bu kabel UV nurlariga chidamsiz; ishchi harorat diapazoni –50°C dan +50°C gacha. Shuning uchun invertorni tomga o‘rnatishda va quvvat kabelini tom bo‘ylab

tortishda to‘g‘ridan-to‘g‘ri quyosh nuri ta’siridan himoya qilish zarur. Shu bilan birga, tok uchun ikki barobar zaxira qo‘yish tavsiya qilinadi, ya’ni 0,5 korreksiya koeffitsiyentini qo‘llash lozim.

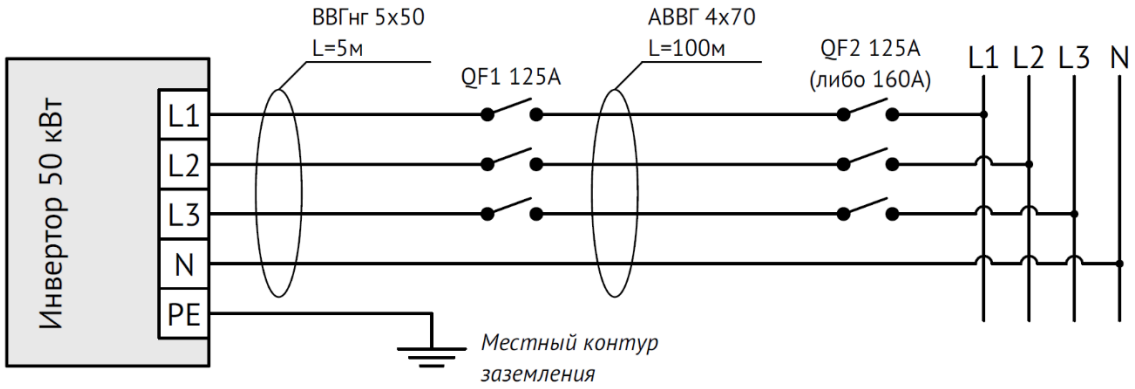
Izoh. Fotovoltaik elektr stansiyalarining (PV stansiyalarining) o‘ziga xos jihati shundaki, kabeldagi eng yuqori tok kunning o‘rtacha soatlarida yuz beradi, ya’ni elektr ishlab chiqarish quvvati maksimal darajaga etganda. Aynan shu davrda atrof-muhit harorati ham eng yuqori nuqtaga etadi. Ushbu yuqori toklar va ko‘tarilgan haroratning “simbiozi” kabelga tushadigan issiqlik yuklamaini sezilarli darajada oshiradi, shuning uchun tok o‘tkazuvchi kesimini tanlashda va loyihalash jarayonida haroratni hisobga olish koeffitsiyentlarini qo‘llashda alohida ehtiyotkorlik talab etiladi.

Biroq, mis kabeli qimmatroq bo‘lgani uchun amaliyotda AVVG turidagi kabellar ko‘proq qo‘llaniladi. O‘rnatish sharoitlari va tuzatish koeffitsiyentlari nuqtai nazaridan vaziyat VVG kabellari bilan o‘xshash. Shunga qaramay, AVVG kabellarning ruxsat etilgan tok ko‘rsatkichi VVG kabellarga nisbatan pastroq; shuning uchun teng sharoitlarda katta kesimli kabel talab qilinadi. Bu har doim ham mumkin emas, chunki ko‘pgina invertorlarning quvvat terminallari aynan mis kabel ulanishi uchun mo‘ljallangan va kesimi oshirilgan alyuminiy kabel terminal qisqichiga sig‘masligi mumkin.

Bundan tashqari, muhrlanishni ta’minlash va ulashni osonlashtirish maqsadida invertorga ulashda besh yadroli kabel ishlatish tavsiya etiladi, bu AVVG kabellar bilan qiyin, chunki bunday kabellar kamdan-kam hollarda besh yadroli konfiguratsiyada ishlab chiqariladi. Shu bilan birga, ulanish nuqtalarida qalay qoplamali terminallar ishlatish tavsiya etiladi, chunki invertor ko‘pincha tashqi sharoitda o‘rnatiladi va qalay qoplamasi yuqori namlik sharoitida kontakt qarshiligini korroziyaga nisbatan oshiradi.

Yuqoridagi barcha omillarni hisobga olgan holda, iqtisodiy sabablar bilan alyuminiy kabel ishlatishga qaror qilingan bo‘lsa, invertorga bevosita qisqa bo‘lak besh yadroli mis kabel va qalay qoplamali terminallar orqali ulanishi tavsiya etiladi, kabelning boshqa uchi invertor yoniga o‘rnatilgan avtomatik uzatkichga ulanadi.

Avtomatik uzatkichdan tarmoqqa ulanish nuqtasigacha alyuminiy kabel ishlatish mumkin (4.17-rasm).



4.17-rasm. Invertorning taqsimlash tarmog‘iga ulanishi diagrammasi.

Quvvat kabelini tanlash ikki asosiy mezon bo‘yicha amalga oshiriladi: ruxsat etilgan uzluksiz tok yuklamalamasi va ruxsat etilgan kuchlanish tushishi. An’anaviy tarzda, uch fazali invertorlar uchun hisoblangan tok quyidagi formula orqali aniqlanadi:

$$I_p = \frac{P_{\text{hisobiy}}}{\sqrt{3} \cdot U_{nom} \cdot cos\varphi}$$

bu yerda: P_{rated} – fotovoltaik stansiyaning hisoblangan quvvati, barcha o‘rnatilgan fotovoltaik modullarning nominal quvvatlari yig‘indisi sifatida aniqlanadi, hududning iqlimiy xususiyatlarini hisobga oluvchi korrektiv koeffitsient bilan. Quyosh nuri darajasi va samarali ishlab chiqarish davomiyligiga qarab, bu koeffitsient odatda 0,85–0,95 oralig‘ida olinadi; U_{nom} – nominal liniya kuchlanishi; cosφ – 1 ga teng deb hisoblash mumkin, chunki tarmoq bilan bog‘langan invertorlar odatda faqat aktiv quvvat rejimida ishlaydi.

Biroq, O‘zbekistonning elektr tizimining o‘ziga xos xususiyatlarini ham hisobga olish zarur, chunki ba’zi tarmoq joylarida kuchlanish nominal qiymatdan sezilarli past bo‘lishi mumkin — ayniqsa uzoq qishloq hududlarda yoki yuqori yuklamalama davrlarida. Standart sozlamalarga ko‘ra, agar kuchlanish nominal qiymatdan 15% dan ortiq tushsa, invertor avtomatik o‘chadi va faqat tarmoq parametrlari ruxsat etilgan chegaralar ichida tiklangach ishlashni davom ettiradi.

Amaliyotda bu ko‘pincha invertorning uzoq muddat ishlamasligiga va natijada ishlab chiqarish yo‘qotilishiga olib keladi. Shu sababli ko‘plab ob’ektlarda past kuchlanishdan himoya sozlamalari ataylab yumshatiladi, bu esa tarmoq o‘ziga ijobiy ta’sir ko‘rsatadi, chunki fotovoltaik stansiya tomonidan ishlab chiqarilgan quvvat qisman bo‘lim bo‘yicha kuchlanishni oshirishga yordam beradi.

Muhim! Invertorning past kuchlanishdan himoya (undervoltage protection) sozlamalarini kuchlanishdan ortiq himoya (overvoltage protection) bilan aralashtirmaslik muhimdir.

● Past kuchlanishdagi himoya uchun ruxsat etilgan kuchlanish diapazonini kengaytirish odatda tarmoq holatini barqarorlashtirishga yordam beradi: ishlab chiqarishni davom ettirish, mahalliy yuklamani qisman qoplash va liniyada kuchlanishni oshirish orqali.

● Ortiqcha kuchlanish himoyasi uchun esa maksimal kuchlanishga asoslangan himoya sozlamalarini bo‘shatish tarmoqda haddan tashqari kuchlanishning oshishiga olib kelishi mumkin, bu esa xavfli bo‘lib, favqulodda jihozlarning o‘chishi, ortiqcha isish, sezgir elektronikaning ishlamasligi va hatto yong‘inga sabab bo‘lishi mumkin.

Shuning uchun tarmoq kuchlanishi yuqori bo‘lgan sharoitlarda, P–U funksiyasidan foydalanish tavsiya etiladi — bu invertorning aktiv quvvatini tarmoq kuchlanishi oshgan sari avtomatik kamaytiradi, natijada kuchlanishning ortiqcha oshishini cheklaydi va tizim barqarorligini yaxshilaydi.

Past kuchlanish sharoitlarida, invertor tomonidan etkaziladigan tok hisoblangan qiymatdan oshishi mumkin, hatto nominal quvvat bir xil bo‘lsa ham. Biroq, invertor o‘zining maksimal dizayn tok chegarasi (Maximum Output Current) bilan cheklangan bo‘lib, bu chegaradan osholmaydi. Shu nuqtani hisobga olib, fotovoltaik stansiya uchun quvvat kabelini loyihalash va tanlashda, jami fotovoltaik modul quvvati invertorning nominal quvvatiga mos keladigan holatlarda, faqat hisoblangan tokga emas, balki invertorning texnik xususiyatlarida ko‘rsatilgan maksimal chiqish tokini ham albatta hisobga olish tavsiya etiladi.

Kabel va invertorni ortiqcha yuklama va o‘zgaruvchan tok tomondagi qisqa tutashuvlardan himoya qilish uchun avtomatik uzatgich (circuit breaker) o‘rnatiladi. Elektr tarmog‘ining quvvati invertor quvvatidan sezilarli darajada yuqori bo‘lganligi sababli, kabelning boshlanishida (elektr tarmog‘i tomonida) avtomatik uzatgich va zarurat bo‘lsa, sig‘ortani o‘rnatish majburiy hisoblanadi. Bu chora kabelning invertordan tarmoqqa ulanish nuqtasigacha bo‘lgan bo‘limida shikastlanish sodir bo‘lganda, elektr tarmog‘idan ajratishni ta’minlaydi.

Jadval X standart o‘rnatish sharoitida AVVG va VVG kabellarining tavsiya etilgan kesimlarini, shuningdek, turli quvvatdagi uch fazali Huawei invertorlari uchun avtomatik uzatgichlarning nominal toklarini ko‘rsatadi. Kabelni tom, loft yoki texnik xona kabi yuqori haroratli muhitda o‘tkazishda, kamaytirilgan harorat koeffitsiyentlarini hisobga olib, kesimi oshirilgan kabel ishlatish tavsiya etiladi.

4.11–jadval. Tavsiya etilgan kabel kesimi va nominal avtomatik uzatgich toklari.

Quvvat invertori, kW	**Maks. chiqish toki, A**	**Avtomatik uzatgichning nominal toki, A**	**VVG kabel kesimi**	**AVVG kabel kesimi**
5	8,5	15	4 mm²	6 mm²
10	17,0	25	6 mm²	10 mm²
20	33,5	40	16 mm²	25 mm²
30	50,4	63	25 mm²	35 mm²
40	67,2	80	35 mm²	50 mm²
50	79,8	125	50 mm²	70 mm²
60	100	125	50 mm²	70 mm²
100	160,4	200	90 mm²	120 mm²

Uch fazali invertorlar uchun kabeldagi kuchlanish tushishi quyidagi formula bo‘yicha hisoblanadi:

$$\Delta U_{hisobiy} = \frac{(P_{rated} \cdot r + Q_{hisobiy} \cdot x) \cdot L}{U_{nom}}$$

bu erda: $P_{hisobiy}$ va $Q_{hisobiy}$– aktiv va reaktiv quvvatning hisoblangan qiymatlari; r, x – kabelning aktiv va reaktiv qarshiliklari; L – kabel uzunligi.

Invertorlar odatda faqat aktiv quvvat ishlab chiqarish rejimida ishlaydi, shu sababli reaktiv komponentni hisobdan chiqarib, kuchlanish tushishini hisoblashni soddalashtirish mumkin. Bu holatda formula quyidagi shaklda bo‘ladi:

$$\Delta \mathbf{U}_{\text{hisobiy}} = \frac{\mathbf{P}_{\text{hisobiy}} \cdot \mathbf{r} \cdot \mathbf{L}}{\mathbf{U}_{\mathbf{nom}}}$$

Quyosh fotovoltaik stansiyasi uchun, agar fotovoltaik modullarining jami quvvati invertorning quvvat reytingiga mos kelsa, formula invertorning nominal (yoki ba’zi fotovoltaik stansiyalarda maksimal) tokini ishlatish orqali yanada soddalashtirilishi mumkin.

$$\Delta \mathbf{U}_{\text{hisobiy}} = \mathbf{I}_{\mathbf{nom}} \cdot \mathbf{r} \cdot \mathbf{L}$$

Yagona fazali invertorlar uchun kuchlanish tushishini hisoblashda kabel uzunligi ikki barobar olinishi lozim, chunki tok invertordan ulanish nuqtasiga boradi va neytral o‘tkazgich orqali qaytadi.

Fotovoltaik stansiyani loyihalashda shuni ta’minlash muhimki, fotovoltaik modullardan invertorga bo‘lgan to‘g‘ridan-to‘g‘ri tok bo‘limida va invertordan tarmoqqa ulanish nuqtasigacha bo‘lgan o‘zgarmas tok bo‘limida jami kuchlanish tushishi minimallashtirilgan bo‘lsin va har qanday holatda 5% dan oshmasin.

$$\Delta U_{AC} + \Delta U_{DC} < 5\%$$

Izoh. Zamin ostiga quvvat kabellarini yotqizishda, qo‘shimcha mexanik himoya ta’minlaydigan qurollangan kabellarni ishlatish tavsiya etiladi. Agar qurollangan bo‘lmagan kabellar ishlatilsa, ularni maxsus himoya quvurlari yoki burg‘ulangan kanallarda yotqizish zarur, bu esa tuproqdagi shikastlanishlardan ishonchli himoya beradi.

Izoh. Havo usti liniyalari bo‘ylab kabellarni yotqizishda, o‘zini qo‘llab-quvvatlaydigan izolyatsiyalangan sim (SSIW) ishlatish tavsiya etiladi, bu ishonchlilik, mexanik mustahkamlik va atmosferik ta’sirlarga chidamlilikni ta’minlaydi.

§4.6. Yerlashtirish

Yerga ulash (zazemleniye) fotoelektr stansiyalarini (FES), shuningdek har qanday elektr jihozlarini xavfsiz ishlatishda nihoyatda muhim ahamiyatga ega. U bir

nechta muhim funksiyalarni bajaradi va ham xodimlarni himoya qilishni, ham uskunalarning barqaror ishlashini ta’minlaydi.

FES tizimlarida yerga ulash quyidagi vazifalarni bajaradi:

• **Elektr toki urishidan himoya qilish** – tok o‘tkazuvchi qismlarning izolyatsiyasi shikastlanganda (masalan, qizib ketish, eskirish yoki mexanik shikastlanish sababli), yerga ulash qisqa tutashuv tokini yerga o‘tkazishni ta’minlaydi. Natijada tegish kuchlanishi kamayadi va insonlarning elektr toki urishidan zararlanishi oldi olinadi. Bu ayniqsa doimiy tok (DC) tizimlarida muhimdir, chunki bunday tizimlarda tok sizib chiqishi o‘zgaruvchan tok (AC) tizimlariga qaraganda kamroq sezilishi mumkin.

• **Himoya tizimlari ishlashini ta’minlash** – yerga ulash himoya qurilmalarining to‘g‘ri ishlashi uchun zarur. Bunday qurilmalarga UZO (himoya o‘chirgichlari), differensial avtomatlar va erga tutashuvdan himoya vositalari kiradi. Yerga ulash bo‘lmasa, bu qurilmalar avariya holatlarida ishlamasligi yoki noto‘g‘ri ishlashi mumkin.

• **Uskunalarni ortiqcha kuchlanishdan himoya qilish** – FES komponentlari, ayniqsa ochiq maydonlarda yoki bino tomlarida joylashtirilganda, atmosfera va kommutatsion ortiqcha kuchlanishlar ta’siriga uchraydi. To‘g‘ri bajarilgan erga ulash tizimi impulsli ortiqcha kuchlanishdan himoya qurilmalari (SPD) bilan birgalikda razryad energiyasini yerga o‘tkazadi va izolyatsiyaning buzilishi hamda uskunalarning shikastlanishini oldini oladi.

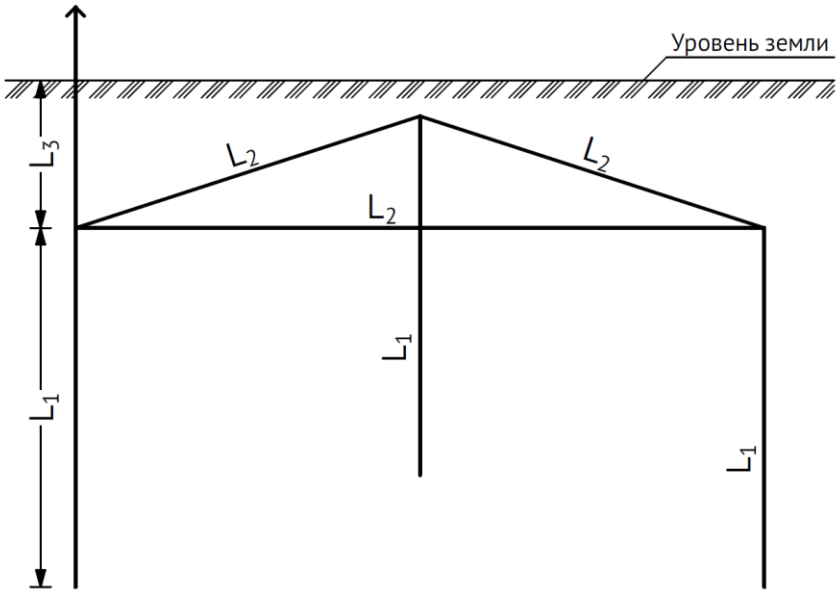
• **Elektromagnit shovqinlarni kamaytirish** – sifatli yerga ulash yuqori chastotali shovqinlarni kamaytiradi va tizim komponentlarining elektromagnit mosligini yaxshilaydi. Bu ayniqsa invertorlar, monitoring tizimlari, kontrollerlar va boshqa sezgir qurilmalar uchun muhimdir.

• **Funktsional yerga ulash** – tizimning ayrim elementlari, masalan, kabel ekranlari, metall konstruksiyalar korpuslari va elektr shchitlari faqat himoya maqsadida emas, balki tizimning to‘g‘ri ishlashini ta’minlash uchun ham yerga ulanadi. Masalan, modullar o‘rtasidagi potensial farqlarini bartaraf etish yoki o‘lchash zanjirlaridagi induksion shovqinlarni kamaytirish uchun.

Yerga ulashdagi xatolar FES tizimlarida uskunalarning ishdan chiqishi va nosozliklarning eng ko‘p uchraydigan sabablaridan biridir. Yerga ulash konturining noto‘g‘ri tashkil etilishi tizim elementlari o‘rtasida nazoratsiz potensial paydo bo‘lishiga, himoya qurilmalarining noto‘g‘ri ishlashiga, komponentlar o‘rtasidagi aloqa yomonlashishiga hamda hatto yong‘in xavfi yuzaga kelishiga olib kelishi mumkin.

Shuning uchun yerga ulash tizimini loyihalash va montaj qilish jarayonida me’yoriy talablarni (PUE, GOST, IEC) hisobga olish, tuproq turi, yerga ulash qarshiligi, kontur konfiguratsiyasi hamda uskunalarni joylashtirish xususiyatlarini inobatga olish muhimdir. Shu sababli FESni loyihalashni boshlashdan oldin me’yoriy talablarni puxta o‘rganish tavsiya etiladi, bu esa tizim xavfsizligini ta’minlash va standartlarga muvofiqligini kafolatlaydi.

Ma’lumki, yerga ulash konturining qarshiligi qanchalik kichik bo‘lsa, tizimning elektr xavfsizligi shunchalik yuqori bo‘ladi. Amaliyotda 0,4 kV kuchlanishli tarmoqlar uchun odatda yerga ulash qurilmasining qarshiligi 4 Om dan kichik bo‘lishi kerak deb qabul qilinadi. Bu esa himoya qurilmalarining ishonchli ishlashini ta’minlaydi hamda tegish kuchlanishini xavfsiz darajagacha kamaytiradi.



4.26-rasm. Yerga ulash konturining tipik sxemasi.

4.26-rasmda yerga ulash konturining eng keng tarqalgan variantlaridan biri ko‘rsatilgan. Uchta vertikal erga ulagich (masalan, armatura yoki po‘lat burchak) uchburchak cho‘qqilarida o‘rnatiladi.

Yerga ulagich sifatida quyidagilardan foydalanish mumkin:

• kesimi kamida 50×50 mm va devor qalinligi kamida 4 mm bo‘lgan po‘lat burchak;

• yoki diametri kamida 16 mm bo‘lgan po‘lat armatura.

Vertikal erga ulagichlarning uzunligi **kamida 2,5 m (L_1)** bo‘lishi kerak. O‘rnatilgandan so‘ng ular o‘zaro gorizontal erga ulagich yordamida ulanadi. Bu ulagich yer ostida **kamida 0,5 m (L_3)** chuqurlikda, imkon qadar esa **1 metr gacha** chuqurlikda yotqiziladi. Bu tuproq namligi va haroratining mavsumiy o‘zgarishlari sharoitida tizimning ishonchliligini oshirishga xizmat qiladi.

Gorizontal ulovchilar odatda huddi shu po‘lat burchakdan tayyorlanadi va ularning uzunligi **(L_2) kamida L_1 ga teng** bo‘ladi, natijada **teng tomonli uchburchak** shaklidagi kontur hosil qilinadi. Barcha ulanishlar ishonchli elektr kontakti ta’minlanadigan tarzda hamda erga ulash tizimining butun xizmat muddati davomida **korroziyaga chidamli** bo‘lishi hisobga olingan holda bajariladi.

Muhim! Ko‘pchilik invertorlar yerga ulashsiz ishlamaydi — agar erga ulash mavjud bo‘lmasa, tizim **“Abnormal grounding”** xatosini chiqaradi va ishga tushishni bloklaydi. Ba’zi montajchilar bu holatni chetlab o‘tish uchun erga qisqa armatura qoqish yoki bino konstruksiyalariga ulanish kabi usullardan foydalanishga harakat qilishadi. Bu **qat’iyan man etiladi**, chunki bunday “yerga ulash” tizimni aldayotgandek ko‘rinsa ham, tokning erga tarqalishi uchun xavfsiz qarshilikni ta’minlamaydi. Natijada elektr toki urish xavfi oshadi, himoya qurilmalari ishlamay qolishi mumkin va uskunalarning ishdan chiqish ehtimoli ortadi.

§4.7. Chaqmoqdan himoya

Chaqmoqdan himoya tizimini loyihalash alohida va chuqur ko‘rib chiqishni talab qiladi, shuning uchun ushbu bo‘lim doirasida u to‘liq yoritilmaydi. Ushbu

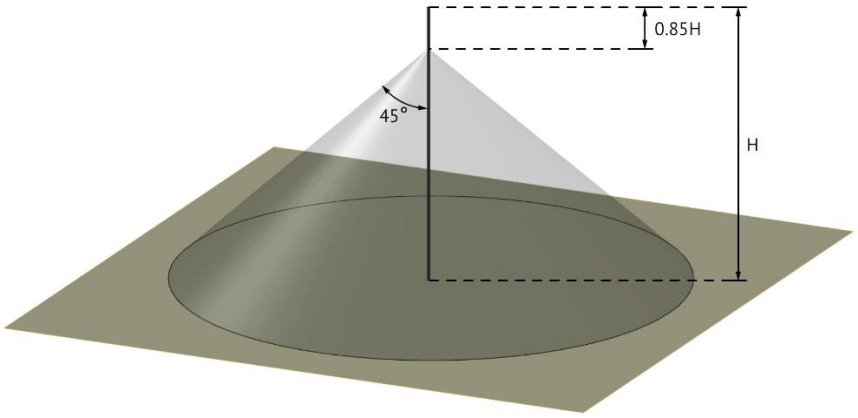
bo‘limning maqsadi — chaqmoqdan himoya elementlarining ta’sir zonasi haqida umumiy tasavvur berishdir. Amaliyotda ko‘pincha shunday holatlar uchraydiki, fotoelektr modullar darajasidan atigi bir necha metr balandroq o‘rnatilgan yakka shtir to‘liq fotoelektr stansiyasi (FES) uchun chaqmoqdan himoya tizimi sifatida talqin qilinadi. Holbuki, maydoni bir necha o‘n kvadrat metr bo‘lgan FES uchun bunday yechim texnik jihatdan asoslanmagan va butun qurilmani ishonchli himoya qila olmaydi.

Chaqmoqdan himoya zonasini aniqlashning ikki keng tarqalgan usuli mavjud:

- **Himoya burchagi usuli (Protection angle method);**
- **Aylanuvchi shar usuli (Rolling Sphere Method).**

Himoya burchagi usuli soddalashtirilgan geometrik usul hisoblanadi va nuqtaviy obyektlar hamda ixcham qurilmalar, masalan, bino tomlariga o‘rnatilgan FESlar uchun himoya zonasini baholashda qo‘llanilishi mumkin. Bunday hollarda u uskunalar yaqiniga o‘rnatilgan alohida chaqmoq qabul qilgichlarning qamrov zonasini tezda aniqlash imkonini beradi.

Ushbu usulning mohiyati shundan iboratki, chaqmoq qabul qilgichning umumiy balandligining **0,85 qismiga teng balandlikda joylashgan nuqtadan** ma’lum burchak ostida qiya chiziq o‘tkaziladi — bu **himoya burchagi** deb ataladi. Shu burchak ichida joylashgan hudud **to‘g‘ridan-to‘g‘ri chaqmoq zarbasidan himoyalangan** deb hisoblanadi (4.27-rasmga qarang).



4.27-rasm. Himoya burchagi usuli qo‘llanilganda chaqmoqdan himoya qamrov zonasi.

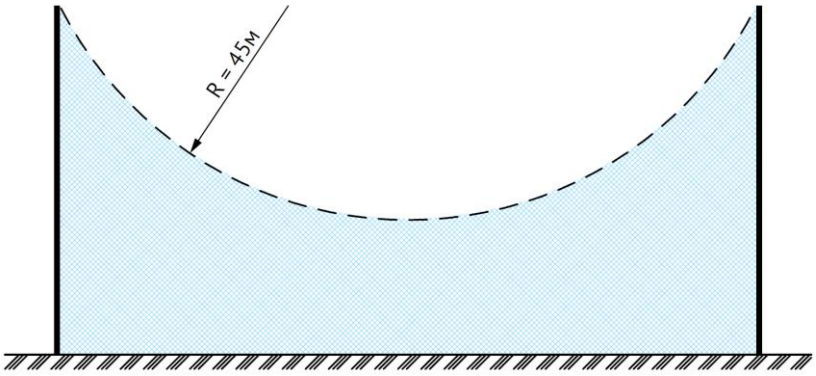
Himoya sinfi qanchalik yuqori bo‘lsa, himoya burchagi shunchalik kichik bo‘ladi va mos ravishda qamrov zonasi ham kamayadi. Masalan, balandligi **20 m gacha bo‘lgan obyektlar** uchun **III himoya sinfi**da burchak **45° gacha** etishi mumkin. Yuqori darajadagi himoya talab qilinganda (**I–II sinf**) esa burchak **20–30°** gacha kamayadi.

Himoya burchagi usuli erda joylashgan fotoelektr stansiyalarining (FES) chaqmoqdan himoyasini hisoblash uchun tavsiya etilmaydi, ayniqsa ular katta maydonga ega bo‘lsa, o‘rnatilish balandligi past bo‘lsa va tarqoq tuzilishga ega bo‘lsa. Bunday hollarda ushbu usul noto‘g‘ri baho berishi mumkin va to‘liq himoyani ta’minlamaydi. Shuning uchun bunday obyektlar uchun **aylanuvchi shar usuli** ancha to‘g‘ri va ishonchli hisoblanadi.

Aylanuvchi shar usuli chaqmoqdan himoya zonasini aniqlashning eng universal va aniq usullaridan biridir. U har qanday turdagi obyektlarni, jumladan katta maydonga ega, cho‘zilgan yoki past balandlikda joylashgan qurilmalarni (masalan, er usti FESlarni) himoya qilishni hisoblashda qo‘llaniladi. Bu usul ayniqsa ochiq maydonlarda joylashgan ko‘p sonli elementlarga ega tizimlar uchun muhimdir, chunki boshqa usullar bunday hollarda etarlicha aniq natija bermaydi.
Ushbu usulning mohiyati shundan iboratki, er yuzasi va uskunalar ustida **ma’lum radiusga ega bo‘lgan tasavvuriy shar** harakatlanayotgandek tasavvur qilinadi. Shar radiusi chaqmoqdan himoya sinfiga qarab me’yoriy hujjatlar (masalan, **IEC 62305**) asosida belgilanadi:

• I sinf — 20 m; • II sinf — 30 m; • III sinf — 45 m; • IV sinf — 60 m

Shar “aylanib” harakatlanganda u tegib ketolmaydigan obyekt qismlari **chaqmoq qabul qilgichlar himoya zonasida** joylashgan deb hisoblanadi va ular to‘g‘ridan-to‘g‘ri chaqmoq zarbasidan himoyalangan bo‘ladi (4.28-rasmga qarang). Aylanuvchi shar usuli **relyefni, konstruksiyalar balandligini va chaqmoq qabul qilgichlarning 3D fazodagi joylashuvini** hisobga olish imkonini beradi. Shu sababli u zamonaviy obyektlar — jumladan **fotoelektr stansiyalar, podstansiyalar, antenna tizimlari va murakkab arxitekturali binolar** uchun chaqmoqdan himoya tizimini loyihalashda asosiy usullardan biri hisoblanadi.



4.28-rasm. Aylanuvchi shar usuli qo‘llanilganda chaqmoqdan himoya qamrov zonasi.

Chaqmoqdan himoya tizimining erga ulash sxemasi ko‘plab omillarga bog‘liq bo‘lib, har bir holatda alohida yondashuvni talab qiladi. Agar chaqmoq qabul qilgich bino tomiga o‘rnatilgan bo‘lsa, odatda uni binoning asosiy yerga ulash konturiga ulash zarur bo‘ladi. Bunda avvalo erga ulash qurilmasi me’yoriy talablarga mos kelishini tekshirish kerak. Bu chaqmoqdan himoya tizimi bilan elektr qurilmasining boshqa elementlari o‘rtasida xavfli potensial farqi paydo bo‘lishining oldini olish, shuningdek chaqmoq zarbasi paytida binoda potensiallarning ishonchli tenglashishini ta’minlash uchun muhimdir.

Agar chaqmoqdan himoya tizimi uchun **alohida erga ulash konturi** bajarilsa, u elektr qurilmasining himoya erga ulash konturidan **kamida 10 metr** masofada joylashgan bo‘lishi kerak. Bu chaqmoq impuls toki chaqmoqdan himoya konturi orqali o‘tganda paydo bo‘lishi mumkin bo‘lgan xavfli potensial farqini oldini olish uchun zarur.

Agar bunday masofani ta’minlashning imkoni bo‘lmasa, unda ikkala erga ulash qurilmasi **umumiy erga ulash tizimiga birlashtirilishi** yoki ular o‘rtasida tegishli kesimga ega o‘tkazgichlar yoki **uchqunli oraliqlar** yordamida potensiallarni tenglashtirish amalga oshirilishi kerak. Bu ishlar **PUE (Elektr qurilmalarini o‘rnatish qoidalari)** talablariga muvofiq bajarilishi lozim [45]**.**

5-BOB. SHAMOL ELEKTR STANSIYALARINI LOYIHALASH

§5.1. Shamol va uning padyo bo‘lishi.

QTEM bozor tadqiqotlari bo‘yicha Brinkmann konsalting kompaniyasi 2023 va 2033 yillar oralig‘ida butun dunyo bo‘ylab taxminan 1,9 TW shamol energiyasi quvvatini qo‘shishini kutmoqda. IRENA ma’lumotlar bazasiga ko‘ra, 2022 yil yakunlari bo‘yicha jahon shamol energetikasining o‘rnatilgan quvvati 899 GWni tashkil etdi. Brinkmann prognoziga ko‘ra, 2023 yilda 130 GW ga yaqin yangi quruqlik va dengiz shamol elektr stantsiyalari o‘rnatiladi, ularning aksariyati Osiyo-tinch okeani mintaqasida quriladi. 2023-2033 yillarda bozorning yillik o‘sishi o‘rtacha 6 foizni tashkil etadi va 2033 yilga kelib tahlilchilar taxminan 230 GW quvvatga ega bo‘lishini taxmin qilmoqdalar, ularning uchdan ikki qismi quruqlikdagi shamol elektr stantsiyalari tomonidan namoyish etiladi.

Kuchli siyosiy qo‘llab-quvvatlash, AQShning inflyatsiyani pasaytirish to‘g‘risidagi qonuni, Xitoy va Evropa Ittifoqining dekarbonizatsiya strategiyalari, offshor shamol bozoriga yangi mamlakatlarning kirishi va yashil vodorodga bo‘lgan talab kabi global shamol energetikasining o‘sish omillari cheklovchi omillar va to‘siqlardan ustun turadi.

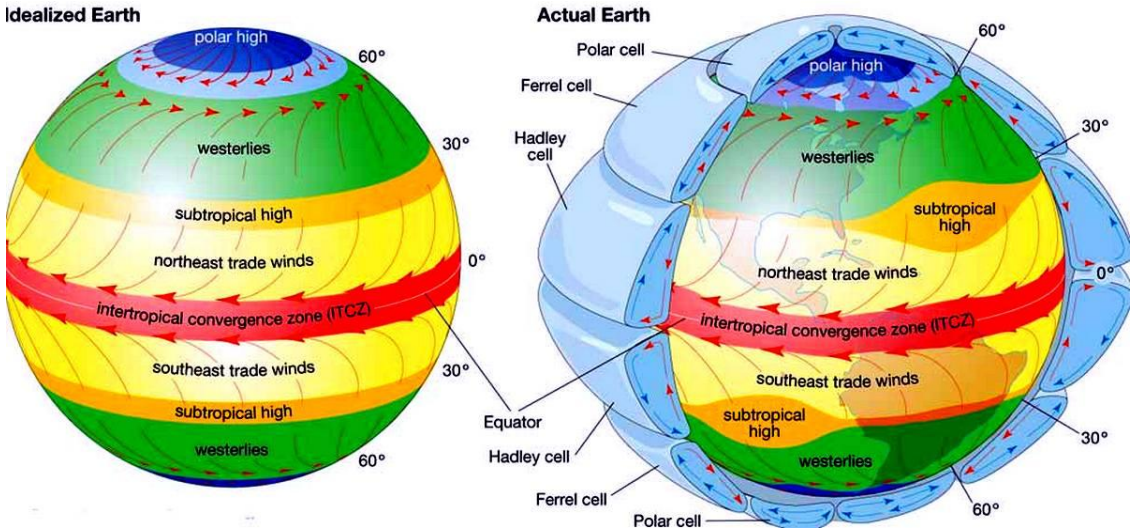
Shamol energiyasining tarixi yuzlab yillar oldin odamlar ekinlarni sug‘orish va donni unga aylantirish uchun suvni pompalash uchun shamol tegirmonlarini qurishni boshlaganlarida boshlanadi.

Arxeologlarning ta’kidlashicha, birinchi shamol tegirmonlari Yaqin Sharqda IX asrda hozirgi Afg‘oniston va Eron chegaralarida qurilgan. Bular vertikal yo‘naltirilgan parraklar, vertikal vallar va to‘rtburchaklar parraklar bo‘lgan tegirmonlar edi, ular ustiga zich mato cho‘zilgan. Bunday tegirmonlarning vazifasi donni maydalash va suvni pompalamak edi. Olimlar Yaqin Sharq va Markaziy Osiyoda, Xitoy va Hindistonda shamol energiyasidan foydalanishning yangi dalillarini topdilar.

Shamol energiyasi yer sharida yiliga 175-220 ming TW·soatni tashkil etadi, uning quvvati esa $(20\text{-}25)\cdot 10^9$ kW. Bu taxminan dunyodagi energiya sarfidan 2,5

marotaba ortiq. Lekin bu energiyani 5% dan foydalanish mumkin, hozirgi davrda bundan ham kam ishlatilmoqda.

Shamol – er yuzasi isish darajasining bir hil bo‘lmaganligi (sutka, mavsum davomida doimiy bo‘lmasligi) va erning o‘z o‘qi atrofida korrelyasion inersiya kuchi hosil bo‘lishi natijasida havo massasining davriy harakatidir (5.1-rasm). Boshqacha qilib aytganda, er atmosferasi sirkulyasiyasidan hosil bo‘lgan havoning siljish jarayonidir. Shamol elektr qurilmalari samarali ishlashi shamol parametrlari (tezligi, bosimi, yo‘nalishi nisbatan o‘zgarmasligi)ga bog‘liq.



5.1-rasm. Yer yuzasi isish darajasining bir hil bo‘lmaganligi va Yerning o‘z o‘qi atrofida korrelyasion inersiya kuchi hosil bo‘lishi natijasida havo massasining davriy harakati.

Shamol energetikasi ko‘p asrli tarixga ega. Birinchi eng sodda shamol motorlari Misr va Xitoyda ishlatilgan. Misrdagi Aleksandriya shahri yaqinida eramizdan avvalgi II-I asrda toshdan yasalgan shamol tegirmonining qoldiqlari bugungi kungacha saqlanib qolgan.

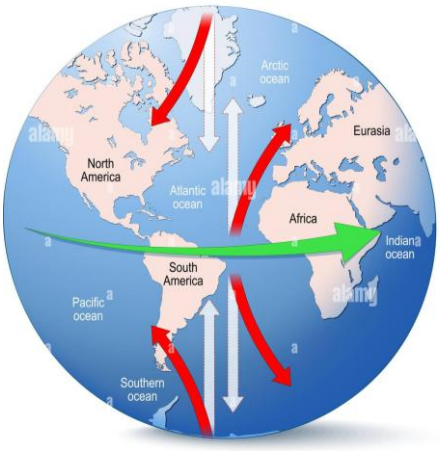
Ma’lumotlarga kora (D.J. de Renzo), XI asrda shamol tegirmonlari yaqin Sharqda keng qo‘llanilgan va XIII asrda Evropada ham paydo bo‘lgan. Shundan so‘ng, O‘rta asrlar shamol tegirmonlariga tegishli qonun-qoidalar qabul qilingan. AQShda XIX asr yarmida elektr energiya ishlab chiqarish, suvni yuqoriga ko‘tarish va turli ishlarni bajarish maqsadida har birining quvvati 0,75 kW bo‘lgan 6 milliondan ortiq kichik shamol qurilmalari o‘rnatilgan. Suvni yuqoriga ko‘tarish uchun aksariyat, gorizontal valda aylanuvchi, diametri 3,7-4,9 m bo‘lgan, yaxlit

metalldan yasalgan parrakli shamol g‘ildiraklari qo‘llanilgan va shamol yo‘nalishini aniqlab, uning burilishiga sabab bo‘luvchi dum qanotlari (flyuger) bilan ta’minlangan.

Ikkinchi jahon urushidan so‘ng daniyaliklar quvvati 12, 45 va 200 kW bo‘lgan, energetika tizimi bilan parallel ishlaydigan uchta eksperimental ShEQni ishlab chiqdilar va sinovdan o‘tkazdilar. Ular 1960 yilgacha muvaffaqiyatli ekspluatasiya qilindi. Ishlab chiqarilayotgan elektr energiyaning narxi ichki yonuv motori yordamida aylanayotgan generator ishlab chiqargan energiya narxidan ikki marta qimmat ekanligi aniqlangandan so‘ng loyiha to‘xtatildi.

Buyuklama Britaniyada XX asrning 40- va 50-yillarida ShEQ tadqiqotlari bo‘yicha sezilarli ishlar amalga oshirildi. Shu davrda Britaniya orollarining 100 ta hududida shamol tavsiflarining o‘lchovlari olib borildi. 1950 yilda «Vorth Scotland Hydroelectric Board» kompaniyasi Orkney arxipelagi orollarida o‘rnatilgan eksperimental shamol qurilmalari tadqiqotini o‘tkazdi. ShEQsi shamol tezligi 15,6 m/sek va quvvati 100 kW bo‘lishiga mo‘ljallangan. U 1955 yilda DESsi bilan birgalikda ma’lum muddat ishlab turdi, ammo ekspluatasiya davrida vujudga kelgan qiyinchiliklar tufayli uni ishlatish to‘xtatildi.

Koriolis kuchi — Yerning o‘z mehvari atrofida aylanishi natijasida harakatlanayotgan jismlar (havo toklari, suv oqimlari, uchuvchi samolyotlar va h.k.) ning yo‘nalishi og‘ishiga sabab bo‘luvchi kuchdir.



5.2-rasm. Koriolis kuchining harakat yo‘nalishi.

Yer g‘arbdan sharqqa aylanadi. Shu aylanish natijasida harakatlanayotgan har

qanday jismning traektoriyasi to‘g‘ri chiziq emas, balki og‘ib ketganday ko‘rinadi. Shimoliy yarimsharda — harakat yo‘nalishi o‘ngga og‘adi. Janubiy yarimsharda — harakat yo‘nalishi chapga og‘adi.

Odatda shamol energiyasi shamolga perpendikulyar joylashgan ma’lum maydon ta’siri orqali aniqlanadi, ya’ni quyidagi ifoda orqali:

$$N_{sham.toki}=0,0049\cdot\rho\cdot\upsilon\cdot F;$$

bu yerda: ρ – havoning zichligi (harorat va atmosfera bosimiga nisbatan), kg/m^3;
υ– havo tokining tezligi, m/s; F – maydon yuzasi, m^2.

Shamol energetik qurilmasi uzatayotgan energiya miqdori, havo toki hosil qiladigan energiya miqdoridan tubdan farq qiladi. Chunki havo toki energiyasining bir qismi shamol g‘ildiragi parraklarida, reduktor va generatorlarda isrof bo‘ladi. Isrof bo‘lgan energiya miqdori, shamol energiyasidan foydalanish koeffitsienti bilan hisobga olinadi. Shamolga perpendikulyar joylashgan maydon yuzasini shamol g‘ildiragi diametri bilan belgilab, shamol energetik qurilmasining quvvatini quyidagi ifoda orqali aniqlash mumkin:

$$N_{sham.ener.quril}=0,00386\cdot\ \rho\cdot\upsilon\cdot D^2\cdot\xi_{par}\cdot\eta_{red}\cdot\eta_{gen}$$

bu yerda: *D*-ishchi g‘ildiragining diametri, *m*; $\eta_{red.}$ va $\eta_{gen.}$- reduktor va generatorning foydali ish koeffitsientlari; ξ_{par} - parraklarda isrof bo‘lgan havo toki energiyasi.

Hisoblarga ko‘ra, parrakli shamol dvigatellarining shamol energiyasidan foydalanish koeffitsienti 48% gacha bo‘lishi mumkin, shamol qurilmalarining umumiy foydali ish koeffitsienti undan ham kichikroq bo‘ladi.

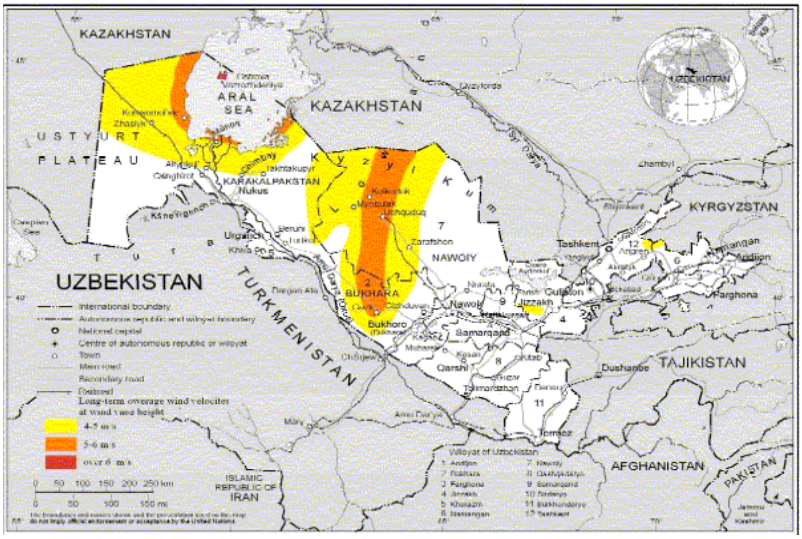
Shamolga perpendikulyar bo‘lib, asosan, shamol qurilmalarinig parraklari joylashadi. Shamol qurilmasi quvvatini parraklar soni emas balki, ish g‘ildiragining diametri belgilaydi. Shamol agregatining quvvati, shamol tezligiga to‘g‘ri va ish g‘ildiragining parraklari soniga teskari proporsional bo‘lib, quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$N_{sham.ener.quril}=f(\upsilon/n)$$

§5.2. O‘zbekiston sharoitida shamol energiyasidan foydalanish istiqbollari.

O‘zbekistonda shamol energiyasi resurslari salohiyatini baholash va ulardan foydalanish bo‘yicha ilmiy tadqiqoq ishlari olib borilmoqda. Yaqin vaqtgacha Respublikamizning shamol energiyasi resurslari yalpi (nazariy) salohiyati 2,2 mln. t.n.e. deb baholab kelingan edi. Ammo bunda lokal, alohida hududlardagi (Navoiy, Ustyurt, Buxoro va Bekobod) shamol energiyasi salohiyati to‘la hisobga olinmagandi. Bundan tashqari, bu ko‘rsatgich birbiridan uzoqda joylashgan aktinometrik stansiyalarning ma’lumotlariga ko‘ra 5-8 metr balandlik uchun hisoblangandi (aslida 25-100 metrda aniqlanishi kerak).

O‘zbekiston Respublikasi birinchi Prezidenti 2013-yil ―Muqobil energiya manbalarini yanada rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risidagi farmonlarga asosan respublikamiz hududlarining qayta tiklanadigan energiya manbalari salohiyatini qaytatdan baholash va ulardan foydalanish ko‘rsatgichlarini oshirish lozimligini ta’kidlagan edi. Shunga asosan, 2015 yilda Germaniyaning-Intec-Copa, «GEONET» va «O‘zbekenergo» AJ kompaniyalari hamkorligida O‘zbekiston hududida shamol energiyasi resurslar salohiyatini baholash va shamol energetikasi xaritasini tuzish bo‘yicha tadqiqotlar olib borildi (5.3-rasmga). Tadqiqotlar Respublikamizning oltita mintaqasida shamol energiyasi resurslari salohiyatini aniqlash va ulardan foydalanish imkoniyatlari baholash edi.

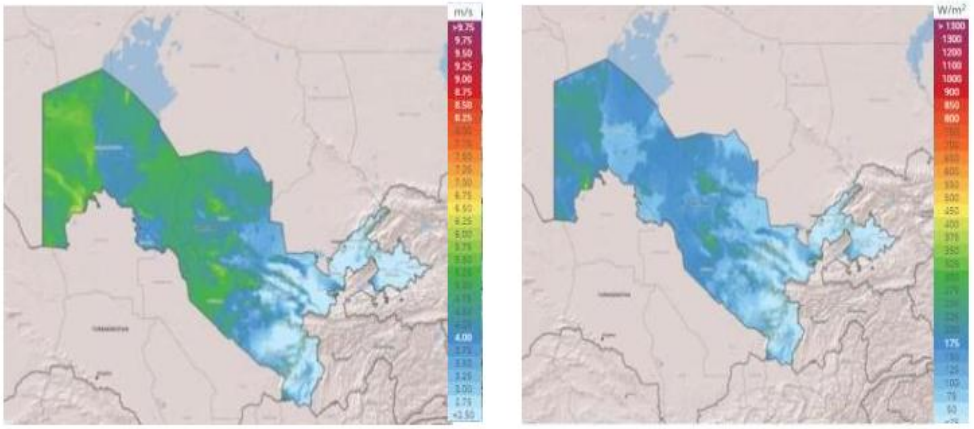


5.3-rasm. O‘zbekiston hududida shamol energetik resurslari xaritasi.

Germaniyalik mutaxassislar 3D modellashtirish yordamida mintaqamizning shamol atlasini ishlab chiqdilar. Navoiy, Buxoro, Toshkent, Qashqadaryo, Samarqand va Qoraqalpog‘iston katta quvvatli shamol turbinalarini o‘rnatish uchun

istiqbolli mintaqalar deb topildi (5.4-rasm). Olib borilgan tadqiqot natijalariga ko‘ra Respublikamizning shamol energiyasi yalpi salohiyati 80 m balandlikda 520 GW ni tashkil qilishi baholandi.

Mamlakatimizda muqobil energiya manbalari hayotga tadbiq etish bo‘yicha bir qator loyihalar joriy qilinmoqda, me’yoriy-huquqiy asos ishlab chiqarilmoqda. Shamol energetikasi imkoniyatlarini baholash shamol energetikasi manbalarini sifatli va samarali tahlil etib, kelgusida mamlakatda elektr energiyasi ta’minoti va energetik muvozanatni saqlashda muqobil energiya manbalarining rolini kuchaytirishga imkon yaratadi.



а) **б)**

5.4-rasm. Mintaqamizning shamol energetik xaritasi (Global wind atlas)

a–10 m balandlikdagi shamolning o‘rtacha tezligi; b–10 m balandlikdagi shamolning tokining solishtirma quvvati;

Xalqaro konsultantlar navbatdagi tashriflarida vazirliklar va idoralarda qator amaliy uchrashuvlar va suhbatlar o‘tkazib, kelgusida yurtimizda zamonaviy shamol energetikasi texnologiyasini tadqiqot qilish va joriy etish bo‘yicha ishlarni davom ettirishni o‘zlariga belgilab oldilar. Xorijiy ekspertlar yurtimizda shamol energetikasi manbalarini baholash bo‘yicha ishlarni davom ettirib, o‘z bilim va tajribalarini O‘zbekistonlik hamkasblariga o‘rgatadilar, shuningdek shamol energetikasini rivojlantirish bo‘yicha mahalliy ihtisoslikni yaratishga yordam beradilar.

O‘zbekistonda shamol energiyasidan elektr energiyasi ishlab chiqarish uchun shamol turbinalarini loyihalash, qurish va ulardan foydalanish bo‘yicha tajriba orttirish maqsadida 2011-yilda tajriba-sinov shamol turbinasi yaratish

rejalashtirilgan. Markaziy Osiyodagi birinchi tajriba qurilmasini 2013 yil Chorvoq suv ombori hududida (Toshkent viloyati, Bo‘stonliq tumani, Yubileyniy posyolkasi) ishga tushirildi.

O‘rnatish ustunining balandligi 65 metr, qanotlarining diametri esa 56 metrni tashkil qiladigan quvvati 750 kVtli shamol qurilmasi ishga tushirildi. Uning yillik elektr enrgiyasi ishlab chiqarishi 2,3 million kVt·soatni tashkil etadi.

BAAning «Masdar» kompaniyasi Zarafshonda SHESsini qurishni boshladi. 2024 yilning oxirigacha foydalanishga topshirilishi kutilayotgan mazkur stantsiya 1,5 mln xonadonga etarli hajmda elektr energiyani ishlab chiqarishi ko‘zda tutilgan. «Masdar» kompaniyasi, Investisiyalar va tashqi savdo vazirligi hamda O‘zbekiston Respublikasi Energetika vazirligi o‘rtasida qurilayotgan elektr stantsiyasining loyihaviy quvvatini 500 MWdan 1,5 GWgacha oshirish bo‘yicha bitim imzolandi.

§5.3 Shamol turbinalari uchun Xalqaro Elektrotexnik Komissiya (IEC) tomonidan nashr etilgan xalqaro standartlar

IEC 61400 - bu shamol turbinalari rejalashtirilgan xizmat muddati davomida xavf-xatarlardan kelib chiqadigan zararlarga qarshi mos ravishda ishlab chiqilganligini ta’minlash uchun ishlab chiqilgan dizayn talablari to‘plami. Standart turbinaning ishlash muddatining ko‘p jihatlarini qurishdan oldin, sinovdan o‘tkazilayotgan, yig‘ilgan va ekspluatatsiya qilinadigan turbina komponentlariga taalluqlidir. Shamol turbinalari kapital talab qiladi va odatda ular o‘rnatilishi va ishga tushirilishidan oldin sotib olinadi. Ushbu standartlarning ba’zilari mustaqil, uchinchi tomon tomonidan tekshirilishi mumkin bo‘lgan texnik shartlarni taqdim etadi va shuning uchun shamol turbinalari moliyalashtirilishi va o‘rnatilishi uchun biznes shartnomalarini tuzish uchun zarurdir.

IEC 1995 yilda ushbu mavzu bo‘yicha xalqaro sertifikatlashni standartlashtirishni boshladi va birinchi standart 2001 yilda paydo bo‘ldi.

Umumiy standartlar to‘plami ba’zan turli milliy standartlarning o‘rnini bosadi va global sertifikatlash uchun asos bo‘ladi. Kichik shamol turbinalari 200 m^2 gacha

bo‘lgan maydonni egallaydi va biroz soddalashtirilgan IEC 61400-2 standarti ularga javob beradi. IEC 61400-1 standartidan 200 m^2 gacha maydondan kam turbinalar uchun ham foydalanish mumkin. Østerild shamol turbinasi sinov maydonida prototiplarni ishlab chiqishda yuklama va shovqin standartlari qo‘llaniladi. IEC, API, ISO va boshqalar standartlari AQSH offshor shamol turbinalarini sertifikatlash uchun ishlatiladi. AQSHda standartlar IEC standartlariga muvofiq bo‘lishi mo‘ljallangan ba’zi qismlari talab qilinadigan hujjatlardir. AQSH Milliy qayta tiklanadigan energiya laboratoriyasi IEC standartlarini ishlab chiqishda ishtirok etadi va ushbu standartlarga muvofiq uskunani sinovdan o‘tkazadi. Biroq, AQSH offshor turbinalari uchun ko‘proq standartlar talab qilinadi va eng muhimlari:

• ISO 19900, dengiz tuzilmalari uchun umumiy talablar

• ISO 19902, qattiq po‘latdan dengiz tuzilmalari

• ISO 19903, qattiq beton dengiz tuzilmalari

• ISO 19904-1, suzuvchi dengiz tuzilmalari - mono-korpuslar, yarim suv osti qurilmalari va shpallar

• ISO 19904-2, suzuvchi dengiz tuzilmalari - kuchlanishli oyoq platformalari

• API RP 2A-WSD, qattiq dengiz po‘lat platformalarini rejalashtirish, loyihalash va qurish uchun tavsiya etilgan amaliyot - ishchi stress dizayni.

Kanadada oldingi milliy standartlar eskirgan va shamol sanoatiga to‘sqinlik qilgan va ular Kanada standartlari assotsiatsiyasi tomonidan bir nechta modifikatsiyalar bilan yangilangan va 61400 bilan uyg‘unlashtirilgan. IEC 61400 uchun yangilanish 2016 yilga rejalashtirilgan. Kichik shamol turbinalari uchun global sanoat sertifikatlash talablarini "bir marta sinovdan o‘tkaz, hamma joyda sertifikatlash" maqsadi bilan uyg‘unlashtirish ustida ishlamoqda. Buyuklama Britaniya, AQSh va yaqinda Yaponiya, Daniya va boshqa mamlakatlar o‘rtasida katta hamkorlik olib borilmoqda, buning natijasida IEC 61400-2 standarti MCS sertifikatlashtirish sxemasi (Buyuklama Britaniyadan kelib chiqqan) AQSH bilan o‘zaro ishlashi mumkin (uchun). AShEA kichik shamol turbinasi standartiga mos keladigan misol) va boshqa mamlakatlar. Shamol turbinasi generatorlari (ShTG) sinflari Shamol turbinalari muayyan sharoitlar uchun mo‘ljallangan. Qurilish va

loyihalash bosqichida shamol turbinalari ta’sir qiladigan shamol iqlimi haqida taxminlar qilinadi. Turbinaning shamol sinfi shamol elektr stantsiyasini rejalashtirishning murakkab jarayonida e’tiborga olinishi kerak bo‘lgan omillardan biridir. Shamol sinflari qaysi turbinaning ma’lum bir saytning normal shamol sharoitlariga mos kelishini aniqlaydi. Turbina sinflari uchta parametr bilan belgilanadi - o‘rtacha shamol tezligi, ekstremal 50 yillik shamol va turbulentlik. Turbulentlik intensivligi shamolning odatda 10 daqiqa ichida qanchalik o‘zgarishini aniqlaydi.

Odatda shamol tezligi vertikal shamol kesilishi tufayli ortib borayotgan balandlik bilan ortadi. Yassi erlarda shamol tezligi balandlik bilan logarifmik ravishda ortadi. Murakkab relefda shamol profili oddiy o‘sish emas va qo‘shimcha ravishda tokning ajralishi sodir bo‘lishi mumkin, bu esa turbulentlikning keskin oshishiga olib keladi.

• IEC 61400-1:2005+AMD1:2010 Dizayn talablari

• IEC 61400-2: 2013 Kichik shamol turbinalari

• IEC 61400-3: 2009 Dengizdagi shamol turbinalari uchun dizayn talablari

• IEC 61400-4: 2012 Shamol turbinasi vites qutilari uchun dizayn talablari

• IEC 61400-6:2020 Minora va poydevorni loyihalash talablari

• IEC 61400-11:2012 Akustik shovqinni o‘lchash texnikasi

• IEC 61400-12-1: 2005 Elektr ishlab chiqaradigan shamol turbinalarining quvvat samaradorligi o‘lchovlari

• IEC 61400-12-2:2013/COR1:2016 Nacelle anemometriyasiga asoslangan elektr energiyasi ishlab chiqaruvchi shamol turbinalarining quvvat ko‘rsatkichlari

• IEC 61400-12-1: 2017 Elektr ishlab chiqaradigan shamol turbinalarining quvvat samaradorligi o‘lchovlari / Sodar va lidar o‘lchovlari kabi masofadan zondlash qurilmalari

•IEC 61400-13: 2015 Mexanik yuklamalamalarni o‘lchash

• IEC TS 61400-14: 2005 Ko‘rinadigan tovush kuchi darajasi va tonallik qiymatlari deklaratsiyasi

• IEC 61400-21: 2008 Tarmoqqa ulangan shamol turbinalarining energiya sifati xususiyatlarini o‘lchash va baholash

• IEC 61400-22:2010 Muvofiqlikni sinovdan o‘tkazish va sertifikatlash (IEC 61400-22:2010 2018-08-31 da bekor qilingan va IECRE muvofiqlikni baholash tizimida mavjud bo‘lgan shamol sektori uchun etkazib beriladigan mahsulotlar (WE-OMC) bilan almashtirilgan.)

• IEC 61400-23: 2014 Rotor parraklarining to‘liq miqyosli strukturaviy sinovi

• IEC 61400-24: 2010 Chaqmoqlardan himoya qilish

• IEC 61400-25 -1:2006 Shamol elektr stantsiyalarini monitoring qilish va nazorat qilish uchun aloqa - printsiplar va modellarning umumiy tavsifi

• IEC 61400-25-2: 2015 Shamol elektr stantsiyalarini kuzatish va boshqarish uchun aloqa - Axborot modellari

• IEC 61400-25-3:2015 Shamol elektr stantsiyalarini monitoring qilish va boshqarish uchun aloqa - Axborot almashinuvi modellari

• IEC 61400-25-4: 2008 Shamol elektr stantsiyalarini kuzatish va boshqarish uchun aloqa - Aloqa profilini xaritalash

• IEC 61400-25-5: 2006 Shamol elektr stantsiyalarining monitoringi va nazorati uchun aloqa - Muvofiqlik sinovi

• IEC 61400-25-6: 2010 Shamol elektr stantsiyalarini monitoring qilish va boshqarish uchun aloqalar - Mantiqiy tugun sinflari va holat monitoringi uchun ma’lumotlar sinflari

• IEC TS 61400-26-1: 2011 Shamol turbinasi ishlab chiqarish tizimlari uchun vaqtga asoslangan mavjudligi

• IEC TS 61400-26-2: 2014 Shamol turbinalari uchun ishlab chiqarishga asoslangan mavjudligi

• IEC 61400-27-1:2015 Elektr simulyatsiya modellari - Shamol turbinalari

§5.4 Shamol turibinasining qismlari

Shamol turbinalarini loyihalash va qurishda asosiy variantlar quyidagilarni o‘z ichiga oladi: pichoqlar soni (odatda ikki yoki uchta); rotorning joylashuvi: minoraga nisbatan shamol tomonda (upwind) yoki shamol ortida (downwind); pichoqlarning materiali, tayyorlash usuli va profili; hub (markaziy qism) konstruksiyasi: qattiq (rigid), tebranuvchi (teetering) yoki sharnirli (hinged); quvvatni boshqarish: aerodinamik boshqaruv (stall control) yoki burchagini o‘zgartiruvchi pichoqlar (pitch control) orqali; rotor tezligi: doimiy yoki o‘zgaruvchan; yo‘nalishni moslash: o‘z-o‘zidan burilish (free yaw) yoki majburiy boshqaruv (active yaw); generator turi: sinxron yoki asinxron (qafasli yoki ikki tomonlama oziqlanadigan — doubly fed); reduktorli (gearbox) yoki to‘g‘ridan-to‘g‘ri uzatmali (direct drive) generator.

SHESi asosan quyidagi qismlardan tashkil topgan:

Parraklar (Blades). Shamol energiyasini o‘zlashtirib, rotorni harakatga keltiradi Aerodinamik optimallashtirilgan, shisha tolasi yoki uglerod tolasi kabi engil materiallardan tayyorlanadi.

Rotor (Rotor). Shamolning kinetik energiyasini mexanik energiyaga aylantiradi. Maksimal quvvat olish uchun optimallashtirilgan parraklar va gupchakni o‘z ichiga oladi. Maksimal energiya olish uchun optimallashtirilgan pichoqlar hubni o‘z ichiga oladi.

Bosh val. Rotordan reduktorga energiya uzatadi. Shamol yuklamalamalaridan hosil bo‘ladigan kuch va tebranish bilan ishlashga mo‘ljallangan.

Reduktor (Gearbox). Generator aylanish tezligini oshiradi. Yuqori burovchi moment va yuklamalamalar bilan ishlash uchun mo‘ljallangan.

Generator (Generator). Mexanik energiyani elektr energiyaga aylantiradi. Turbinaning xususiyatlariga qarab sinxron yoki asinxron tizimlarni o‘z ichiga oladi. Turbinaning xususiyatlariga qarab sinxron yoki asinxron tizimlarni o‘z ichiga oladi.

Nasadka (Nacelle). Shamol turbinasining sezgir qismlarini himoya qiladi va generator va reduktor kabi tizimlar uchun korpusni ta’minlaydi. Dizayn: Qattiq muhitda chidamlilik va texnik xodimlarning foydalanishi uchun mo‘ljallangan.

Yav tizimi (Yaw drive). Optimal energiya olish uchun nasadkani shamol yo‘nalishida tekislaydi. Motor va datchiklar yordamida ishlaydi. Tuzilishi: Dvigatellar va datchiklar yordamida ishlaydi, uzluksiz sozlashlarga bardoshli.

Minora (Tower). Vazifasi: Rotor va nacelleni shamol tezligi bir xil bo‘lgan balandliklarga ko‘taradi. Konstruksiya: Po‘lat yoki betondan tayyorlangan, turbinaning og‘irligini ko‘tarish va atrof-muhit kuchlariga bardosh berish uchun mo‘ljallangan.

Boshqarish tizimi. Vazifasi: Turbinaning ishlashini nazorat qiladi va xavfsiz, samarali ishlashni ta’minlaydi. Dizayn: avtomatlashtirilgan, real vaqt rejimida diagnostika va masofadan kuzatish imkoniyatlari mavjud.

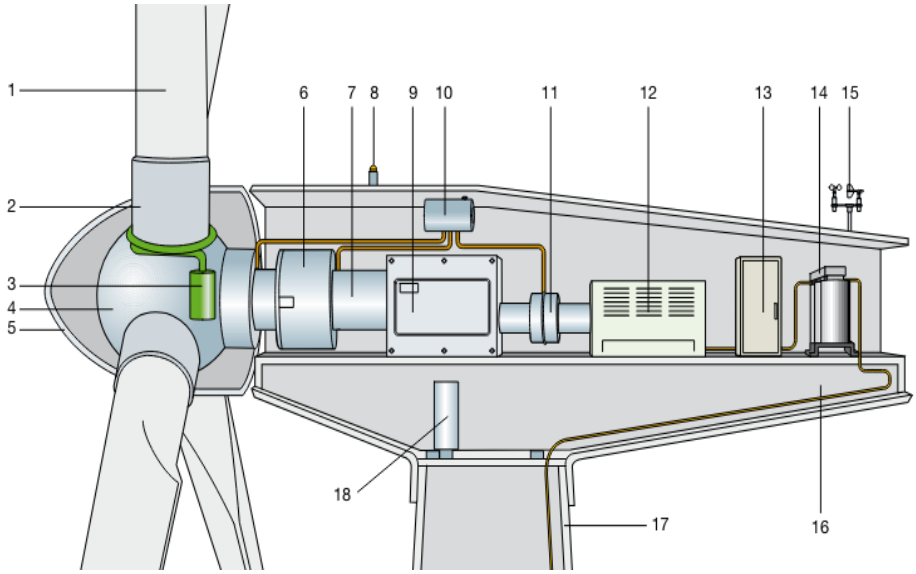
Pitch tizimi (Pitch control). Vazifasi: Kuchli shamol paytida energiyani maksimal darajada ushlab turish va turbinani himoya qilish uchun parraklar burchaklarini sozlaydi. Dizayn: Avtomatlashtirilgan sozlashlarni boshqarish tizimi bilan integratsiyalashgan.

Asosiy val (past tezlikli val) (Main Shaft (Low-Speed Shaft). Vazifasi: Rotordan reduktorga energiya uzatadi. Shamol yuklamalamalarining kuchi va tebranishini engish uchun mo‘ljallangan.

Shamol dvigatelini shamolga qaratib turish uchun flyuger (yoki boshqa shamol yo‘nalishini o‘lchovchi qurilma) dan kelayotgan shamol yo‘nalishini tekshirish uchun signallar kuzatiladi. Ushbu ma’lumot bilan boshqaruvchi burish dvigatellarini kerak bo‘lganda nacelleni burish uchun ishga tushirishi mumkin.

5.5-rasm. Shamol elektr stansiyasining tarkibiy qismlari.

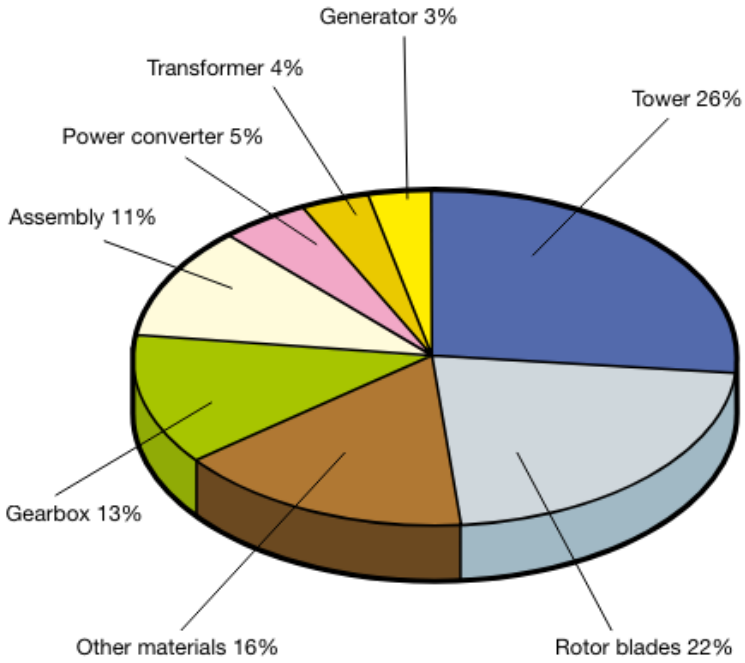
Biroq, ko‘pgina turbina konstruksiyalari burilish harakatida cheklangan. Quvvat yoki boshqaruv signallarini pastki minoradan yuqoriga o‘tkazuvchi kabellar odatda bir-biriga bog‘langan bo‘lib, nacelle aylanganda belgilangan miqdorda burashga ruxsat beriladi. Agar o‘sha kabellar haddan ziyod buralgan bo‘lsa, ularni ankerlaridan sug‘urib olish mumkin va natijada o‘ta katta shikastlanish yuzaga keladi. Chegaraviy kalit buralish chegarasiga etganligi haqida nazoratchini xabardor qilish uchun foydali. Ushbu cheklov mavjud bo‘lsa ham, kabellar takroriylik tufayli eskirishi mumkin.



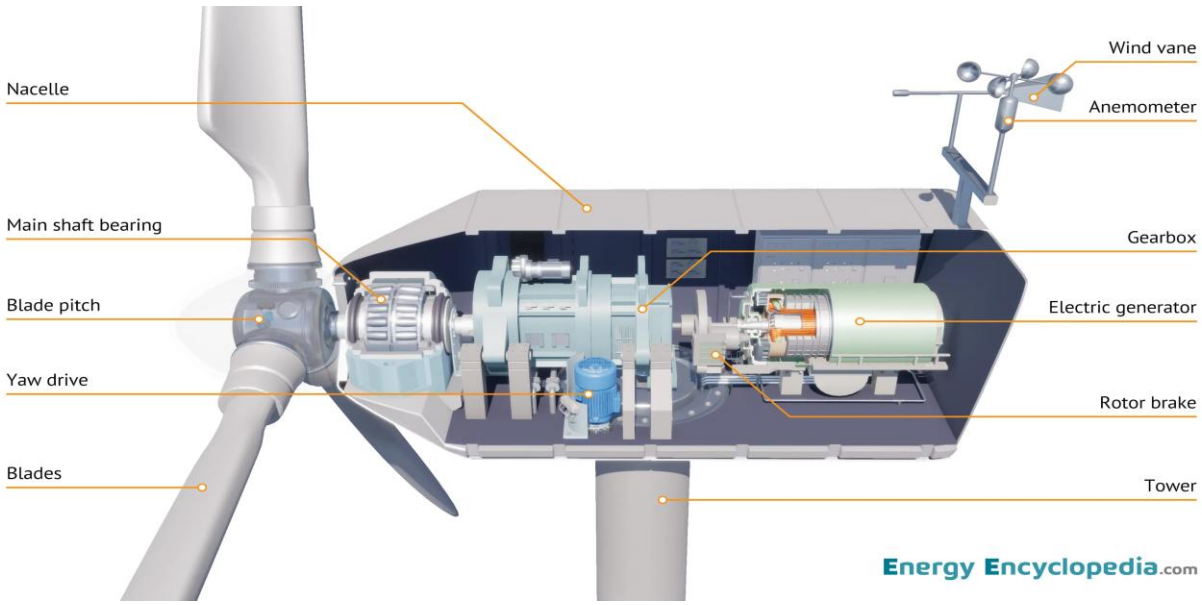
5.6-rasm. Shamol elektr stansiyasining tarkibiy qismlari.

1-parrak; 2-parrak tayanchi; 3-pitch burchagi aktuatori; 4-hub; 5-yigiruvchi; 6-asosiy tayanch; 7-asosiy val; 8-samolyotlarning ogohlantiruvchi chiroqlari; 9-uzatmalar qutisi; 10-mexanik tormozlar; 11-gidravlik sovitish qurilmalari; 12- generator; 13-kuch o‘zgartirgich va elektr boshqaruv, himoya va uzish qurilmalari; 14-transformator; 15-anemometrlar; 16-nacelle ramkasi; 17-tayanch minorasi; 18-burilishni boshqaruvchi qurilma.

Xarajatlar nuqtai nazaridan, turli tarkibiy qismlarning umumiy qiymatiga nisbatan foiz 5.7-rasmda ko‘rsatilganidek bo‘linadi.



5.7-rasm. Shamol elektr stansiyasining tarkibiy qismlarining xarajatlari.

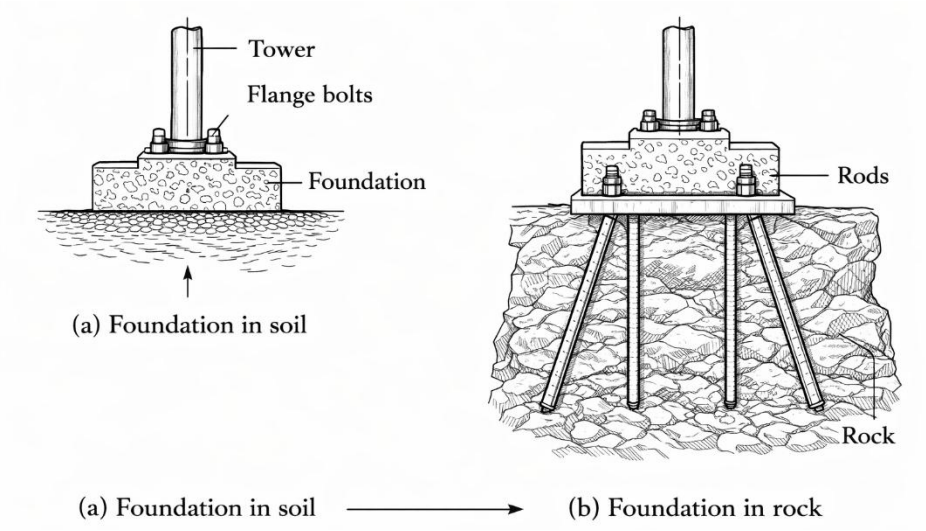


5.8-rasm. Shamol elektr stansiyasida uzatmalar qutisining joylashuvi.

Shamol turbinasining poydevori eng og‘ir va ekstremal ish sharoitlarida ham turbina tik va barqaror turishini ta’minlash uchun etarli darajada mustahkam bo‘lishi kerak. Ko‘pgina joylarda poydevor temir-beton platforma (pad) ko‘rinishida quriladi. Betonning og‘irligi barcha holatlarda ag‘darilib ketishga qarshi etarli qarshilik hosil qiladigan qilib tanlanadi.

Ba’zan turbinalar tosh (qoya) ustiga o‘rnatiladi. Bunday holatda poydevor chuqur burg‘ulangan teshiklarga sement bilan mahkamlangan metall sterjenlardan iborat bo‘lishi mumkin. Tekis sirt hosil qilish uchun beton platforma ishlatiladi, ammo cho‘zilish (tortilish) kuchlari asosan aynan shu sterjenlar orqali qabul qilinadi.

Shamol turbinalari poydevorlarining turli variantlari 5.8-rasmda ko‘rsatilgan.



5.9-rasm. Shamol turbinalari poydevorlari (Hau, 1996 asosida).

Minorani o‘rnatish usuli uning konstruksiyasini loyihalashga bevosita ta’sir qiladi. Katta quvvatli turbinalar odatda kranlar yordamida o‘rnatiladi. Kichik va o‘rta quvvatli turbinalar esa ko‘pincha o‘z-o‘zini ko‘tarish (self-erecting) usuli bilan o‘rnatiladi.

O‘z-o‘zini ko‘tarishning eng keng tarqalgan usullaridan biri — minoraga nisbatan to‘g‘ri burchak ostida o‘rnatilgan **gin pole** yoki “A-ramka”dan foydalanishdir. A-ramka kabel yordamida minoraning yuqori qismiga ulanadi. So‘ngra bloklar (sheaves) bilan birgalikda lebyodka (winch) yordamida minora ko‘tariladi.

Bunday o‘rnatish usulida minoraning pastki qismi maxsus **sharnirlar (ilgakli tayanchlar)** bilan jihozlangan bo‘lishi va minora tik holatga keltirilgandan so‘ng uni mahkamlash mexanizmi mavjud bo‘lishi kerak. Turbinaning o‘zi esa minorani ko‘tarishdan oldin unga biriktiriladi. Minoralarni o‘rnatishning ayrim usullari 6.45-rasmda keltirilgan.

Shamol elektr stansiyasini qurish bo‘yicha ishlar quyidagi bosqichlarni o‘z ichiga oladi:

• kirish yo‘llarini qurish va hududni tozalash.

• Elektr stansiyasini ishlatish uchun asosiy bino va inshootlarni qurish.

• Tanlangan shamol turbinalarini poydevor quyish, etkazib berish va o‘rnatish.

• O‘rta / past kuchlanishli liniyalarni o‘rnatish, optik tolali aloqa va h.k.

• ShES uchun elektr podstansiyasini qurish.

• Sinov va ishga tushirish.

Shamol stansiyasining yo‘llari va poydevorlarini qurishda juda katta ahamiyat berish lozim. Tuproq ishlarini boshlashdan oldin, tuproqni o‘rganish va qurilish maydonining iqlimiy va topografik xususiyatlarini baholash muhimdir, chunki hisobga olinmagan tashqi omillar ishning kechikishiga va ish narxining oshishiga olib kelishi mumkin, ba’zan esa shamol energiyasi loyihasining buzilishiga olib kelishi mumkin. Poydevorni qazish va quyish bosqichida og‘ir texnika jalb qilinadi, bu esa qurilish maydonchasiga tegishli kirish yo‘llarining mavjudligini talab qiladi. Ba’zi joylarda, masalan, yo‘l kesishmalari yoki suv to‘siqlari, qurilish ishlarinida jiddiy ta’sir etishi mumkin. Buhga ko‘ra geotexnik tadqiqotlar erning xususiyatlarini aniq aniqlash va keyingi ishlarning xavfsizligi (texnikaviy-iqtisodiy) to‘g‘risida yakuniy xulosa chiqarish kerak bo‘ladi.

Shundan so‘ng, muhandislar qurilish uchun maydonni minimallashtirish uchun shamol stansiyasini iloji boricha ixcham qilishga harakat qilishadi. Shamol stansiyasiga kirish yo‘llari shunday jihozlangan bo‘lishi kerakki, og‘ir transport vositalari shamol turbinalari joylashgan joyga, ayniqsa foydalanish va ta’mirlashning keyingi bosqichlarida osonlikcha etib borishi kerak. Shu munosabat bilan shamol stansiyalarining kirish yo‘llari uchun aniq talablar mavjud. Bu yuklama ko‘tarish qobiliyati, nishab barqarorligi va boshqalarga tegishli.

Yo‘lni qurishdan oldin tuproqni to‘g‘ri tayyorlash kerak. Xususan, bir necha qatlamlarda ehtiyotkorlik bilan to‘ldirish, agar shamol turbinalari avtomobillar tomonidan etkazib berilsa, yuklamalamalarga bardosh berishga imkon beradi. Odatda qayta to‘ldirish bir necha santimetr qalinlikdagi tabiiy shag‘al qatlami bilan amalga oshiriladi, so‘ngra tuproqqa kerakli kuchni berish uchun sun’iy shag‘alning ikkinchi qatlami yotqiziladi. Kuzatilishi kerak bo‘lgan yana bir talab yo‘llarning kengligi bilan bog‘liq, chunki shamol stansiyalarini qurish va modernizatsiya qilish katta burilish radiusi bo‘lgan yirik transport vositalarida maxsus yuklamalamalarni etkazib berishni o‘z ichiga oladi. Shamol turbinasi parraklarining uzunligi 50 m dan ortiq bo‘lishi mumkin, shuning uchun ushbu komponentlarni olib yuradigan

transport vositalari yo‘llarda burilish qilishda qiyinchiliklarga duch kelishi mumkin. Shu sababli, katta transport vositalarining o‘tishi uchun mos keladigan egrilik radiuslari o‘rnatiladi. Ushbu ikki qiymat, sidinglarning kengligi va radiusi, bir o‘zgaruvchining ikkinchisiga nisbatan qiymatini aniqlaydigan ba’zi jadvallarda bog‘langan. Yo‘lning qiyaligi qurilish ishlarida e’tiborga olinishi kerak bo‘lgan yana bir muhim nuqtadir, chunki juda og‘ir transport vositalari odatda tik erlarda haydashda qiyinchiliklarga duch kelishadi. Shu munosabat bilan, dizaynda qat’iy rioya qilinishi kerak bo‘lgan muayyan talablar o‘rnatildi.

Yo‘llarning maksimal qiyaligi taxminan 14-17% ni tashkil qiladi, bu tuproqni betonlash yoki asfaltlash uchun zarur - nishab ham sirt va transport vositasi o‘rtasidagi tutilishga ta’sir qiladi. Ushbu qiymatlar ko‘rsatkichdir, chunki yo‘lning aniq parametrlari loyihaning o‘ziga xos xususiyatlariga qarab belgilanadi. Shamol turbinalari, o‘rnatilgandan so‘ng, strukturaning barqarorligi va yaxlitligini buzishi mumkin bo‘lgan sezilarli yuklamalamalarga bardosh beradi.

Har bir shamol turbinasi ostidagi poydevorni to‘g‘ri hisoblash uchun har bir Maydonning geotexnik tadqiqotlarini o‘tkazish kerak. Ushbu bosqichda poydevor ostidagi tuproqning holatini aniqlaydilar va uni muayyan sharoitlarga moslashtiradilar. Misol uchun, yumshoq er topishlari yoki aksincha, yuqori yuklama ko‘tarish qobiliyatiga ega bo‘lgan qattiq toshga duch kelishlari mumkin. Strukturaning barqarorligini ta’minlaydigan poydevorni loyihalashda ushbu va boshqa jihatlarni hisobga olish kerak.

Shamol turbinalari uchun poydevorlar 2 guruhga bo‘linadi: 1. Tuproqning sirt qatlamlari tomonidan qo‘llab-quvvatlanadigan er usti poydevorlari: agar tuproq etarli darajada yuklama ko‘tarish qobiliyatiga ega bo‘lsa yoki poydevor nisbatan kichik yuklamalamalarni ko‘tarsa ishlatiladi. 2. Katta chuqurlikka quyilgan chuqur poydevorlar: agar tuzilmalar yuqori yuklamalamalarga bardosh berishi kerak bo‘lsa, natijada paydo bo‘ladigan kuchlanishlarni taqsimlash uchun ko‘proq joy mavjud. Ikkinchi turdagi poydevor qoziqlar, cho‘zilgan beton elementlardan foydalanadi, ular erga cho‘kadi va strukturaning mumkin bo‘lgan kuchlanish, bosim, ishqalanish yoki egilish kuchlanishlariga nisbatan ko‘proq barqarorligini ta’minlaydi. Qoziqli

poydevorlar past yuklama ko‘tarish qobiliyatiga ega bo‘lgan tuproqlar uchun ishlatiladi. Ushbu texnik yechim shamol turbinalarining ishlashi paytida strukturaning buzilishiga olib keladigan haddan tashqari yuklamalamalardan qochishga yordam beradi. Minora, parraklar va gondolaning og‘irligini qo‘llab-quvvatlash uchun odatda katta zamin bilan aloqa qilish maydoniga ega bo‘lgan sirt poydevori ishlatiladi.

Shamolning shamol turbinasiga ta’siri tufayli yuzaga keladigan qattiq kuchlariga qarshi turish uchun katta maydon kerak. Shamol turbinalari uchun poydevor quyishda, asosan, bunday turdagi ob’ektlarni qurish uchun asosiy material bo‘lgan bardoshli temir-beton ishlatiladi.

5.10-rasm. Samol elektr stansiyasining poydevorini quyish jarayoni.

Sohil poydevorlarining geometriyasi ko‘plab omillarga qarab o‘zgaradi. Odatda, material sarfini optimallashtiradigan yumaloq geometriyani va katta aloqa maydoniga ega bo‘lgan ko‘p burchakli (olti burchakli yoki sakkiz burchakli) va natijada paydo bo‘lgan stresslarni yaxshi qabul qilishni afzal ko‘radilar. Ko‘p burchak tayanchlar tomonidan taqdim etilgan yana bir afzallik - bu ichki mustahkamlovchi elementlarga bo‘lgan ehtiyojning kamayishi, chunki tomonlar soni qancha ko‘p bo‘lsa, ko‘rsatilgan mustahkamlash uchun kamroq material kerak bo‘ladi.

Turbinaning ishlashi uchun zarur bo‘lgan uskunalarning muhim qismi platformalarga o‘rnatilgan. **Platformalar** - tomonlari 20 dan 50 metrgacha bo‘lgan ko‘pburchakli bo‘shliqlar (odatda kvadrat yoki to‘rtburchaklar). Qurilish jarayonida turbinaning alohida qismlari, transformatorlar va boshqalarni o‘rnatadigan og‘ir kranlardan foydalaniladi. Platforma atrofida keng kirish yo‘llari va materiallarni saqlash joylari jihozlangan. Qurilish maydonchasini tayyorlash va o‘rnatish uchun kerakli komponentlarga quyidagilar kiradi: minora qismlarini o‘rnatish, minoraga gondolani o‘rnatish, rotorni tashkil etuvchi parraklarni yig‘ish va rotorni shamol generatoriga o‘rnatish.

Bu ishda birinchi va eng muhim shart, boshqalarda bo‘lgani kabi, shamol turbinalarini yig‘ishda o‘rnatilgan xavfsizlik standartlariga rioya qilishdir, ayniqsa operatorlarning aksariyati tarkibiy qismlarning katta og‘irligi va balandligi tufayli xavf ostida ishlaydigan qismi hisoblanadi.

Qurilish maydonchasini to‘g‘ri rejalashtirishga katta e’tibor beriladi.
Barcha materiallar va komponentlar oqilona tarzda joylashtirilishi kerak, bu esa quruvchilarga to‘siqsiz kirishni ta’minlashi va kran va uskunalarning harakat vaqtini minimallashtirishi kerak. Shamol turbinasini o‘rnatish uchun ikkita kran kerak bo‘ladi. Asosiy kran butun jarayon davomida uskunani olib yuradi. Yordamchi kran faqat montaj vaqtida o‘rnatilgan komponentni ushlab turish uchun ishlatiladi, shunda asosiy kran uni platformadagi gorizontal holatdan vertikal o‘rnatish holatiga o‘tkazishi mumkin. Minora qismlarini ulash va rotorni o‘rnatishda kran operatorlari va boshqa mutaxassislarning yaxshi muvofiqlashtirilgan ishi juda muhim. Minoraning pastki qismi birinchi navbatda o‘rnatiladi.

Bu poydevor va shamol turbinasi o‘rtasidagi aloqa nuqtasi. Ushbu ikki elementni ulash usuli taglikdagi qalin uchi bo‘lib, u murvat bilan o‘rnatilishi mumkin. Shamol turbinasi minorasining qolgan qismlari o‘rnatish tugaguniga qadar shunga o‘xshash tarzda ulanadi, lekin har safar ish yanada yuqori balandlikda amalga oshiriladi.

5.11-rasm. ShESning birinchi poydevorini quyish jarayoni.

Shamol elektr stansiyasining mustahkaligini oshirish uchun ustunni, ayniqsa uning asosini to‘g‘ri o‘rnatishingiz kerak. Qaysi turdagi qo‘llab- quvvatlash tanlangan bo‘lsa, shamol turbinasining ishlashi va xavfsizligi aniqlanadi. Shamol turbinasi uchun poydevor massiv strukturaning barqarorligi va mustahkamligining kalitidir.

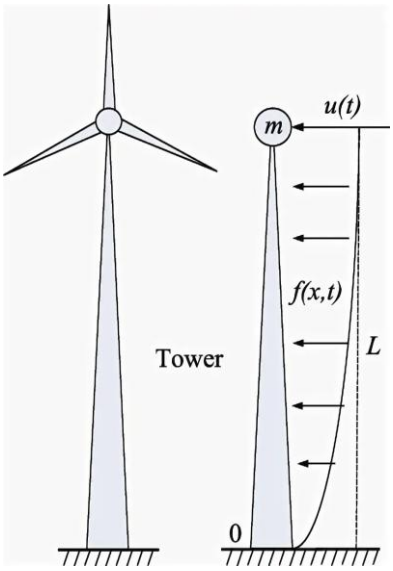
§5.5. Shamol elektr stansiyasining minora.

Minoralar turbinaning asosiy qismini havoda ko‘tarish uchun tayanchlardir. Odatda minora kamida rotorning diametri kabi yuqori. Kichikroq turbinalar uchun minora bundan ancha baland bo‘lishi mumkin. Odatda, minora balandligi 24 m dan kam bo‘lmasligi kerak, chunki shamol tezligi pastroq va ko‘proq erga juda yaqin turbulent. Masalan, standart 80 metr balandlikdan 20 metrga ko‘tarilganda, taxminan 5% qo‘shimcha energiya ishlab chiqarish mumkin. Hozirda baland minoralar kupymoqda.

Evropada o‘rnatilgan minoraning o‘rtacha balandligi 80 metr atrofida. Zamonaviy minoralar ichida lift, narvon va bir nechta oraliq platformalar mavjud. Minorada, odatda pastki qismida joylashgan bo‘lishi mumkin bo‘lgan yana bir element MVt transformatoridir.

Gorizontal o‘qli shamol turbinalari uchun keng tarqalgan minoralar turlari:

- arqonsimon minora (truss);
- po‘lat quvur (quvurli minora);
- panjarasimon minora.
- gibrid minora Tarixan, arqonsimon minora 1980-yillarning o‘rtalariga qadar ko‘proq ishlatilgan. masalan, AQShning dastlabki shamol turbinalari ushbu turdagi minoralardan foydalangan. O‘sha vaqtdan beri arqonsimon minoralar ko‘proq ishlatilgan.



5.12-rasm. Shamol elektr stansiyasining minorasining ko‘rinishi.

Quvurli minoralar bir qator afzalliklarga ega. arqonsimon minoralaridan farqli o‘laroq, ularning tayanchi ko‘p bo‘lmaydi vaqti- vaqti bilan tortilishi va tekshirilishi kerak bo‘lgan murvatli ulanishlar bo‘lmaydi va dezaini ham qulay hisoblanadi. Shamol turbinasi minoralari odatda po‘latdan yasalgan, garchi ba’zida temir-beton ishlatiladi. Material po‘lat bo‘lsa, uni korroziyadan himoya qilish uchun odatda galvanizli yoki korroziyaga chidamli kor-Ten po‘lat ishlatiladi.

Qattiq minoralar o‘tmishda turbinalar kichikroq (MVt dan kattaroq) bo‘lganda keng tarqalgan edi, ammo bugungi kunda kamdan-kam qo‘llaniladi. Ularning eng katta muammolari - sezilarli vizual ta’sir va yuqori qurilish va texnik xizmat ko‘rsatish xarajatlari. Ular bir nechta afzalliklarga ega: ular kamroq

materiallardan foydalanadilar (bir xil qattiqlikdagi standart po‘lat minoraning taxminan 50%) va ular kamroq soya hosil qiladi.

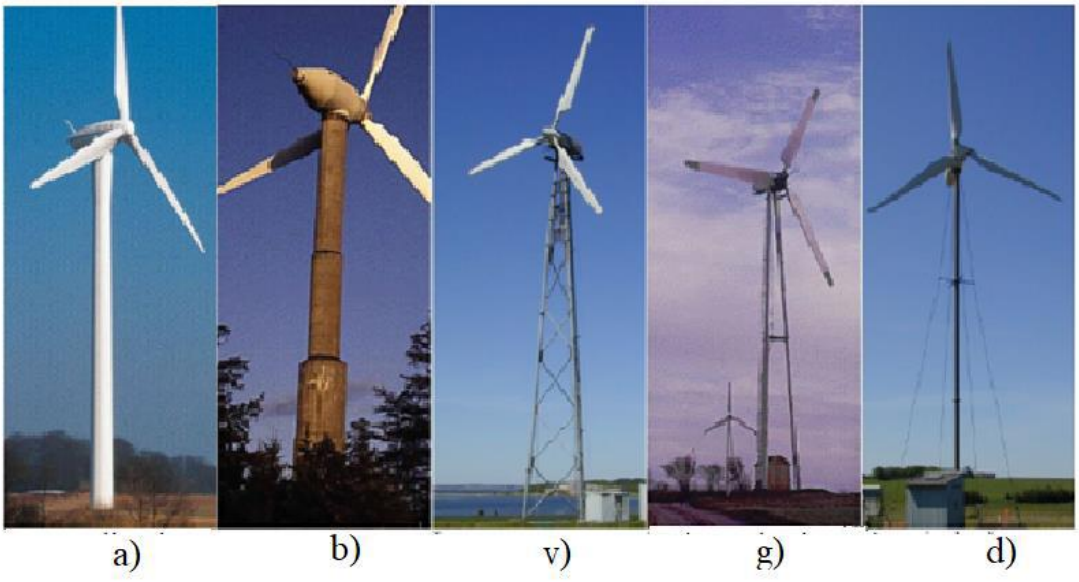
5.13-rasm. Shamol elektr stansiya minorasining ichki ko‘rinishi.

Quvurli po‘lat minoralar eng ko‘p ishlatiladigan yechimdir. Ular odatda konusning shakliga ega va diametri taxminan 4,5 metrdan tepada 2 metrgacha o‘zgarib turadi, shamol turbinasida yig‘ilgan 3 yoki 4 qismga bo‘lingan (ular bir-biriga bog‘langan). Bo‘limning uzunligi 20 dan 30 metrgacha o‘zgarishi mumkin. Asosan ular kesilgan, o‘ralgan va payvandlangan po‘lat plitalar bilan ishlab chiqariladi. 100 metrdan ortiq bo‘lgan yangi po‘lat minoralar 5 metrdan ortiq asosiy qism diametriga ega: bu muammo bo‘lishi mumkin, chunki ko‘plab mamlakatlarda avtomobil orqali tashish mumkin bo‘lgan maksimal o‘lcham 4,9 metrdan kam.

Beton minoralar po‘lat narxi juda yuqori bo‘lgan mamlakatlarda yechimdir (masalan, po‘lat ishlab chiqarish deyarli monopoliya bo‘lgan Braziliyada). Ular saytda yig‘ilgan bir nechta kichikroq prefabrik qismlardan iborat. Ushbu yechim komponentlarning kichikroq o‘lchamlari va materiallar sifatini yaxshi nazorat qilish tufayli oson tashish imkonini beradi. Ularning eng katta muammosi - bu og‘irlik (agar ular eng ko‘p bo‘laklarda ishlab chiqilmagan bo‘lsa, ular nacelledan ko‘proq og‘irlik qilishi mumkin).

Gibrid minoralar po‘lat narxining o‘zgaruvchanligini kamaytirish uchun bir nechta ishlab chiqaruvchilar tomonidan qo‘llaniladigan yana bir yechim bo‘lib, asosiy kamchiliklari shundaki, ularni yig‘ish ancha murakkab, shuning uchun ularni o‘rnatish xarajatlari yuqori.

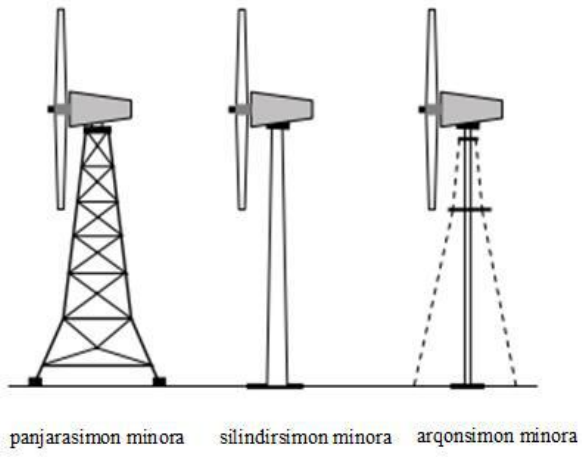
Minora shamol turbinasini parrakini istalgan balandlikda ushlab turishga yordam beradi. Minoraning eng yiriklari bular panjarasimon minora, silindirsimon minora va arqonsimon minoralardir. Panjarasimon minora temir ustunlarining bir biriga qo‘shilib paydo bo‘lgan minoradir, quyidagi chizmadagidek.



5.14-rasm. Gorizontal o‘qli shamol turbinalari uchun minora turlari.

a) quvurli po‘lat minora; b) beton quvurli minora; v) panjarasimon minora; g) uch oyoqli minora; d) arqonsimon (trossli) minora.

Panjarasimon minora bir qancha noqulayliklari bor. Eng asosiy muammo bu yomon ko‘rinishga ega ekanligi, ular kuzatuvchilar uchun ijobiy tarzda qabul qilinmaydi. Undan tashqari qushlarni o‘limiga sabab bo‘ladi, chunki ular gorizontal ustunlarda o‘rnatiladi. Bu harakat bo‘lsa qushlarni o‘limini ko‘paytirib yuboradipanjarasimon minora ishlatish tizimi ham ijobiy emas. Qurilish ishlari paytida agar hav harorati juda past darajaga tushib ketsa panjarasimin minorani qurilish tizimi qiyinlashadi, chunki ishchilar qo‘rqinchli ob havo tufayli tasir qilinadi.



5.15-rasm. Turli tipdagi minoralar sxemasi.

Bundan tashqari, uning qulflari yo‘qligi sababli uning davomiyligi havf ostida bo‘ladi. Shu kamchiliklar tufayli, oxirgi qurilmalar silindirsimon minora temir minoralar bilan ta’minlanayapti. Bu minoralar 10-20 metrli silindirsimon bo‘limlarning qo‘shilishi orqali paydo bo‘ladi. Bitta minorani to‘liq qurish uchun 2-3 kun sarflanadi. Silindrsimon minora o‘zining dumaloq kross bo‘limi bilan hamma yo‘nalishga qarshi eng ma’qul qarshilikni taklif qiladi. Bu minoralar odamlar tarafdan yaxshi qabul qilinadi va qushlar uchun havfi kamroq.

5.16-rasm. Yillar davomida shamol minoralarining balandligini ortishi.

Kichkina tizimlar uchun arqonsimon temirli minoralar foydalanilyapti. Qisman arqonli simlar, og‘irligini hisobga olgan holda minorani harajatini ancha qisqartirish mumkin. Odatda to‘rtda kabel tenglik bilan joylashtiriladi va 45 darajada moslashadi va minoraga mos keladi. Bu minoralarga etishish oson emasligi sababli

bularni ko‘p hajmda qurish unchalik ham mashhur emas. Shunga qaramasdan, arqonsimon minoralar Germaniyada foydalanilyapti. Minoradagi yuklama turbinaning hajmi bilan parallel tarzda kattalashadi. Shu sababli oxirgi vaqtlarda urf bo‘lgan Mega Wattli tizimlar koproq diameter va devor qalinligi kattaroq bo‘lishiga e’tibor qaratishyapti. Bu esa minoralarni transportda olib kelishda qiyinchiliklarni tug‘diradi.

§5.6 Shamol elektr stansiyasining parraklari

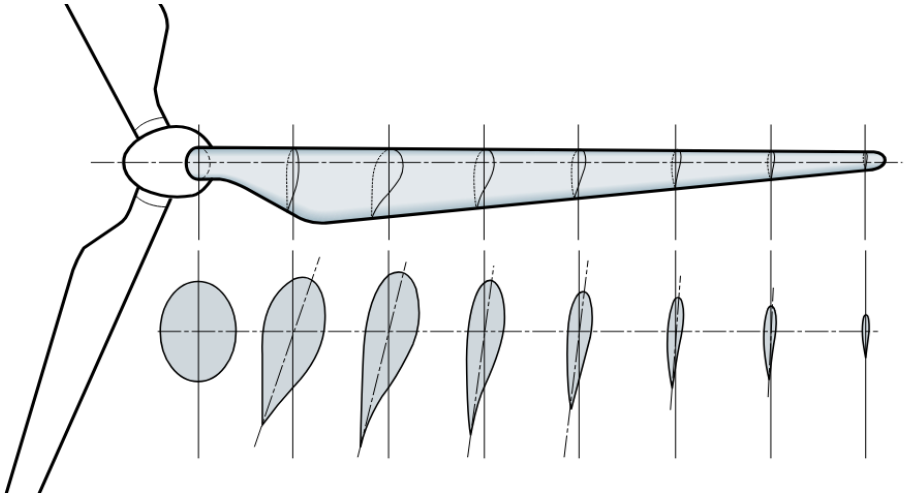
Shamol elektr stansiyasining parraklari muhim rol o‘ynaydi va ularning shakli, balandligi, og‘irligi va ishlatiladigan materiallari elektr energiyasini ishlab chiqarish uchun turbinaning samaradorligiga katta ta’sir ko‘rsatishi mumkin.

Katta parrakli shamol turbinasi, hatto nisbatan engil shamolli hududlarda ham qisqaroq qanotlarga qaraganda mavjud shamolni ko‘proq ushlab turishi mumkin. Past shamol tezligida ko‘proq shamol yig‘ish qobiliyati shamol energiyasidan foydalanish uchun mavjud bo‘lgan joylar sonini oshirishi mumkin.

Shamol qanchalik tez essa, parrakda ko‘proq ko‘tarilish hosil bo‘ladi, shuning uchun aylanish tezroq bo‘ladi. Yassi parrakka nisbatan kavisli rotor parrakning afzalliklari shundaki, shamol turbinasi parraklari uchlarini shamol harakatiga qaraganda tezroq harakatlanishiga imkon beradi, bu esa ko‘proq quvvat va yuqori samaradorlikni yaratadi.

Bir oz egilgan turbinaning qanotlari 5-10% ko‘proq shamol energiyasini olishi mumkin. Egri parraklar shamol tezligi past bo‘lgan joylarda ham samaraliroq ishlaydi. Shamol turbinasi uchun optimal parrak shakli havo pardasi bo‘lgan kavisli parrakdir, chunki bu shakl energiya ishlab chiqarish uchun ideal bo‘lgan yuqori aylanish tezligiga imkon beradi. Egri parrak shakli parrak shaklidagi havo plyonkasining boshqa tomonida eng ko‘p egrilik va yuqori bosimli havo kuchlari bo‘lgan tomondan hosil bo‘lgan past havo bosimidan ko‘tarilish hosil qiladi. Bu ikki kuch turbina parraklari ustidagi havo tokiga perpendikulyar ko‘tarilish hosil qiladi. Yaxshi o‘rnatilgan turbinali rotor parrak samaradorligini oshirish uchun havoning optimal kechikishini ta’minlaydigan aniq ko‘tarish va surish miqdorini hosil qiladi.

Shamol turbinasi parraklari engil bo‘lishi kerak, chunki ular engilroq bo‘lganda samaraliroq bo‘ladi. Bu shamol turbinalarini yig‘ish va demontaj qilishni osonlashtiradi, shuningdek, ularning aylanishini osonlashtiradi, ularning ish faoliyatini oshiradi. Yuqori material kuchiga ega engil tizimlar ideal bo‘lsada, vaznning kamayishi strukturaviy buzilish xavfini oshirishi mumkin. Og‘ir parrakli katta shamol turbinalari mahalliy yovvoyi tabiatga, ayniqsa parraklarga tushib, nobud bo‘ladigan ko‘chmanchi qushlarning suruvlariga salbiy ta’sir ko‘rsatishi mumkin.



5.17-rasm. Shamol parragining uzunligi bo‘yicha ko‘ngdalang kesimi.

5.17-rasmda tig‘ning odatdagi shakli va uning ko‘ndalang kesimlari ko‘rsatilgan; tig‘ yuqoriga o‘ralgan va ildiz bilan uchi orasidagi umumiy burchak taxminan 25° ni tashkil qiladi. Aerodinamik kuchlar nisbiy tezlik kvadratiga proporsional bo‘lgani uchun gupchakdan uzoqlashgan sari tez ortadi, shuning uchun pichoqning ildizga yaqin qismini yaxshi ko‘tarilish va past aerodinamik qarshilik bo‘lishi uchun loyihalash muhimdir.

Ko‘pgina mexanik tizimlarda bo‘lgani kabi, umumiy ishlash uchun kuch va vazn parametrlarini muvozanatlash odatiy holdir.

Har bir shamol tezligi uchun shamol generatori tomonidan ishlab chiqarilgan quvvat maksimal bo‘lgan optimal parrak burchagi mavjud. Bu optimal burchak shamol tezligiga bog‘liq. Misol uchun, 5° egilish burchagi optimal energiya ishlab

chiqarish uchun 7 m/s ish tezligida shamol turbinasi uchun optimal, 15,1 m/s da 20° va 25,1 m/s da 30°.

Shamol generatorining boshqa burchaklardagi ishlashi quvvatning pasayishiga olib keladi. Koʻproq impuls oʻtkazilishi tufayli havo toki tezligi ortishi bilan surish kuchayadi. Parrak burchagi oshgani sayin, frontal maydonning qisqarishi va shuning uchun parrakning tortilishining kamayishi tufayli surish kamayadi. Shamol generatorining parraklari markaziy markazga ulangan.

Ushbu parrak va markaz majmuasi shamoldan aerodinamik moment hosil qiluvchi turbinali rotor deb ataladi. Nima sababdan uch parrakli shamol turbinasini koʻp ishalatmiz.

Birinchidan, uchdan ortiq parrakni ishlatish shamol turbinasi samaradorligiga juda oz ta’sir qiladi, agar toʻrtta parrak ishlatilsa, bu juda kam ortadi, uchta emas, lekin rotorning ogʻirligi oshadi va aylanish tezligi eng yuqori quvvatga etadi.

Ikkinchidan, koʻp parraklar yuqori material va ishlab chiqarish xarajatlarini anglatadi. Koʻp parraklar koʻp mehnat talab qiladi. Parraklar soni ortib borishi bilan ular ingichka boʻlishi kerak, buning natijasida qattiqlik va aerodinamik samaradorlik yoʻqoladi. Koʻp sonli parraklar bosimni oshirishi va turbinaning butun tuzilishini agʻdarishiga olib kelishi mumkin.

Nihoyat, uchta parrak aylanadigan rotordagi dinamik shamol yuklamaini yaxshi muvozanatlash imkonini beradi. Uchta parrak bilan burchak momenti doimiy boʻlib qoladi, chunki bitta parrak yuqoriga koʻtarilganda, qolgan ikkitasi burchakka buriladi. Shunday qilib, shamol turbinasi shamolga qarshi silliq aylanishi mumkin. Shu sabablarga koʻra uchta parrak shamol energiyasida standartga aylandi.

Shamol turbinasi tezligi uning ishlab chiqarishi mumkin boʻlgan elektr miqdorini belgilaydi. Agar parraklar juda sekin aylansa, katta miqdordagi shamol toʻsiqsiz oʻtib, potentsial ishlab chiqarilishi mumkin boʻlgan quvvat miqdorini cheklaydi. Boshqa tomondan, agar parraklar juda tez aylansa, ular shamolda katta tekis aylanadigan disk kabi harakat qiladi, bu esa katta tortishish hosil qiladi va ishlab chiqarilishi mumkin boʻlgan quvvat miqdorini cheklaydi.

Zamonaviy shamol turbinalari turli tezliklarda aylanish uchun mo‘ljallangan va yuqori samarali uch qanotli turbinalar parrak tezligining oltidan ettigacha optimal nisbatiga ega.

Kuchli shamol paytida doimiy vites nisbatida yoki ularning optimal tishli nisbatiga yaqin ishlaydigan shamol turbinalari energiyani samarali yig‘ish va konvertatsiya qilishni yaxshilaydi.

Turbina parraklarining materiali elektr energiyasini ishlab chiqarish samaradorligiga katta rol o‘ynaydi. Shamol turbinasi parraklari chaqmoq urishi, do‘l, namlik va katta harorat o‘zgarishiga bardosh berish uchun engil, yuqori mustahkamlik, yuqori qattiqlik, yuqori chidamlilik bo‘lishi kerak. Shamol turbinasi parraklarini tayyorlash uchun bir nechta turdagi materiallar qo‘llaniladi, bu esa parraklarning eng yaxshi ishlashiga imkon beradi.

Shamol turbinasi parraklarini ishlab chiqarish uchun eng mos material yuqori mustahkamlik va qattiqlikka, shuningdek, past zichlikka ega bo‘lgan tola bilan mustahkamlangan kompozitsiyalardir. Kichikroq parraklar alyuminiy kabi engilroq metallardan tayyorlanishi mumkin, ammo tez-tez texnik xizmat ko‘rsatishni talab qiladi.

Hozirgi vaqtda tijorat shamol turbinasi parraklari polimer matritsasi va tolalarning kompozitsiyasi bo‘lgan tolali mustahkamlangan polimerlardan ishlab chiqariladi.

Ushbu materiallardagi uzun tolalar mustahkamlik va bo‘ylama qattiqlikni ta’minlaydi, matritsa esa tekislikdan tashqari kuch, delaminatsiya mustahkamligi, sinishga chidamliligi va qattiqligini ta’minlaydi.

Shisha tolali va uglerod tolasi bilan mustahkamlangan plastmassalar

- shisha tolali va uglerod tolasi ham yaxshi parrak materiallari hisoblanadi, chunki ular yuqori shamol tezligiga chidamlili. Samolyot qanoti ostidan o‘tayotgan havodan ko‘tarilish hosil qilganidek, shamol turbinasining rotor qanotlari ham uning yuzasi ustidagi shamol toki ta’sirida aylanadi.

Shamol turbinasi rotor parraklari elektr energiyasini ishlab chiqarish uchun har ikki yo‘nalishda aylanish uchun mo‘ljallangan bo‘lishi mumkin

- soat yo‘nalishi bo‘yicha yoki soat sohasi farqli o‘laroq.

Ko‘pgina turbinalar qulaylik va global standart sabablarga ko‘ra soat yo‘nalishi bo‘yicha aylanadi. Shu bilan birga, rotorning aylanish yo‘nalishi ikki yoki undan ortiq shamol turbinalari bir-birining orqasida joylashganda muhim bo‘lishi mumkin va termal barqarorlikka ega.

Parraklarga xizmat ko‘rsatish va ta’mirlashning ikki turi mavjud: profilaktika va tuzatuvchi. Birinchisi, parraklarning holatini aniqlash va mumkin bo‘lgan zararni izlash uchun davriy tekshiruvlarni o‘tkazishdir.

Ushbu tekshiruvlar turli yo‘llar bilan amalga oshiriladi: erdan, arqonlar, kranlar yoki ko‘tarish platformalari yordamida parraklarga ko‘tarilish. O‘z navbatida, tuzatuvchi ta’mirlash ham sirtda, ham uning tuzilishida paydo bo‘ladigan shikastlanishlarni tuzatish uchun parraklarni ta’mirlash yoki rekonstruksiya qilishdan iborat. Shamol turbinasi parraklari yorilishi, chaqmoq yoki qushlarning urilishi natijasida shikastlanishi yoki old va orqa tomonida teshiklar hamda boshqa shikastlanishlar bo‘lishi mumkin. Operatorlar shamol turbinalari tepasiga chiqmasligi uchun masofadan boshqariladigan dronlar kabi muqobil ta’mirlash va tozalash tizimlari o‘rganilmoqda.

Parraklar qanchalik katta bo‘lsa, ular sekinroq aylanadi, lekin shamolni boshlash uchun kamroq kuch talab qiladi. Tabiiyki, shamol g‘ildiragi ham tez aylanmaydi. Shamol g‘ildiragini ko‘p sonli parraklar bilan boshlash osonroq, ularning soni shamol toklari ta’sirida sezgirlikka ta’sir qiladi. Bu shamol generatorining aylanish tezligini va quvvatini pasaytiradi. Shu sababli, 5-6 parrakli shunga o‘xshash qurilmalar ishlab chiqarilmaydi.

Shamol turbinasining shovqin darajasi uning diametriga va aylanish tezligiga bog‘liq. Aholi punktidan uzoqda o‘rnatilishi rejalashtirilgan shamol turbinasi parraklarini tanlashda ushbu omilni hisobga olish kerak.

Joriy generatorning shamol g‘ildiragi qanchalik baland bo‘lsa, undan ko‘proq elektr energiyasini olish mumkin. Optimal balandlik 6 dan 15 metrgacha. Shu sababli, uy generatorlarining shamol g‘ildiraklari uylarning tomlariga yoki baland bardoshli ustunga o‘rnatiladi.

Parraklar turli xil materiallardan tayyorlanadi. Ular quyidagi talablarga ega:

Og‘ir. Shamolga uzoq vaqt ta’sir qilish natijasida stansiya qulab tushmaydi va deformatsiyalanmaydi.

Kam vazn. Yig‘ish joyiga tashishni, o‘rnatishni osonlashtiradi, strukturaning qismlariga va uning harakatlanuvchi elementlariga yuklamani kamaytiradi. Xususan, podshipniklar, vallar, uzatmalar, vites qutilari va boshqalar.

Atrof muhit omillariga qarshilik - quyosh radiatsiyasi, yog‘ingarchilik, past va yuqori haroratlar, ularning keskin o‘zgarishi. Ularni ishlab chiqarish uchun eng yaxshi variant quyidagi materiallardir: engil metallar; plastik; shisha tolali; kompozitsion.

Ular yuqoridagi talablarga to‘liq javob beradi.

Gorizontal shamol turbinalari uchun har xil turdagi parraklar ishlatilishi mumkin, chunki ushbu qurilma dizayni murakkab shakldagi parraklardan foydalanishga imkon bermaydi. Shu bilan birga, har bir kishi mavjud turlarni yaxshilash, idealga intiladi. Hozirgi vaqtda quyidagi turdagi parraklar e’tiborga loyiqdir: suzib yurish; qattiq plastinka.

Ular shakli va dizayni bo‘yicha bir-biridan farq qiladi va turli materiallardan tayyorlangan. U kuchli, atrof muhitga chidamli tuval cho‘zilgan ramkaga asoslangan. O‘rnatish ramkaning bir tomoni tuval bilan qoplanmasligi uchun amalga oshiriladi. Natijada, uchburchak parrak chiqadi, uning tomonlaridan biri taglikka biriktirilmaydi.

Bu g‘ildirakning quyidagi tarzda aylanishiga olib keladi: shamol toki materiyani to‘ldiradi va elkanda kerakli bosim hosil qiladi. Parrak aylana boshlaydi va aylanish harakatini g‘ildirakka uzatuvchi rodga mos ravishda harakat qiladi. Ushbu parametr uy shamol generatorini yaratish uchun eng maqbuldir, chunki u doimiy g‘amxo‘rlik va pervanelning holatini va, xususan, matoni kuzatishni talab qilmaydi.

Shamol turbinasi parrakning uzunligini hisoblash. Shamol turbinasidagi parraklar asosiy qismlardan biridir. Tok hosil qiluvchi dvigatelning kuchi va tezligi ularning hajmi va shakliga bog‘liq. Shamol generatorini yoki ushbu qurilmalarning

fermasini o‘rnatmoqchi bo‘lganlar, birinchi navbatda, savolga duch kelishadi - parraklar qancha vaqtni tanlash kerak? Ushbu mahsulotlarning turini va aerodinamikasini hisobga olgan holda ularning optimal shakli uzoq vaqtdan beri ishlab chiqilgan. Shu sababli, muhim bo‘lgan parrakning uzunligi kelajakdagi dizaynning kuchini belgilaydi.

Tanlashda, shamol g‘ildiragining daqiqada aylanishlar soni uning diametriga va parrak uzunligiga bog‘liqligini hisobga olish kerak. Muhim ko‘rsatkich ham shamol g‘ildiragining tezligi - parrak uchining harakat tezligining unga ta’sir qiluvchi shamol tokining tezligiga nisbati. Bu ko‘rsatkich shamol g‘ildiragi ma’lum bir shamol tezligida vaqt birligida qancha aylanishni ko‘rsatadi. Shuning uchun bir xil tezlikdagi shamol turbinalarida shamol g‘ildiragi va turli o‘lchamdagi parraklar bo‘lishi mumkin. Ma’lum o‘lchamdagi shamol g‘ildiragi uchun parraklarni qancha vaqt davomida sotib olish kerakligini aniqlashda buni hisobga olish kerak, shunda generator daqiqada kerakli miqdordagi aylanishlarni amalga oshiradi.

Generatorlar har xil quvvatga ega bo‘lishi mumkin. Shu bilan birga, chiqishda kerakli xususiyatlarga ega toklarni ta’minlash uchun ular shamol g‘ildiragining ma’lum bir tezlikda aylanishiga muhtoj. Agar bu xususiyat sizning mintaqangizdagi o‘rtacha yillik shamol tezligida shamol g‘ildiragining daqiqada aylanish sonidan farq qilsa, unda ularning sonini oshiradigan vites qutisini o‘rnatishingiz kerak.

Parraklar soni ham muhimdir. Albatta, ikkita parrak strukturaning minimal og‘irligini ta’minlaydi, uning elastikligini pasaytiradi, lekin ayni paytda ular aylanishni boshlaydigan minimal shamol tezligi ancha yuqori bo‘ladi. Shuning uchun, kuchli shamol tez-tez esadigan joylarda, ikki qanotli shamol turbinalari ham o‘rnatilishi mumkin, agar bo‘lmasa, uch yoki undan ortiq parrakli shamol generatori variantini ko‘rib chiqish kerak. Bundan tashqari, parrakning uzunligi uning ishlab chiqarilgan materialiga ham ta’sir qiladi, bu bitta mahsulotning og‘irligini, uning kuchini va juda kuchli shamol yuklamalamalari ostida egilmasligini aniqlaydi.

Parrak qancha uzun bo‘lsa, uning og‘irligi shunchalik ko‘p bo‘ladi va tabiiyki, uni quvvatlantirish va ma’lum bir tezlikda aylantirish qiyinroq bo‘ladi.

Ba’zilar parraklar qanchalik ko‘p bo‘lsa, shamol turbinasining aylanish tezligi shunchalik yuqori bo‘ladi, deb hisoblashadi. Aslida, bu shunday emas, chunki har bir parrak harakat yo‘nalishi bo‘yicha bir xil yumaloq tekislikni harakatlanadi va bir xil havo qarshiligini engadi.

Ko‘rib turganingizdek, parraklarni to‘g‘ri hisoblash uchun siz keng bilimga ega bo‘lishingiz va ma’lum ma’lumotlarga ega bo‘lishingiz kerak. Ba’zi parametrlarni hisoblash yo‘li bilan olish mumkin, ba’zilarini faqat shamol tegirmonini ishga tushirgandan keyin aniqlash mumkin. Shu bilan birga, aniqlik uchun, shamol ishlab chiqaruvchi qurilmalarning ayrim turlari matematik tarzda hisoblangan aylanish modeliga ega emas. Shu sababli, hisob-kitoblar foydasiz bo‘lib qolishi mumkin. O‘rnatishdan keyin siz hali ham yuz marta o‘zgartirishingiz va qayta qilishingiz kerak. Hisob- kitoblarni amalga oshirish uchun mavjud variantlardan biri onlayn kalkulyatordir. Undan foydalanib, bir necha soniya ichida yakuniy natijaga erishishingiz mumkin. Uni ishlatish juda oson. Buning uchun faqat ma’lum qutilarga kerakli ma’lumotlarni almashtirish kerak. Ammo hisob-kitoblarning ideal aniqligiga kafolat bermaydi, chunki ba’zi juda nozik qiymatlarni o‘rnatishdan oldin, ma’lum effektlar paydo bo‘lguncha olish mumkin emas. Shuning uchun, ko‘pincha o‘lchamlarni eksperimental tanlashga murojaat qiling.

Parrak shamol turbinasining eng muhim qismi hisoblanadi. Parrak shamol tokidan kinetik energiyani mehanik energiyaga aylantiradi.

Shamol parrak tig‘lar, gildirak ushlagichi, stansiya qismlari va ichki qismalrdan tashkil topadi. Parraklarni bitta parrak bilan ham yasash mumkin, bu turdagi parraklarni balanda ushlab turish haqiqiy injenerlik bosh qotirmasi. Bir tig‘li parraklar tez aylanadi va shu sababli vibratsiya va shovqin chiqaradi. Shuning uchun ular odamlar tarafdan yaxshi qabul qilinmaydi. Ikki tig‘li parraklarda bo‘lsa balans ushlashda muammoga olib keladi va ko‘rinishi yaxshi qabul qilinmaydi. Shu omillar sababli deyarli hamma shamol turbinasining parraki 3 tig‘li parraklardan iborat.

5.18-rasm. Shamol parraklarini tashish.

Turbinaning parraklari qanchalik kichik bo‘lsa, uning aylanish tezligi shunchalik katta bo‘ladi va milda kamroq moment hosil bo‘ladi.

Parraklar qanchalik ko‘p bo‘lsa, tortishish kuchayishi tufayli aylanish momenti shunchalik yuqori bo‘ladi va aylanish tezligi past bo‘ladi. Agar ikkita parrak qolsa, shamol turbinasi juda tez aylanadi, ammo moment etarli emas.

Bundan tashqari, strukturani eskiradigan shovqin va yuqori darajadagi tebranishlar muammosi mavjud. Uch parrakli versiya bilan solishtirganda, to‘rtta parrak momentni biroz oshiradi, lekin undan ham sekinroq aylanadi. Tezlik qanchalik past bo‘lsa, aylanishni generator miliga uzatuvchi vites qutilari tizimi shunchalik murakkab bo‘ladi.

Qo‘shimcha parrakning o‘zi strukturaning narxini sezilarli darajada oshiradi. Shuning uchun, uch parrakli dizayn, hech bo‘lmaganda megavatt-sinf o‘rnatish uchun optimal deb tan olingan.

Parraklarni utilizasiyalash. 2030 yilga kelib Evropada quvvat yangilanishi bilan 5700 tagacha shamol turbinalarini ishdan chiqarilishi mumkin. Bugungi kunda shamol generatoridagi deyarli hamma narsani 90% gacha yo‘q qilish (utilizatsiya) mumkin. Muammo parraklarda, ular qayta ishlash uchun emas, balki uzoq muddatli foydalanish uchun mo‘ljallangan kompozit materiallardan tayyorlangan. Bitta shamol parragining uzunligi taxminan 40 metrni, uning og‘irligi etti tonnani tashkil etadi va uni yo‘q qilish qiyin bo‘lgan shamol turbinasining 10 foizini tashkil qiladi. Ushbu 10% butun dunyo bo‘ylab ushbu qayta tiklanadigan energiyaning barqarorligi to‘g‘risida tortishuvlarga sabab bo‘ldi.

5.19-rasm. Shamol parraklarini erga ko‘mish jarayoni.

Eng ko‘p ishdan chiqarilgan pichoqlar Germaniya va Ispaniyada, undan keyin Daniya bo‘ladi. O‘n yillikning oxiriga kelib, Italiya, Frantsiya va Portugaliya ham pichoqlarni ishdan chiqarishni boshlaydilar va 2030 yilga kelib yillik ishdan bo‘shatish hajmi ikki baravar ko‘payib, 52000 tonnaga etishi mumkin.

Quantis US tomonidan o‘tkazilgan tahlilga asoslanib, GE Renewable Energy pichoqlarni qayta ishlash **sement** ishlab chiqarishda CO_2 chiqindilarini 27% ga kamaytirishi haqida xabar berdi. Suv iste’molining pasayishi esa 13% ni tashkil qiladi.

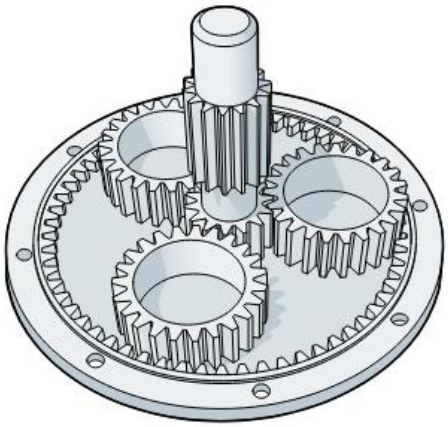
Kompaniyaning ta’kidlashicha, bugungi kunga qadar Vestas shamol turbinalari o‘rtacha 85% qayta ishlanishi mumkin, ammo pichoqlar (hali) qayta ishlanmaydigan kompozit materiallardan iborat.Vestas pichoqlar va gondollarni qayta ishlash darajasini oshirish maqsadida shamol generatorlarining hayot siklining barcha jihatlarini tahlil qiladi. Pichoqlarni qayta ishlash darajasi 2030 yilga kelib hozirgi 44% dan 55% gacha oshiriladi.

Hozirgi vaqtda barcha demontaj qilingan shamol turbinalarining taxminan 80% boshqa joylarda qayta ishlatilmoqda. Asosan Evropada: Italiya, Buyuklama Britaniya, Shvetsiya, Daniya. Ammo qolgan 20% qayta ishlanadi. Chunki ularni iqtisodiy nuqtai nazardan qayta ishlatish maqsadga muvofiq emas. Ammo yaqin kelajakda, ikki yil ichida taxminan 80% yo‘q qilinishi kerak, chunki ishlatilgan turbinalar uchun kamroq joy qoladi va yangi kattaroq turbinalar ancha raqobatbardoshdir.

Evropaning faqat to‘rtta mamlakati bunday “turbinalar qabristonlarini” taqiqlagan: Germaniya, Avstriya, Gollandiya va Finlyandiya. Evropa shamol energetikasi ovozi 2025 yilga qadar bunday chiqindixonalarga Evropa miqyosida taqiq qo‘yishga chaqirdi. Bugungi kunda parraklarning 42-43% qayta ishlanishi mumkin. Sa’y-harakatlar dizayndan ishlab chiqarishgacha bo‘lgan qiymat zanjiri bo‘ylab barqarorlikni oshirishga qaratilgan. Daniya shamol energiyasi giganti Vestas kabi korxonaning asosiy yakuniy maqsadlaridan biri bu parraklarni 100% qayta ishlanadigan qilish.

2030 yilga kelib Evropada quvvat yangilanishi bilan 5700 tagacha shamol turbinalarini ishdan chiqarilishi mumkin. Bugungi kunda shamol generatoridagi deyarli hamma narsani 90% gacha yo‘q qilish (utilizatsiya) mumkin. Muammo parraklarda, ular qayta ishlash uchun emas, balki uzoq muddatli foydalanish uchun mo‘ljallangan kompozit materiallardan tayyorlangan. Bitta shamol parragining uzunligi taxminan 40 metrni, uning og‘irligi **etti tonnani** tashkil etadi va uni yo‘q qilish qiyin bo‘lgan shamol turbinasining 10 foizini tashkil qiladi. Ushbu 10% butun dunyo bo‘ylab ushbu qayta tiklanadigan energiyaning barqarorligi to‘g‘risida tortishuvlarga sabab bo‘ldi.

Uzatmalar qutisi. Aksariyat yuritmalar shamoldan kinetik energiya olib, uni mexanik aylanish energiyasiga aylantiradigan rotor va mavjud mexanik energiyani elektr energiyasiga aylantiradigan elektr generatori o‘rtasida bir yoki bir nechta bosqichli uzatmalar qutisini o‘z ichiga oladi.



5.20-rasm. Uzatmalar qutisi.

Uzatmalar qutisi rotorning aylanish chastotasini odatdagi generatorlar talab qiladigan qiymatlarga moslashtirish uchun oshirishga mo‘ljallangan (ba’zi turbinalarda uzatmalar qutisining **nisbati 1:100** dan oshishi mumkin). Uzatmalar qutisi episikloidal yoki parallel o‘q tipidagi bir yoki bir nechta shesternyalardan iborat.

Tormozlash tizimi. Deyarli barcha shamol dvigatellarida aerodinamik tormozdan tashqari yuritmaga o‘rnatilgan mexanik tormozlar qo‘llaniladi. Ko‘p hollarda mexanik tormozlar noqulay ob-havo sharoitida rotorni to‘xtatishi mumkin, bundan tashqari, turbina ishlamayotganda rotorni aylanishdan saqlash uchun “to‘xtash” tormozlari sifatida ishlatiladi.

5.21-rasm. ShESining tormozlash tizimi.

Keng tarqalgan mexanik tormozlarning ikki turi mavjud: **diskli tormozlar** va **ilashish muftasining tormozlari.**

Elektr generatorlar. Asinxron generator aslida, bu qutblar soni va tarmoq chastotasiga bog‘liq bo‘lgan sinxron tezlik bilan tavsiflangan uch fazali induksion dvigatel. Agar rotor valiga ta’sir etayotgan mexanik moment qarshilik o‘rniga harakatlantiruvchi bo‘lsa va aylanish chastotasini orttirib, sinxron aylanish chastotasidan orttirib yuborsa, asinxron mashina dvigatel sifatida ishlashdan to‘xtab, generator sifatida ishlay boshlaydi, ya’ni elektr energiyasini tarmoqqa uzatadi. Sinxron tezlik bilan samarali aylanish tezligi orasidagi nisbiy farq sirpanish (S) deb ataladi, bu mashina generator sifatida ishlatilganda manfiy bo‘ladi. Qisqa tutashuv rotorli an’anaviy asinxron generatorlarda sirpanish taxminan 1% ni tashkil qiladi,

shuning uchun bunday qurilmalar aslida doimiy aylanish tezligiga ega deb hisoblanadi.

Induksion generatorlar bilan amalga oshiriladigan o‘zgaruvchan tezlik yechimlari chastota o‘zgartirgichni qisqa tutashtirilgan rotorli generator statori va panjara o‘rtasida joylashtirish yoki rotor chastota o‘zgartirgichidan mustaqil o‘zgaruvchan tok bilan ta’minlanadigan rotorli asinxron generatorni qo‘llash orqali olinadi: shunday qilib, sinxron tezlik panjara chastotasi va rotor toki chastotasi o‘rtasidagi farqning funksiyasi bo‘lib, tezlikning 30% gacha o‘zgarishiga erishish mumkin.

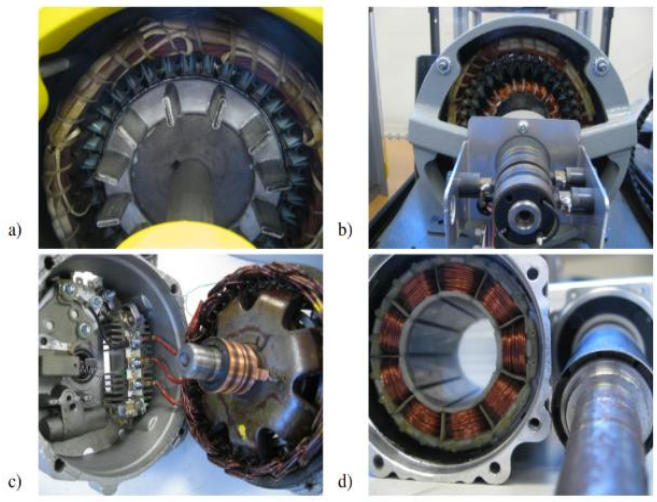
Sinxron generator. Statorda induksiyalanadigan kuchlanishning (binobarin, hosil bo‘ladigan tokning) chastotasi rotorning aylanish tezligiga to‘g‘ri proporsional. O‘zgaruvchan tezlikda ishlashga imkon berish uchun chastota o‘zgartirgich generator va tarmoq o‘rtasida joylashgan; dastlab u o‘zgaruvchan chastotadagi tokni (rotor tezligining va shuning uchun shamolning funksiyasi sifatida) generatordan chiqib, elektron to‘g‘rilagich orqali doimiy tokka aylantiradi, so‘ngra invertor orqali doimiy tokni tarmoq chastotasidagi o‘zgaruvchan tokka aylantiradi..

Sinxron dvigatel va chastota o‘zgartirgich tufayli shamol kuchi to‘satdan oshganda rotor bir necha sekundga tezlashishga qo‘yib yuboriladi: aylanish tezligining oshishi kinetik energiyani rotorning o‘zida to‘playdi va doimiy elektr ta’minotini ta’minlaydi. Aksincha, shamol esganda rotorda to‘plangan energiya ajralib chiqadi, rotorning o‘zi esa sekinlashadi.

Shamol turbinalari **generator turiga qarab** tasniflanadi. Turli xil generatorlardan foydalanish mumkin bo‘lib, ularning har biri muayyan afzallik va kamchiliklarga ega. Ayrim turbinalarda chiqish kuchlanishi va tokini aniq boshqarish talab etiladi, boshqalarida esa bu shart emas. Ba’zilari keng ishlash diapazonida faoliyat ko‘rsata oladi, boshqalari esa cheklangan holatda ishlaydi. Umuman olganda, generatorning samarali ishlashini ta’minlash uchun **kuchlanish elektron konverterlaridan** foydalanish muhim ahamiyatga ega.

Shamol turbinasi generatorlarining to‘rtta asosiy turi quyidagicha: **1-tur)** Belchagi qotirilgan induksion mashina *(Squirrel-cage induction machine)* — deyarli doimiy tezlikda ishlaydi. **2-tur)** Qo‘zg‘atish chulg‘amiga ega induksion mashina *(Wound-rotor induction machine)* — o‘zgaruvchan qarshilik orqali kengroq tezlik/moment diapazonida ishlaydi. **3-tur)** Qo‘zg‘atish chulg‘ami va kuchlanish elektronikasiga ega induksion mashina *(Doubly-fed induction generator, DFIG)* — eng keng ish diapazoniga ega. **4-tur)** To‘liq konverter orqali ulangan mashina *(Full-converter interfaced machine)* — odatda doimiy magnitli sinxron generator (PMSG) yoki boshqa sinxron turda bo‘ladi.

Har bir turdagi generator misoli 5-rasmda ko‘rsatilgan. Bu erda “mashina” atamasi qo‘llanilganiga e’tibor bering - chunki har bir turdagi ushbu mashinalar ham motor, ham generator sifatida ishlashi mumkin. Farq shundaki, agar energiya valga berilayotgan bo‘lsa - u motor sifatida ishlaydi, agar energiya valdan olinayotgan bo‘lsa - generator vazifasini bajaradi. Transmissiyadagi tishli uzatma nisbati kerakli moment va tezlik tavsifini ta’minlaydi, yoki boshqariladigan tizimlarda bu tavsif **kuchlanish konverteri** orqali dasturlashtiriladi.



5.22-rasm. Shamol turbinalarida qo‘llaniladigan dvigatel turlari.
(a) 1-tur — belchagi qotirilgan induksion mashina. (b) 2 va 3-tur — qo‘zg‘atish chulg‘amiga ega induksion dvigatel. (c) 4-tur — tashqi qo‘zg‘atishli sinxron mashina. (d) 4-tur — doimiy magnitli sinxron mashina.

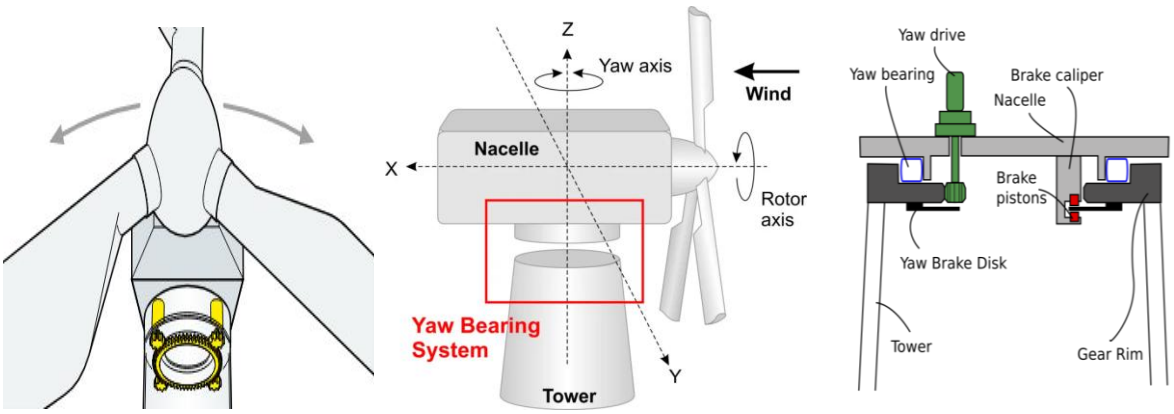
WTS generatori nazoratsiz holda ishlashga mo‘ljallangan bo‘lib, uning stator chiqishlari diodli sxema orqali to‘g‘rillanadi va natijada **doimiy tok (DC)** hosil

bo‘ladi. Uning chiqish kuchlanishi 6 – 25 V oralig‘ida bo‘lib, bu qiymat turbina aylanish tezligi va qo‘zg‘atish maydoni kuchiga bog‘liq. Qo‘llanmaning keyingi bo‘limlarida generatorni boshqarish usuli turbina samaradorligiga qanday ta’sir qilishini ko‘rsatuvchi bir nechta tajribalar keltirilgan.

Yaw tizimi — shamol turbinasida rotor (parraklar joylashgan qism)ni **shamol** yo‘nalishiga qarab burib turuvchi mexanizm hisoblanadi (5.18-rasm).

Shamolning yo‘nalishi va tezligi Nacellening tomiga ulangan sensorlar tomonidan doimiy ravishda boshqariladi. Rotor odatda turbinani boshqarish tizimi tomonidan 10 daqiqa davomida hisoblangan shamolning o‘rtacha yo‘nalishi bo‘yicha joylashtiriladi. Shamol rotorlari bo‘lgan gorizontal eksa turbinalari uchun yav tizimi kerak emas, chunki turbina o‘z-o‘zidan yo‘naltirilgan va shamol yo‘nalishi bo‘yicha shamol qanoti. Buning o‘rniga, shamol turbinalari orqa yo‘naltirilgan dumga ega (kichik va o‘rta kattalikdagi shamol turbinalari) yoki faol yavni boshqarish; shuning uchun qo‘llab-quvvatlovchi minora yav tizimlaridan foydalanish natijasida burama yuklamalamalarga bardosh berish uchun ham to‘g‘ri o‘lchamda bo‘lishi kerak.

Shamol turbinasini shamol yo‘nalishiga qaratib turish uchun shamol yo‘nalishini o‘lchovchi qurilma (masalan, shamol qanoti) orqali kelayotgan shamolning yo‘nalishi doimiy ravishda kuzatiladi. Ushbu ma’lumot asosida kontroller zarur hollarda naselni aylantirish uchun “yaw” motorlarini ishga tushiradi. Biroq, ko‘plab turbina konstruksiyalarida aylanish burchagi cheklangan bo‘ladi.



5.23-rasm. Yaw tizimi.

Manba va boshqaruv signallarini pastki qismdan yuqori qismga etkazib beruvchi kabellar bir joyga to‘planib, nasel aylanganda ma’lum darajada aylanishga ruxsat etiladi. Agar bu kabellar haddan ziyod aylansa, ular o‘z qotirilgan joyidan uzilib ketishi va og‘ir shikastlanishlarga sabab bo‘lishi mumkin. Shuning uchun chegara o‘lchagich (limit switch) orqali kontrollerga kabelning aylanish limitiga etgani haqida signal beriladi. Ammo bu cheklov bo‘lishiga qaramasdan, kabellar takroriy harakatlar natijasida vaqt o‘tishi bilan eyilishi mumkin. 5.18-rasmda yirik quvvatli shamol turbinasining **“yaw” tizimi** elementlari tasvirlangan.

Shamol turbinalari uchun sovutish tizimlarining ayrim turlari: Havoni sovutish. Bu, ayniqsa, kichik va o‘rta turbinalar uchun keng tarqalgan usul. Issiqlik fan yoki havo pichoqlari yordamida generator ichidagi sovutish yuzalari orqali atrof-muhit havosini yo‘naltirish orqali chiqariladi. **Moy bilan sovutish.** Ko‘pgina kuchli shamol generatorlari moyni sovutish va moylash vositasi sifatida ishlatadilar. Moyli sovutgichlari ishlaydigan suyuqlikning haroratini radiator orqali moy aylanishi orqali boshqaradi va agar kerak bo‘lsa, uni puflash yoqiladi. **Suvni sovutish.** Katta shamol turbinalarida yoki maxsus qurilmalarda generator tomonidan ishlab chiqarilgan issiqlikni olib tashlash uchun sovutish suvi aylanadi.

Offshore shamol energetikasi nomidan ko‘rinib turibdiki, dengizda (yoki ko‘llarda) o‘rnatilgan shamol turbinalari yordamida ishlab chiqariladigan elektr energiyasini anglatadi. So‘nggi yigirma yil ichida bu texnologiyaga katta qiziqish kuzatilmoqda. Buning asosiy sababi — ayniqsa Shimoliy Yevropada, yangi turbinalarni o‘rnatish uchun yaxshi shamol resurslariga ega bo‘lgan quruqlik maydonlarining etishmasligidir.

Quruqlikdagi shamol tizimlariga o‘xshash tarzda, offshore shamol energetikasi ham juda keng mavzu bo‘lib, u texnologiya, ekologik masalalar, iqtisodiyot va boshqa ko‘plab jihatlarni o‘z ichiga oladi.

Offshore shamol energetikasi bir qator istiqbolli afzalliklarga ega. Ular quyidagilarni o‘z ichiga oladi:

- yirik loyihalarni joylashtirish uchun keng hududlarning mavjudligi;
- shaharlar va boshqa elektr iste’mol markazlariga yaqinlik;

- quruqlikdagi hududlarga nisbatan odatda yuqoriroq shamol tezliklari;
- tabiiy turbulensiya darajasining pastligi;
- shamol tezligining balandlik bo‘yicha o‘zgarishining (wind shear) kamligi.

Shu bilan birga, ayrim qiyinchiliklar ham mavjud, jumladan:

- maxsus o‘rnatish va xizmat ko‘rsatish kemalari hamda uskunalarga ehtiyoj tufayli loyiha xarajatlarining yuqoriligi, shuningdek qimmatroq tayanch konstruksiyalar;
- murakkabroq ish sharoitlari.
- o‘rnatish (montaj) jarayonlarining murakkab va qimmatroq bo‘lishi;
- texnik xizmat ko‘rsatish uchun kirish imkoniyatlari cheklanganligi sababli mavjudlik darajasining pasayishi;
- korroziyaga qarshi maxsus himoya choralariga ehtiyoj.

Offshore shamol energetikasida asosiy e’tibor qaratiladigan jihatlar quyidagilar:

- shamol resurslari;
- offshore shamol turbinalarining o‘zi;
- tashqi loyihalash sharoitlari;
- istiqbolli hududlarning xususiyatlari;
- shamol elektr stansiyasining (parkning) loyihasi va joylashuvi;
- shamol elektr stansiyasining ekspluatatsiyasi va texnik xizmat ko‘rsatish;
- dengiz muhitiga oid ekologik masalalar;
- offshore shamol energetikasining iqtisodiy jihatlari.

Ofshor o‘rnatmalar uchun turli xil qo‘llab-quvvatlash strukturasi dizaynlari ko‘rib chiqilishi mumkin. Ushbu dizaynlardan uch tasi 5.6-rasmda tasvirlangan. Eng keng tarqalgan qo‘llab-quvvatlash turi – **monopile**. Monopilelar diametri 2,5–4,5 m bo‘lgan po‘lat trubkalar hisoblanadi. Monopilelar odatda dengiz tubiga 10–20 m chuqurlikka haydaladi, ammo qattiqroq tuproq yoki toshlarda qazish ishlari talab qilinishi mumkin. Odatda dengiz tubini tayyorlash shart emas, ammo og‘ir yuklamali pile-drayv uskunalari kerak bo‘ladi. Monopilelar katta toshlar bo‘lgan dengiz tubida mos bo‘lmasligi mumkin.

Ikkinchi eng keng tarqalgan variant – **gravitatsion struktura**. Gravitatsion strukturalar o‘z barqarorligini umumiy og‘irligi (shu jumladan ballast) va katta taglik yuzasi orqali ta’minlaydi. Taglik maydoni shamol turbinasining aylanish momentiga qarshi turishga yordam beradi, ya’ni yuklamalamalarning dengiz tubiga uzatilish taqsimotini passiv ravishda o‘zgartiradi – xuddi sharob stakanining barqarorligini ta’minlash kabi. Gravitatsion struktura diametri 12–18 m bo‘lgan va og‘irligi 500–1000 tonna bo‘lgan aylana taglikdan iborat. Shuningdek, torning ulangan ichki qismi aylana taglikning markazida joylashgan. Bu ichki qism tashqi qism bilan birga tayyorlanishi yoki alohida bo‘lishi mumkin. Agar tashqi qism o‘rnatish joyiga suzib olib ketilishi kerak bo‘lsa, bo‘limlar alohida bo‘lishi lozim.

Ko‘pincha gravitatsion struktura armaturali betonidan quriladi, ammo po‘lat strukturalar ham taklif qilingan. Ba’zi hollarda strukturaning tepa qismi konus shaklida bo‘lib, suzuvchi muzlarni buzish uchun ishlatiladi. Eroziya va toklarga qarshi himoya qilish uchun taglik atrofiga ko‘pincha rip-rap joylashtiriladi. Beton gravitatsion strukturaning umumiy ballastlangan og‘irligi 1000 tonnadan oshishi mumkin. Haqiqiy og‘irlik shamol turbinasining xususiyatlari va o‘rnatish joyiga bog‘liq bo‘ladi. Beton gravitatsion strukturaning og‘irligi suv chuqurligi bilan chiziqsizdan ko‘proq oshadi, shuning uchun chuqurroq suvlar uchun bunday strukturalar kamroq jozibador bo‘ladi. Gravitatsion struktura joylashtirilishidan oldin dengiz tubi tayyorlanishi kerak. Bu asosan struktura joylashadigan joyni tekis va bir xil qilishdan iborat. Buning uchun odatda qazish ishlari (dredging) qo‘llaniladi.

Po‘lat gravitatsion strukturalar dengiz tubida tekis po‘lat qutiga o‘rnatilgan tik cylindrical po‘lat trubkadan iborat bo‘lishi mumkin. Bunday strukturalar mos beton strukturalarga nisbatan engilroq bo‘ladi; ammo ular kerakli joyga qo‘yilgach zich ballast bilan to‘ldiriladi. Shu sababli, ular chuqurroq suvlar uchun beton strukturalarga qaraganda mos bo‘lishi mumkin, chunki ularning ballastsiz og‘irligi chuqurlik bilan tez oshmaydi. Bundan tashqari, ularning past og‘irligi tufayli tashish osonroq bo‘ladi.

5.24-rasm. Offshore shamol elektr stansiyalarida qo‘llaniladigan qoziq turlari.

Ko‘p elementli tayanch konstruktsiyalar odatda uchta yoki to‘rtta burchakli quvurli elementlardan tayyorlanadi. Bu elementlar markaziy quvurli elementga va undan keyin kichikroq elementlar orqali bir-biriga payvand qilinadi. Qo‘shimcha, qisqaroq quvurlar konstruksiyani joyida ushlab turish uchun ishlatiladigan nisbatan kichik qoziqlarga yo‘naltiruvchi vazifasini bajaradi.

Ko‘p elementli tayanch konstruktsiyalarning bir turi — bu tripod bo‘lib, u 5.6-rasmda tasvirlangan. Ko‘p elementli konstruktsiyalarning yana bir turi — "jaketing" (qoplama) hisoblanadi. Bu dengiz neft va gaz sanoatida keng qo‘llaniladigan to‘rt oyoqli konstruktsiya turidir.

Ko‘p elementli konstruktsiyalar minimal maydon tayyorgarligini talab qiladi va kattaroq suv chuqurliklariga mos keladi.

§5.7 Shamol energetik qurilmalari sonini hisoblash.

Berilgan maydonga joylashtirish mumkin bo‘lgan shamol energetik qurilmalarining taxminiy sonini hisoblaymiz [56]. Joylashtirish uchun maydon bo‘lgan holatni ko‘rib chiqamiz.

5.25-rasm. Shamol elektr stansiyasini o‘rnatish uchun mo‘ljallangan maydon.

Shamol elektr stansiyasi quvvati 730987 ga teng, shamol elektr stansiyasini joylashtirish sxemasi - 10x10 diametrli shamol g‘ildiragi, hisoblash uchun zarur bo‘lgan boshqa doimiy qiymatlar 5.1-jadvalda keltirilgan.

5.1-jadval. Hisoblash uchun dastlabki ma’lumotlar

Parametr	**Qiymatlar**
D shamol g‘ildiragi, m	10 m qadam bilan 50-250 m
Havoning zichligi (ρ), kg/m^3	1,23
Shamol toki energiyasidan foydalanish koeffitsiyenti-C_p	0,45
SHEQ yo‘lining mexanik va elektr elementlarining umumiy foydali ish koeffitsiyenti-$\eta_{mex} \cdot \eta_{el}$	0,9
Quruqlikdagi shamol qurilmalarini joylashtirish uchun hudud maydoni	730987 km^2

5.1-jadvalda (2) formuladan foydalanib, berilgan diametrlarda shamol g‘ildiragi o‘rnatilgan holda maydoni 730987 bo‘lgan hududga joylashtirish mumkin bo‘lgan shamol energetikasi qurilmalari sonini hisoblash natijalari ko‘rsatilgan.

5.2-jadval. 730987 maydonni egallagan hududda joylashtirish mumkin bo‘lgan shamol g‘ildiragining diametriga qarab shamol energetikasi qurilmalari soni.

D shamol g‘ildiragi, m	**Shamol qurilmalari soni, dona**	
	Bir xil masofada ketma-ket joylashgan qatorlar	Shaxmat tartibida
50	2923948	3376284
60	2030519	2344642

70	1491810	1722594
80	1142167	1318861
90	902453	1042063
100	730987	844071
110	604121	697579
120	507630	586160
130	432537	499450
140	372953	430649
150	324883	375143
160	285542	329715
170	252937	292066
180	225613	260516
190	202489	233815
200	182747	211018
210	165757	191399
220	151030	174395
230	138183	159560
240	126907	146540
250	116958	135051

5.2-jadvaldan ko‘rinadiki, shamol g‘ildiragi diametrining ortishi bilan ma’lum hududga joylashtirish uchun shamol energetikasi qurilmalari soni 25 barobar kamayadi.

Shamol energetik qurilma va shamol elektr stansiyalari qurilish ob’ektlarini loyihalash belgilangan tartibda tegishli faoliyat turiga huquq olgan yuridik va jismoniy shaxslar tomonidan amalga oshirilishi kerak.

Juda murakkab va noyob shamol elektr stansiyalari, shamol elektr stansiyalari va shamol elektr energiyasi stansiyalarini loyihalashda buyurtmachi tegishli ilmiy-tadqiqot va ixtisoslashtirilgan tashkilotlar bilan birgalikda ushbu obyektlarni loyihalash, qurish va ishlatishning o‘ziga xos xususiyatlarini aks ettiradigan maxsus texnik shartlarni ishlab chiqishi kerak. Texnik shartlarda quyidagilar aks ettirilishi kerak: - maydon va unga tutash hududning relyefi haqidagi ma’lumotlar;

- joylashtirish maydonining shamol va iqlim xususiyatlari;
- geologik tuzilishi;
- tuproqlarning tarkibi, holati, fizik-mexanik va elektr xususiyatlari;
- seysmiklik;

- gidrogeologik sharoitlar;

- qurilish ob’ektlarining geologik muhit bilan o‘zaro ta’sirining geodinamik va muhandislik-geologik jarayonlari hamda qurilish va foydalanish jarayonida ularning ehtimoliy o‘zgarishini prognoz qilish;

- ishlab chiqarilayotgan energiyaning sifati va miqdoriga qo‘yiladigan o‘ziga xos talablar;

- elektr tarmog‘i (tarmoqqa ulanadigan shamol elektr stansiyalari, shamol elektr stansiyalari, shamol elektr stansiyalari uchun) yoki iste’molchi tomonidan qo‘yiladigan talablar;

- elektromagnit signallarning o‘tishi bilan bog‘liq talablar;

- vizual va shovqin effektlari bilan bog‘liq talablar;

- tabiatni muhofaza qilish tadbirlari talablari;

- havo va dengiz kemalari harakati bilan bog‘liq talablar.

Shamol energetik qurilamalari va shamol elektr stansiyalarini yaratishda quyidagi ekspertiza turlari o‘tkazilishi shart:

- davlat ekologik ekspertizasi;

- sanoat xavfsizligi bo‘yicha davlat ekspertizasi;

- gidrotexnika inshootlarining davlat ekspertizasi.

Buyurtmachi tomonidan shamol energetik qurilamalari va shamol elektr stansiyalarini uskunalarini qabul qilish quyidagi bosqichlarda amalga oshiriladi:

1-bosqich uskunalarni kirish nazoratidan o‘tkazish natijalari asosida o‘tkaziladi;

2-bosqich - montajdan so‘ng tugunlar bo‘yicha qabul qilish;

3-bosqich - ishga tushirish-sozlash ishlari;

4-bosqich - 72 soat davomida shamol elektr stansiyasini kompleks sinovdan o‘tkazish va tajriba-sanoat ekspluatatsiyasiga qabul qilish;

5-bosqich - rejimli sozlash bilan tajriba-sanoat ekspluatatsiyasi (SHEQ uchun bosqich kamida 30 sutka davomida uzluksiz ishlagandan so‘ng tugallangan hisoblanadi);

6-bosqich - kafolat sinovlari (beshinchi va oltinchi bosqichlar vaqt jihatidan bir-biriga to‘g‘ri keladi);

7-bosqich - uskunani foydalanishga qabul qilish.

Elektr kabellarini tanlash va o‘rnatishda yong‘in xavfsizligi talablari hisobga olinishi shart. Yonuvchan polietilen izolyatsiyali kabellardan foydalanishga yo‘l qo‘yilmaydi. Shamol energetik qurilmalari va shamol elektr stansiyalarini loyihalashda mis o‘tkazgichli kabellardan foydalanish tavsiya etiladi. Boshqaruv, nazorat, signalizatsiya kabellari va generatorlardan taqsimlash qurilmasigacha bo‘lgan kuch kabellari faqat mis o‘tkazgichli bo‘lishi kerak. Kabellar kemiruvchilar va boshqa hayvonlar tomonidan shikastlanishi ehtimoli mavjud bo‘lgan hollarda zirhli kabellar va izolyatsiyalovchi quvurlardan foydalanish lozim.

Izolyatsiyalovchi quvurlar yoki himoya kanallari bilan himoyalanmagan kabellar qo‘llanilganda, kabellar joylashgan chiziqlar belgilash lentalari yoki maxsus kabel qoplamalari bilan belgilanishi kerak.

6-BOB. GIDRO ELEKTR STANSIYALARNI LOYIHALASH

§6.1 Past bosimli suv oqimlari energiyasidan foydalanish yo‘llari

“Kichik daryo” tushunchasi turlicha talqin qilinadi. Ma’lum bir hududdagi daryolar ichidan kichik suv oqimlarini ajratib ko‘rsatishga imkon beruvchi gidrografik mezonlar shartli va yetarli darajada aniq emas, ular tarixiy-geografik an’analarga bog‘liq. Bundan tashqari, suv oqimlarini turli toifalarga (kichik, o‘rta, katta) ajratish ko‘pincha ularning resurslaridan foydalanish turiga ham bog‘liq bo‘ladi.

Daryolarni tasniflashda eng keng qo‘llaniladigan usul — ularni gidrologik xususiyatlariga ko‘ra ajratishdir. Masalan, GOST 19179-73 ga ko‘ra, uzunligi 100 km gacha va suv yig‘ish maydoni 2000 km² gacha bo‘lgan daryolar kichik daryolar qatoriga kiritiladi. GOST 17.1.1.02-77 esa suv oqimlarini toifalarga ajratadi, bunda kichik toifaga suv yig‘ish maydoni 20 ming km² dan oshmaydigan va kam suv davridagi suv sarfi 5 m³/s dan yuqori bo‘lmagan daryolar kiradi. SP 33-101-2003 ga ko‘ra esa, suv yig‘ish maydoni 1000 dan 5000 km² gacha bo‘lgan daryolar kichik daryolar deb hisoblanadi.

Boshqa gidrologik tasniflarda esa mezon sifatida o‘rtacha yillik suv sarfi qiymati olinadi. Daryolarni o‘lchamlariga qarab tiplarga ajratish muammosi hudud relyefining xususiyatlariga ham bog‘liq. Bu holat ilmiy ishlarda ham tasdiqlangan: masalan, Shimoliy Kavkazning kichik tog‘ daryolari sifatida uzunligi 10–25 km bo‘lgan, shuningdek uzunligi 10 km dan ortiq va suv yig‘ish maydoni 100 km² gacha bo‘lgan daryolar keltiriladi.

Daryolarni tasniflash mezonlari sifatida yana quyidagilar ham taklif etiladi: daryoning nisbiy chuqurligi (suv tokining kengligiga nisbatan), yer osti suv qatlamlarining drenajlanish darajasi. Kichik daryoga, odatda, **yopiq bo‘lmagan suv yig‘ish maydoniga ega**, ya’ni faol suv almashinuvi zonasidagi barcha yer osti qatlamlaridan suv tokini to‘liq qamrab olmaydigan suv toki kiritil Gidroenergiya resurslarini o‘rganishda daryolar ularning **potensial quvvati** bo‘yicha ham

tasniflanadi: tekislik sharoitida quvvati 2000 kVt dan oshmaydigan, tog‘ sharoitida esa 1700 kVt dan oshmaydigan suv oqimlari kichik daryolar qatoriga kiritiladi. Kichik daryolar resurslaridan intensiv va ko‘pincha noo‘rin foydalanish, ularning ifloslanishining ortishi, suv zaxiralarining kamayishi va hatto degradatsiyasi ekologik muhofaza choralarini ko‘rishni talab etadi. Bu choralar majmuasi asosan xo‘jalik faoliyatining suv oqimlariga ta’sir xususiyatiga bog‘liq bo‘ladi. Shu nuqtai nazardan kichik daryolar o‘rta va yirik daryolardan sezilarli darajada farq qiladi.

Yirik va o‘rta daryolar asosan lokal (nuqtaviy) ifloslanish manbalari ta’sirida zarar ko‘rsa, kichik daryolar ko‘proq tarqoq (diffuz) ifloslanish manbalari hisobiga ifloslanadi. Bu holat ham daryolarni kichik toifaga ajratish uchun qo‘shimcha mezon bo‘lib xizmat qilishi mumkin.

Shunday qilib, odatda kichik daryolar deb ma’lum bir hududdagi quyidagi xususiyatlarga ega suv oqimlari tushuniladi:

- uzunligi 200 km dan oshmaydi;
- suv yig‘ish maydoni 5000 km² gacha;
- suv sarfi 50 m³/s gacha;
- o‘ziga xos gidrologik jarayonlarga ega;
- tabiiy resurslardan foydalanish imkoniyatlari cheklangan;
- ifloslanish asosan daryo uzunligi va havzasi bo‘ylab tarqalgan manbalar hisobiga yuzaga keladi.

Iste’molchilar elektr energiyasidan asosan yoritish, isitish ya’ni issiqxonalarni, suv ko‘tarib beruvchi nasos stansiyalarini elektrlashtirish , stasionar va ko‘chma sug‘orish agregatlarini elektrlashtirish, inkubatoriyalarda hamda chorvachilik fermalarida mikroiqlim hosil qilish va boshqalar uchun ishlatiladi. Elektrlashtirishning samaradorligini aniqlash uchun boshlang‘ich ko‘rsatkichlar sifatida quyidagilar hisoblanadi:

- yer maydoni va shudgor qilingan yerlarda natural va pul hisobida ekinlar bo‘yicha dehqonchilik mahsulotlarini yetishtirish;
- hayvonlar turi bo‘yicha ularning soni natural va pul hisobida chorvachilik mahsulotlarini yetishtirish;

• sohalar va jarayonlar bo‘yicha elektr dvigatellari, elektr apparatlari, qurilmalar soni va quvvati, elektr qurilmalari (podstansiyalar, elektr uzatish tarmoqlari, mexanizmlar)ning qiymati, butun xo‘jalik sohalari bo‘yicha yillik iste’mol qilinadigan energiya [73], 1 kW quvvatning qiymati, xizmat ko‘rsatuvchi xodimlar soni, qishloq xo‘jaligi mahsulotlarini yetishtirish uchun elektr energiyasi bilan taminlangunga qadar va undan keyingi mehnat sarfi, xo‘jaliklarning elektr bilan ta’minlanganligi bularning barchasi ishlab chiqarish jarayonlarining elektrlashtirish imkoniyatlarini xarakterlaydi [73].

Kichik suv tok potensialiga ega elektr iste’molchilari elektr ta’minoti uchun past bosimli suv oqimlarida ichlovchi kichik va mikro gidroelektr stansiyalar ekologik toza hamda iqtisodiy samarador xisoblanadi. Elektr ta’minoti tizimi samaradorligi sezilarli darajada oshirish texnik yechimlarga bog‘liq [74]. Past bosimli suv oqimlari energiyasidan foydalanishda xorijiy va yurtimiz olimlari bir qancha usullardan foydalanishgan.

Eron (Iranian Research Organization for Science and Technology) tadqiqotchisi Y. Yassi yuqori tezlikda aylanuvchi mikrogidroelektrstansiya suv charxpalagi bo‘yicha tajriba namunasini ishlab chiqqan (6.1-rasm) [75].

a) yuqori tezlikda aylanuvchi mikroGES suv charxpalagi modeli

b) yuqori tezlikda aylanuvchi mikroGES ishlash jarayoni

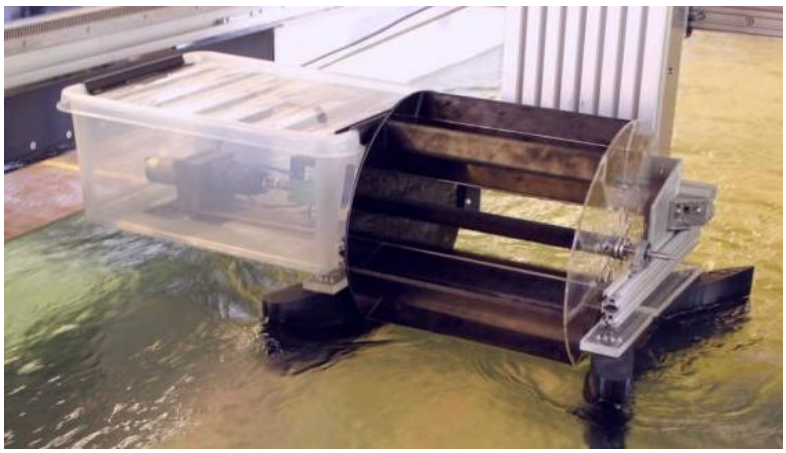
6.1-rasm. Y. Yassi tomonidan ishlab chiqilgan suv charxpalagi yuqori tezlikda aylanuvchi mikroGES modellari.

Ushbu qurilma yuqori bosimda keluvchi suv quvurga o‘rnatish uchun mo‘ljallangan. Qurilma samarali ishlashi uchun tajriba davomida suvning sarfi soatiga 420 m^3 teng, olingan quvvati 20 kW ga yaqin bo‘lgan [75].

Germaniyaning (University of Rostock) olimlari F.Vaychbrodt, S.Dimke, Ya.Xadler va P.Frelelar tomonidan yozilgan “Katta hajmdagi suzib yuruvchi mikroGESning tajriba modeli” (Großmaßstäbliche Modellversuche mit einem schwimmenden Energiewandler) maqolasida keltirilgan mikroGES katamaran ko‘rinishida bo‘lib, suv ustiga mahkamlanadi (ya’ni suv ustida qalqib turadi). Qurilmaning foydali ish koeffisiyenti 30 % dan ortmaydi (6.2-rasmga qarang) [76].

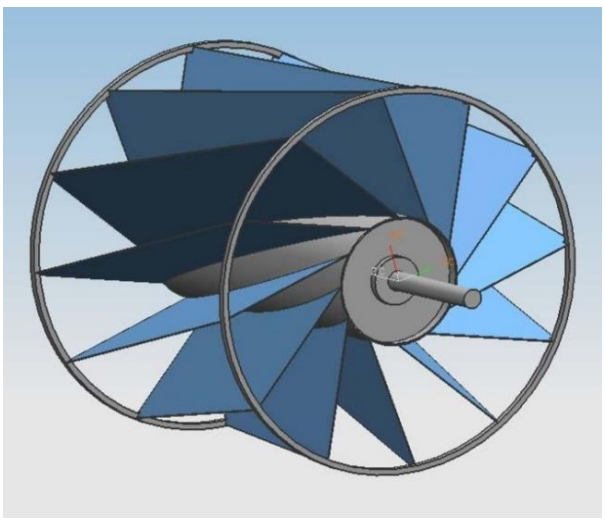
6.2-rasm. F. Vaychbrodt, S. Dimke, Ya. Xadler, P. Frelelar tomonidan yaratilgan mikroGES.

Germaniyaning (Otto–von-Guericke-Universitat) Olivier Cleynen, Emeel Kerikous, Stefan Hoerner kabi olimlari tomonidan ishlab chiqilgan erkin tokli suv g‘ildirakli mikroGES. Ushbu laboratoriya sharoitida namunaviy suv g‘ildiragida o‘tkazilgan tajribalar, o‘rtacha vaqtdan foydalangan holda mexanik quvvat o‘lchovlari va parrak qiyalik burchaklarini $\beta=10^{\circ}$ qabul qilingan. Suv g‘ildiragining optimal burchagi sifatida $\beta=10^{\circ}$ olinganda yuqori quvvatga erishilgan. Bunda kanallarni bo‘ylama quyi yo‘nalishda suv tokining o‘zgarishi natijasida aylanish tezligning pasayishi natijasida quvvat kamayadi [77].



6.3-rasm. Olivier Cleynen, Emeel Kerikous, Stefan Hoerner tomonidan yaratilgan erkin tokga o‘rnatilgan mikrogidroelektr stansiya.

Buyuklama Britaniya (Queen’s University Belfast) tadqiqotchisi D.Myuller tomonidan ishlab chiqilgan past bosimli suv oqimlariga mo‘ljallangan mikroGES konstruksiyasi 6.4-rasmda keltirilgan [78-80]. 6.4-a va b rasmlarda keltirilgan burama parrakli mikroGES charxpalak parraklari suv tokiga perpendikulyar yo‘naltirish zarur. Bunda suv tokining yo‘nalishi katta ahamiyatga ega bo‘ladi. D.Myuller tomonidan ishlab chiqilgan murakkab konstruksiyaga ega bo‘lgan mikroGES o‘rnatilgan quvvati 2 kW. Qolaversa, ushbu qurilmalarning tayyorlanishi murakkab va tannarxi yuqoridi [78-80].

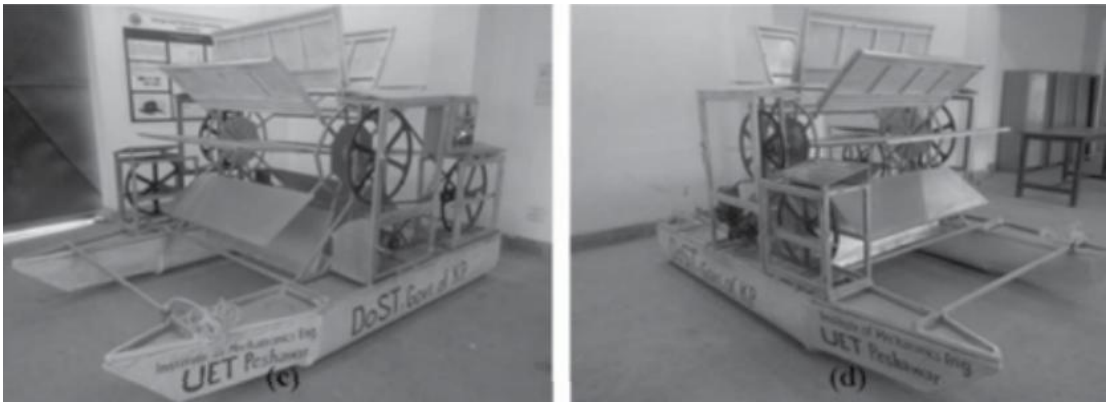


a) burama parrakli mikroGES modeli

b) burama parrakli mikroGES ishlash jarayoni

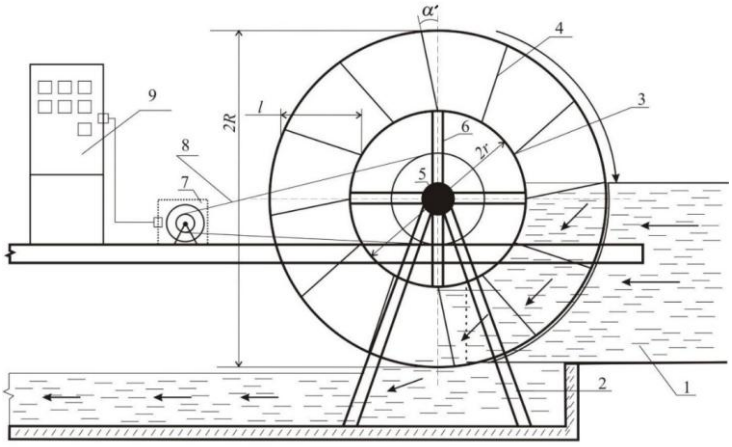
6.4-rasm. D.Myuller tomonidan ishlab chiqilgan mikroGES modeli.

Pokistonlik olimlar F.U.Khan, A.Ahmed, U.K.Jadoon, F.Haider tomonidan ishlab chiqilgan suzuvchi suv g‘ildiragli mikroGES. Optimallashtirilgan suzuvchi suv g‘ildiragi tok tezligi 1 dan 1,2 m/s gacha bo‘lgan kanalda ochiq holda sinovdan o‘tkazilgan.



6.5-rasm. Pokistonlik F.U.Khan, A.Ahmed, U.K.Jadoon, F.Haider olimlar tomonidan ishlab chiqilgan optimallashtirilgan suzuvchi suv g‘ildiragini prototipi [81].

Tok tezligi 1,2 m/s bo‘lganda 0,6 kW maksimal quvvat bilan elektr energiyasi ishlab chiqariladi. Pokistonlik olimlar tomonidan ishlab chiqilgan ushbu mikroGESda tizimdagi yo‘qotishlar elektr generatorining samaradorligi va noto‘g‘ri joylashishiga bog‘liq. Past bosimli suvlarda elektr energiyasini ishlab chiqarish quvvati tok tezligiga qarab 1 kW gacha olish mumkin [81].



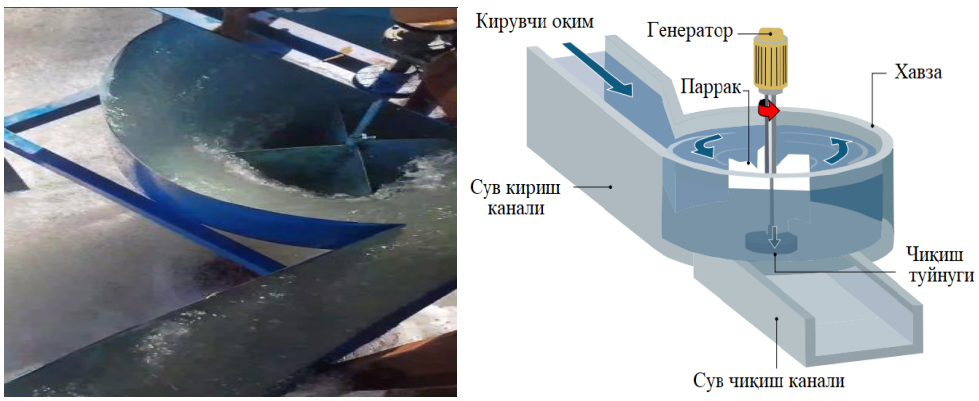
6.6-rasm. D.B.Qodirov tomonidan ishlab chiqilgan charxpalak tipli mikroGES [82-83].

1– suv toki; 2 – qurilma markasi; 3 – suv tokini tutib turuvchi korpus; 4– parrak; 5– val; 6 – po‘lat o‘zak; 7 – generator; 8 – tasmali uzatma; 9 – elektr quvvatini nazorat qilish blogi; α′– mos burchak.

D.B.Qodirovning nomzodlik ishida past bosimli suv oqimlarida ishlovchi charxpalak tipli mikroGESning energiya samaradorligini oshirish bo‘yicha tadqiqotlar olib borilgan hamda qurilma ishlab chiqilgan.

Unda suv sathiga α burchak ostida teguvchi parrakning charxpalak aylanish natijasida suv bilan ta’sirlashadigan sohaning yuzasi S_{cm} parrak suvga botgan sari kattalashadi va parrak suvdan chiqishida kamayadi. Ishlab chiqilgan qurilmaning konstruktiv o‘lchamlari ixcham va foydalanish uchun qulayligi ta’minlagan. Mikro gidroelektr stansiya namunasi yordamida ishlab chiqarilgan elektr energiyasining sifat ko‘rsatkichlari (kuchlanish va chastotasi) tekshirilgan, natijada ishlab chiqarish quvvati 10,4 kW ga erishilgan [82].

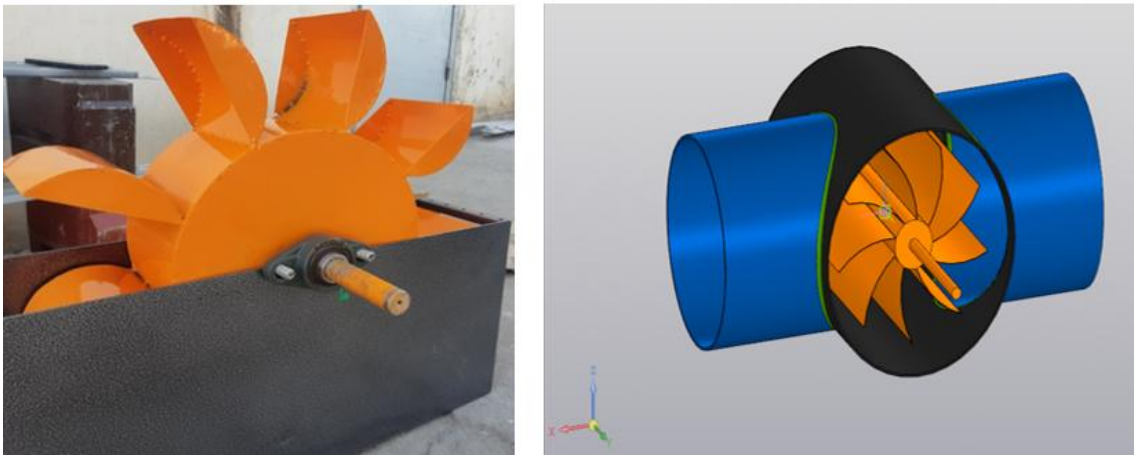
A.B.Mamadjanov tomonidan gravitatsion girdobli mikroGESning energiya samaradorligini oshirish ustida ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilgan. Gravitatsion girdobli mikroGES past bosimli ya’ni 0,7-3 m suv oqimlarida elektr energiyasi ishlab chiqarishda yuqori samarali hisoblanadi. Silindirsimon havza ichidagi girdobning markazida havo uyurmasini to‘liq shakllantirish orqali, tangensial tezlik va aylantiruvchi momentning yuqori qiymatiga erishish asoslangan. Suvning havzaga kirishdagi boshlang‘ich tezligi bo‘yicha samaradorlik ko‘rsatgichi tahlil qilingan va suv kirish tarnovining havzaga suyurish burchagining eng maqbul ko‘rsatgichi α=45º ekanligi aniqlangan [84].



6.7-rasm. A.B.Mamadjanov tomonidan ishlab chiqilgan gravitatsion girdobli mikroGES [84].

O.U.Zoxidov tomonidan “Konchilik korxonalarida muqobil energiya manbalari asosida elektr energiya iste’moli samaradorligini oshirish” mavzusidagi nomzodlik

ishida past bosimli suv oqimlarida ishlovchi mikroGES ustida ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilgan. Ushbu ishda faza rotorli asinxron generatorli mikroGES ish rejimlarini avtomatik boshqaruvchi mikrokontrolliyorli avtomatlashtirilgan boshqaruv blogi va sxemasi ishlab chiqilgan. MikroGES tomonidan 20 kW quvvat ishlab chiqarilga [85].

- 

6.9-rasm. O.U. Zoxidov tomonidan ishlab chiqilgan faza rotorli asinxron generatorli mikroGES [85].

Olib borilayotgan tadqiqotlar sohani yanada rivojlantirishning muhim masalasi hisoblanadi. Lekin, gidro turbinalarni ishlab chiqish uni rivojlantirish bo‘yicha qilinayotgan amaliy ishlarda vintli turbinalarni takomillashtirish bo‘yicha tadqiqotlar olib borilmagan. Bu turbinalar so‘ngi yillarda foydalanib kelinayotgan an’anaviy turbinalarga nisbatan yangi yo‘nalishdir. Arximed turbinasining avfzalliklari boshqa turdagi turbinalarga nisbatan texnik xizmat ko‘rsatish xarajatlarining pastligi, mexanik foydalanish qulayligi hamda boshqa turdagi turbinalardan foydalanib bo‘lmaydigan joylar uchun yaxshi tanlov ekanligi bilan farq qiladi [86].

Kichik va mikroGESlarni ishlab chiqish, mavjudlarini samaradorligini oshirish ishlari va yangi turdagi maxsus energiya samarador gidroturbina konstruksiyalarini ishlab chiqish bo‘yicha bir qancha usullar va energetika sohada ilmiy izlanishlar olib borgan yetuk olimlarning ilmiy ishlari ko‘rib chiqildi va tahlil qilindi. Ilmiy izlanishlar va adabiyotlar tahlili natijasida shuni ta’kidlash lozimki, gidroenergetika qayta tiklanuvchi

energiya manbalari orasida barqaror hamda ekologik zararsiz bo‘lgan asosiy energiya turidir, chunki suv energiyasi elektr energiya olish ekologik arzon, sifatli energiya manbai hisoblanadi.

MikroGESlarning ijobiy xususiyatlariga to‘xtalsak alohida ta’kidlash joizki, aksariyat hollarda yirik gidroelektrstansiyalar suv sathining pasayishi bilan ish jarayonidan to‘xtatiladi yoki nisbatan past quvvatlarda ekspluatatsiya qilinadi. Ya’ni, yetarli suv bo‘lgandagina, maksimal quvvatlarda ishlaydi o‘z navbatida, mikroGESlar esa katta gidroelektr stansiyalar yoki yirik gidroagregatlar to‘laqonli foydalana olmaydigan past suv tokidan samarali foydalanishda nixoyatda qulay bo‘lib yaxshi samara beradi.

§6.2 Gidroenergetik resurslarni aniqlash

Soddalashtirilgan holda texnik quvvat quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$N_{texnik} = \eta_{ГЭС} (1 - \mu_Q) (1 - \mu_H) N_{uch} \qquad (6.1)$$

bu yerda: μ_Q – tok (suv sarfi) yo‘qotishlari yig‘indisi (me’yoriy tok ulushida); μ_H – napor (balandlik) yo‘qotishlari yig‘indisi (daryo pasayishi ulushida); N_{uch} – o‘zlashtirish maqsadga muvofiq bo‘lgan daryo maydonining nazariy quvvati; $\eta_{ГЭС}$ – GES foydali ish koeffitsiyenti (odatda 0,82 qabul qilinadi).

Tok yo‘qotishlari quyidagilar bilan bog‘liq:

- turbina yo‘naltiruvchi apparatlari, zatvor muhrlari va boshqalar orqali tok yo‘qotishlari (odatda 1 % dan oshmaydi);
- suv ombori yuzasidan qo‘shimcha bug‘lanish natijasidagi yo‘qotishlar;
- suv omboridan filtratsiya (sizib chiqish) yo‘qotishlari (taxminan 2 %);
- suv omborining foydali hajmi va gidroturbinalarning o‘tkazuvchanligi (o‘rnatilgan quvvat bilan belgilanadi) cheklanganligi sababli yo‘qotishlar.

Napor yo‘qotishlari quyidagilar bilan yuzaga keladi:

- suv sarfi o‘zgarishi va tokni tartibga solish jarayonida yuqori va pastki b’eflar sathining o‘zgarishi natijasida (daryo pasayishining taxminan 20 % gacha);
- suv olib keluvchi inshootlarda (panjaralar, kanallar, turbina suv yo‘llari va boshqalar) hamda suv ombori qaytish egri chiziqlarida (podpor) yuzaga keladigan yo‘qotishlar (10 % gacha).

Agar daryoning yuqori toki kichik quvvatli bo‘lgani sababli undan foydalanish maqsadga muvofiq bo‘lmasa, daryo maydonining nazariy quvvati quyidagicha aniqlanadi: $N_{uch} \approx 0{,}86\ N_{nazariy}$ (6.2)

Texnik energiya esa: $E_{texnik} = 8760\ N_{texnik}$ (6.3)

bu yerda N_{texnik}-8760 — yil davomida soatlar soni.

5 kVt quvvatga ega mikro GES aholi punktlari va markazlashtirilgan elektr tarmoqlaridan uzoqda joylashgan alohida kichik xo‘jaliklarni elektr energiyasi bilan ta’minlash imkonini beradi. 10 kVt dan ortiq quvvatdagi elektr energiyasi esa qishloq xo‘jaligi mahsulotlarini qayta ishlash bo‘yicha kichik korxona tashkil etish imkonini yaratadi.

Mikro va kichik GESlarning energetik potensiali, suv sarfi miqdoriga bog‘liq bo‘lib, sovuq davrda suvning minimal sarfi uchun, shuningdek issiq davrda talab etiladigan quvvatga mos nominal suv sarfi uchun aniqlanishi lozim.

Mikro va kichik GESlarning quvvati quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$P = Q \times (Hv - Hp) \times \eta \times g \qquad (6.4)$$

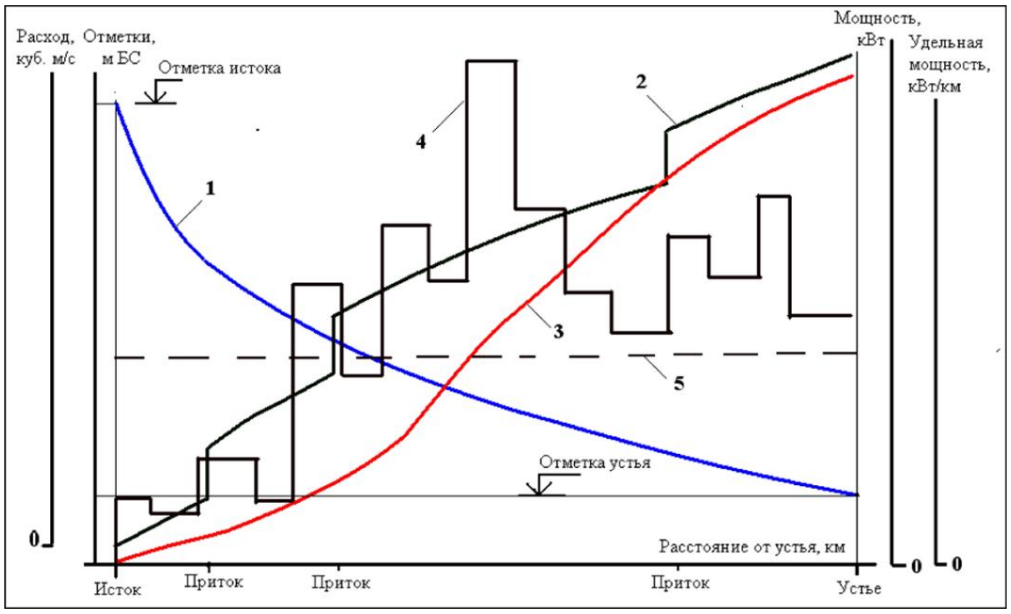
bu yerda: P – quvvat, kVt; Q – turbina orqali o‘tadigan suv sarfi, m^3/s; H_v – yuqori va quyi byef orasidagi geometrik balandlik, m; H_p – bosimli quvurlardagi gidravlik yo‘qotishlar, m; η – foydali ish koeffitsiyenti (0,5…0,7); g – erkin tushish tezlanishi (9,8 m/s^2).

Daryoning kadastr grafigi (6.10-rasm) — bu daryoning gidrologik va energetik ko‘rsatkichlarining masofaga bog‘liqligini aks ettiruvchi grafikdir. Masofa odatda daryoning quyilish joyidan (ustye) boshlab hisoblanadi.

Ushbu grafikda odatda quyidagi ma’lumotlar tasvirlanadi: suvning kam davridagi (mejen) sathi bo‘yicha daryoning uzunasiga profili; suv yig‘ish maydonining o‘zgarish grafigi; ko‘p yillik o‘rtacha suv sarfining o‘zgarish grafigi; ba’zan uning o‘rniga yillik tok me’yori grafigi keltiriladi; daryo qirg‘oqlarining uzunasiga profillari — chap va o‘ng qirg‘oq alohida**;** nazariy quvvatning o‘zgarish grafigi; solishtirma quvvat grafigi.

Bunday kadastr grafigi daryo bo‘ylab gidroenergetik resurslarni baholash, GES joylashuvini tanlash va texnik-iqtisodiy hisob-kitoblarni amalga oshirishda muhim ahamiyatga ega.

Yalpi gidroenergetika salohiyatini hisoblash suv-energetika qidiruv ma’lumotlari asosida amalga oshiriladi. Bunda olingan quvvat va energiya qiymatlarini, suv oqimining uzunlik birligiga to‘g‘ri keladigan gidroenergiya resurslarining solishtirma qiymatlarini aniqlash uchun daryo uchastkasining uzunligiga nisbatan olish qabul qilingan. Shu tarzda aniqlangan resurslar gidroenergetika kadastri deb ataluvchi hujjatda yozuvlar va grafiklar (6.10-rasm) shaklida qayd etiladi va kadastr resurslari deb nomlanadi.



6.10-rasm. Daryoning kadastr grafigi:

1 – daryoning uzunlamas profili; 2 – o‘rtacha ko‘p yillik suv sarfi; 3 – nazariy quvvat; 4 – solishtirma quvvat; 5 – solishtirma quvvatning o‘rtacha qiymati.

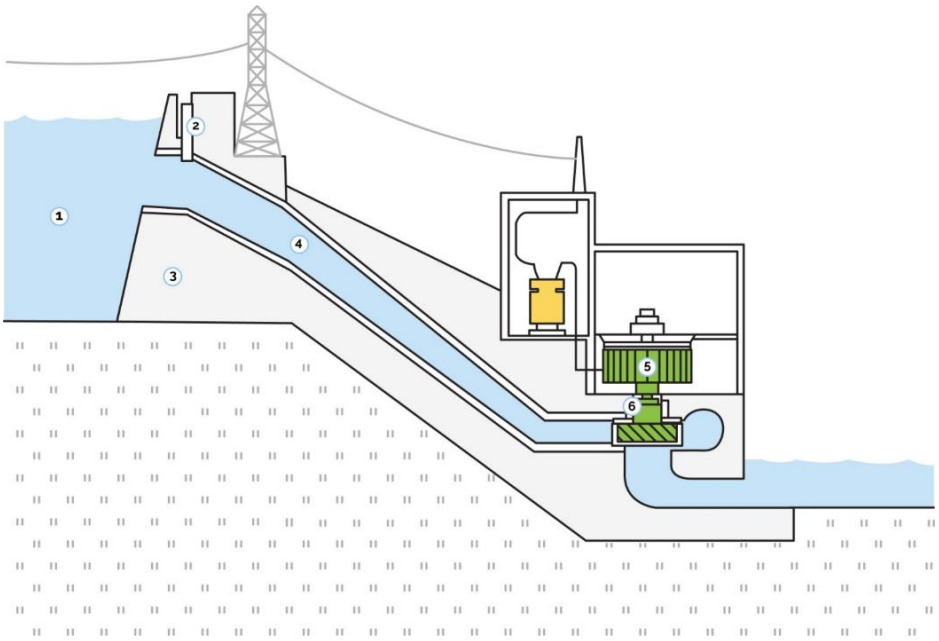
Kadastr quvvatlari suv sarfining turli xil ta'minlanganlik darajalari uchun aniqlanishi mumkin. Odatda, oqim va suv sarfining ko‘p yillik o‘rtacha qiymatlari bo‘yicha hisob-kitoblar, oqimni tartibga solish imkoniyatlarini hisobga olmagan holda, 95% ta'minlanganlik parametrlari bo‘yicha hisob-kitoblar bilan to‘ldiriladi. Kadastrni tuzishda, odatda, gidroelektr stansiyalarining joylashishi mumkin bo‘lgan joylari (stvorlari) belgilanadi. Suv energiyasi resurslarini real baholash uchun

ularning texnik jihatdan foydalanish mumkin bo‘lgan qismini — texnik gidroenergetika salohiyatini aniqlash zarur.

§6.3. Gidroelektr stantsiyaning tuzilishi va ishlash printsipi

Suv energiyasi yoki gidroenergetika deb ataladigan narsa — bu harakatlanuvchi yoki tushayotgan suv tokining energiyasi bo‘lib, u jumladan elektr energiyasi ishlab chiqarish uchun ham qo‘llaniladi. Odamlar bu energiya manbasidan ming yillar davomida foydalanib kelmoqda, masalan, suv tokining energiyasi suv tegirmonlari g‘ildiraklarini aylantirish, yog‘och ishlash va kulolchilikda faol ravishda ishlatilgan. Bugungi kunda suv tokining energiyasi maxsus qurilmalar — gidroelektr stantsiyalar yordamida elektr energiyasiga aylantiriladi.

Gidroelektr stantsiya (GES) — bu suv toki harakatining kinetik energiyasini elektr energiyasiga aylantirish uchun ishlatiladigan inshoot. GESning asosiy inshootlari to‘g‘on va stantsiya binosi hisoblanadi. To‘g‘on daryoni to‘sib, suv sathini ko‘taradi, stantsiya binosi esa gidroturbinalar, elektr toki generatorlari va boshqa uskunalarni o‘z ichiga oladi.



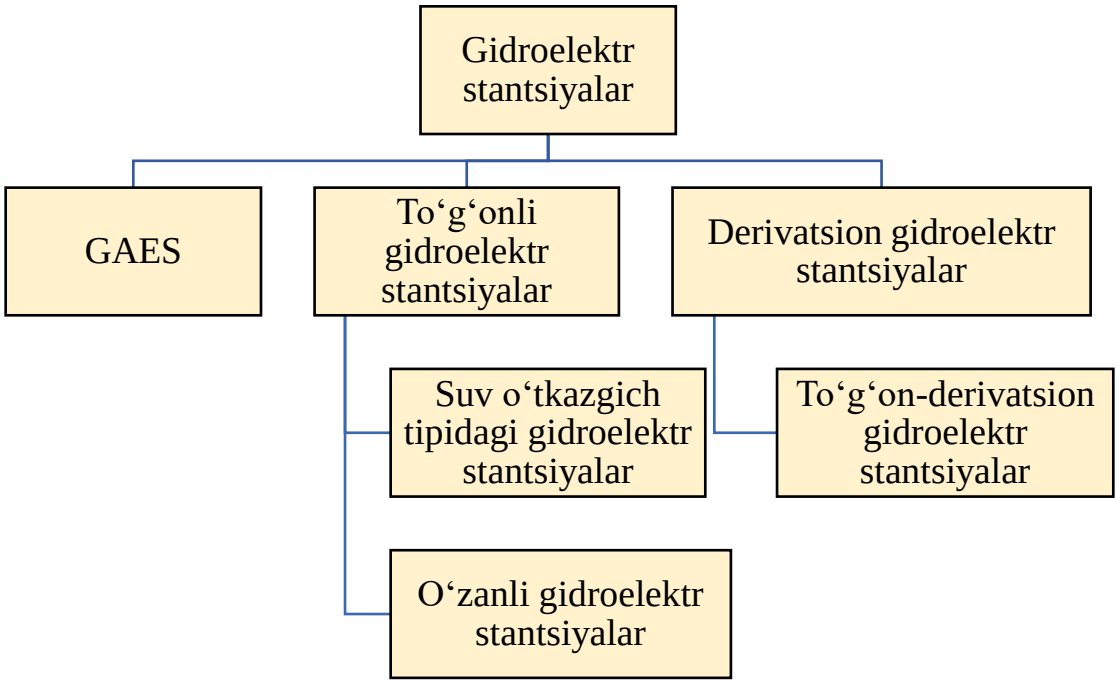
6.2-rasm. Gidroelektr stantsiyaning tuzilishi:

1-suv ombori; 2-shiba (zatvor); 3-to‘g‘on; 4-suv o‘tkazuvchi inshootlar; 5-gidrogenerator; 6-gidroturbina.

Gidroturbina u bilan bog‘langan generator bilan birgalikda gidroagregat hosil qiladi. Gidroelektr stantsiyada elektr energiyasi ishlab chiqarish bosim ostidagi suv tokining gidroturbina qanotlariga ta’siri natijasida amalga oshiriladi, buning natijasida u bilan bog‘langan gidrogenerator rotori aylanadi.

GESning ishlash printsipi suv toki harakatining kinetik energiyasini elektr energiyasiga aylantirishga asoslangan. Tarkibidagi to‘g‘on to‘g‘ondan yuqori va pastdagi suv sathlari o‘rtasida balandlik farqini hosil qiladi. Suv suv o‘tkazuvchi inshootlar orqali tushirilganda u sezilarli tezlik bilan harakat qila boshlaydi va kinetik energiya orttiradi. Bunday suv toki gidroturbina qanotlaridan o‘tganda ular aylanishga boshlanadi, natijada suv tokining kinetik energiyasi gidroturbinaning mexanik aylanish energiyasiga aylanadi. Keyinchalik gidroturbinadan aylanish gidrogenerator rotoriga uzatiladi, u aylanadi va elektr energiyasi ishlab chiqariladi.

Gidroelektr stantsiyalarning tasnifi. Gidroelektr stantsiyalar suv toki energiyasini elektr energiyasiga aylantirish usuli va gidroelektr stantsiyaning asosiy bloklarining bir-biriga nisbatan joylashishiga qarab turli xil bo‘lishi mumkin:



6.3-rasm. Gidroelektr stantsiyalarning tasnifi [87].

Gidroakkumulyatsiyalovchi gidroelektr stantsiyalar (GAES) alohida e’tiborga loyiqdir. Ular akkumulyatsiyalovchi suv ombori, quyi oziqlantiruvi suv ombori va gidrogeneratorlar hamda nasoslar yoki qaytma gidroagregatlar joylashtirilgan mashinalar zali bo‘lgan GAES binosi majmuasidan iborat. GAES oddiy GES kabi elektr energiyasini huddi shunday ishlab chiqaradi — akkumulyatsiyalovchi suv omboridan suvning bosim ostida gidroturbinalar ish g‘ildiraklari orqali harakati hisobiga, biroq GAES energiyani akkumulyatsiya qilish qobiliyatiga ham ega. Tarmoqda ortiqcha elektr energiyasi mavjud bo‘lgan yoki elektr energiyasi narxi past bo‘lgan soatlarda GAES o‘rnatilgan uskunalar yordamida suvni oziqlantiruvi ombordan akkumulyatsiyalovchi omborga qayta haydash uchun tarmoqdan energiya iste’mol qiladi.

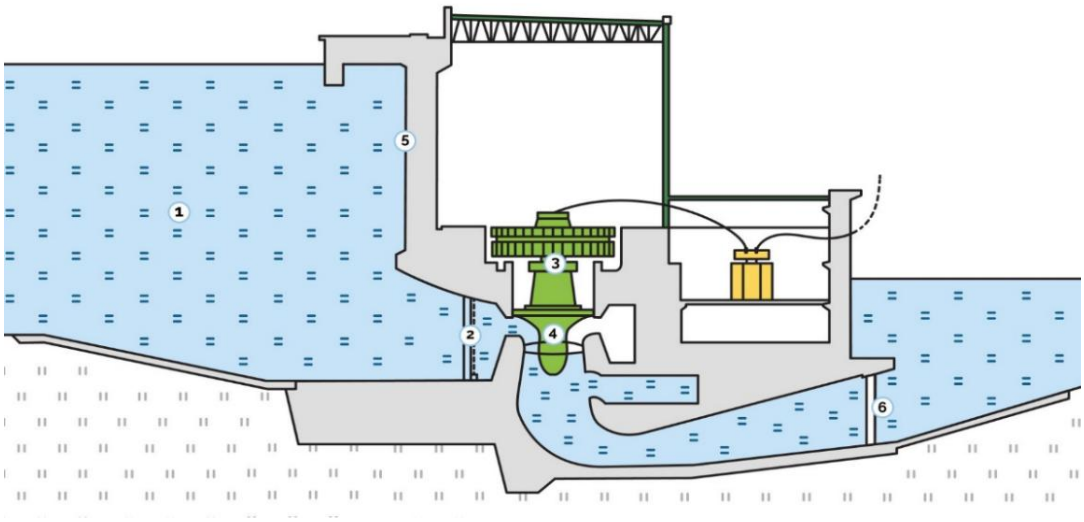
Gidroelektr stantsiyalar, shuningdek, o‘rnatilgan quvvatiga qarab katta (50 MVt va undan ortiq) va kichik (50 MVt dan kam) turlarga bo‘linadi.

Kichik GESlarning afzalligi shundaki, ularni joylashtirish uchun ko‘plab Maydonlar mos keladi. Bu mintaqaviy o‘z generator quvvatlarini yaratish va kichik GES qurilayotgan mintaqadagi energiya tanqisligini kamaytirishda muhim rol o‘ynaydi.

1. O‘zanli gidroelektr stantsiyalar. O‘zanli gidroelektr stantsiyalar to‘g‘onli GESlarga kiradi. Bunday stantsiyalarning asosiy xususiyati shundaki, mashinalar zali bo‘lgan GES binosi to‘g‘on tarkibida joylashadi. Shunday qilib, GES binosi bir vaqtning o‘zida to‘g‘on vazifasini bajaradi, ya’ni suv bosimini o‘z zimmasiga oladi. Bunday kompanovka betonni sezilarli darajada tejashni ta’minlaydi, bu esa stantsiya qurilish xarajatlarini kamaytiradi. O‘zanli gidroelektr stantsiyalar tekislik daryolarida quriladi va nisbatan kichik bosimlar hosil qiladi (odatda 30 metrdan oshmaydigan).

2. To‘g‘onli gidroelektr stantsiyalar. To‘g‘onli GESlar uchun mashinalar zali bo‘lgan GES binosi to‘g‘on tarkibidan tashqarida joylashishi xarakterlidir. Daryo o‘zani to‘liq to‘g‘on bilan to‘sib qo‘yiladi, GES binosi esa odatda to‘g‘on ortida, uning quyi qismida joylashadi. Bunday elektr stantsiyalarda suv turbinalarga maxsus

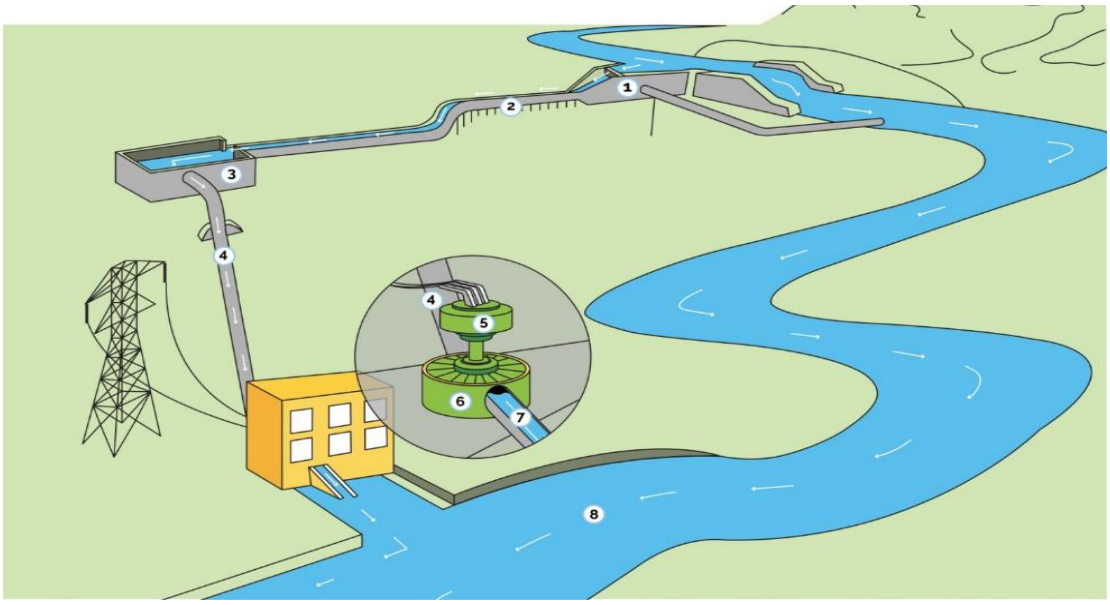
suv o‘tkazgichlar orqali yetkaziladi. Bunday kompanovka gidroelektrostantsiyaga yuqoriroq bosimda ishlash imkonini beradi — 30-40 metrdan 200-300 metrgacha.



6.4-rasm. To‘g‘onli GESning tuzilishi:

1-suv ombori; 2-shiba (zatvor); 3-gidrogenerator; 4-gidroturbina; 5-to‘g‘on; 6-suv o‘tkazuvchi inshootlar.

3. Derivatsion gidroelektr stantsiyalar. Derivatsion GESlar asosiy o‘zanidan suv tokining bir qismini ajratib olishi bilan xarakterlanadi. Ajratib olingan suv kanal yoki suv o‘tkazgich orqali mashinalar zali bo‘lgan derivatsion GES binosiga yo‘naltiriladi.

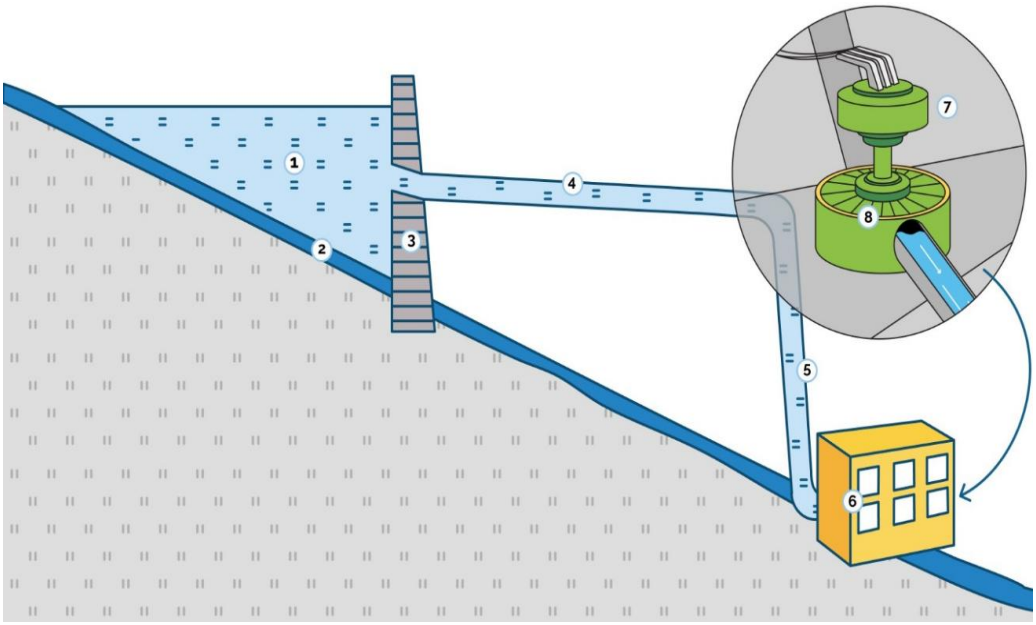


6.5-rasm. Derivatsion GESning asosiy tugunlari: 1-suv olish inshooti; 2-derivatsion kanal; 3-bosimli havza; 4-bosimli kanal; 5-gidrogenerator; 6-gidroturbina; 7-chiqaruvchi kanal; 8-daryo.

U yerda harakatlanuvchi suvning kuchi gidroturbina qanotlariga ta’sir qilish orqali elektr energiyasiga aylantiriladi. So‘ngra suv daryoga pastroqqa qaytarib beriladi.

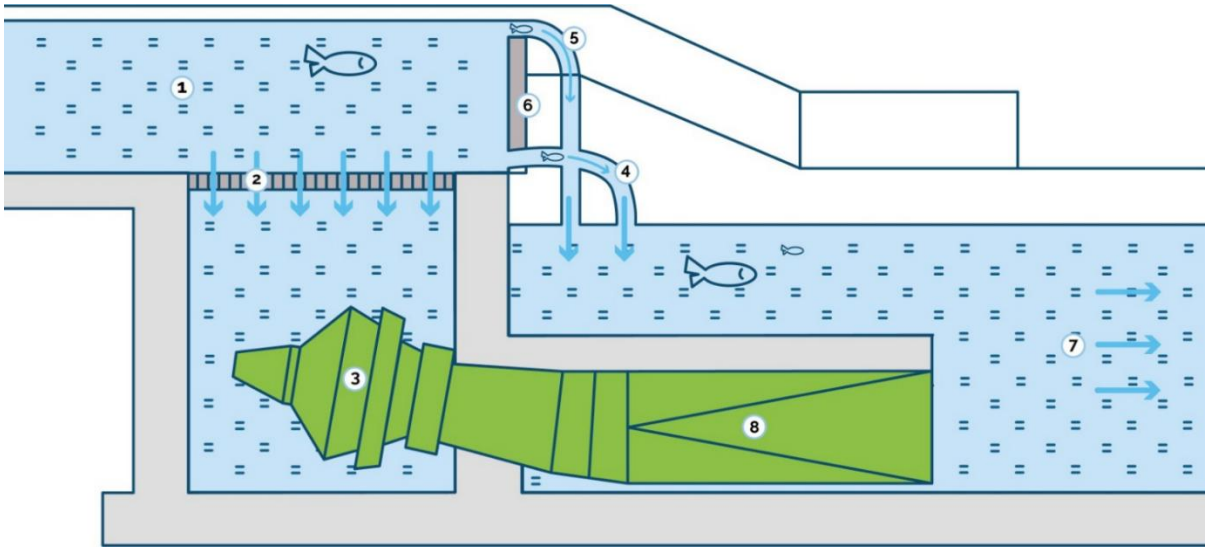
Derivatsion va to‘g‘onli GESlar o‘rtasidagi farq shundaki, birinchi tizimlar bosim yaratish uchun daryoni to‘g‘on bilan to‘smaydi, balki daryolarning tabiiy tok tezligi va suv o‘tkazgichlarning geografik joylashuvidan foydalanadi. Shuni ta’kidlash kerakki, derivatsion stantsiyalar tarkibida suv o‘tkazgichga yetarli miqdorda suv kirishini ta’minlash uchun kichik to‘g‘on yoki suv o‘tkazgich inshootidan foydalanilishi mumkin.

4. To‘g‘on-derivatsion GESlar. To‘g‘on-derivatsion stantsiyalar to‘g‘onli va derivatsion GESlarning ijobiy xususiyatlarini o‘zida birlashtiradi. To‘g‘on-derivatsion GESlar uchun daryo o‘zanini to‘sib qo‘yuvchi to‘g‘on mavjudligi va keyinchalik suvni suv o‘tkazgich orqali o‘zandan chiqarib olish xarakterlidir. Bunday kombinatsiya suv tokining bosimini qo‘shimcha ravishda oshirishga, shuningdek daryo o‘zanining yuqori qiyaligidan maksimal darajada samarali foydalanishga imkon beradi.



6.6-rasm. To‘g‘on-derivatsion GESning tuzilishi. 1-suv ombori; 2-daryoning tabiiy sharoitdagi sathi; 3-to‘g‘on; 4-derivatsion quvur o‘tkazgich; 5-turbinali quvur o‘tkazgich; 6-GES binosi; 7-gidrogenerator; 8-gidroturbina.

5. Suv o‘tkazgich tipidagi gidroelektr stantsiyalar. To‘g‘on-derivatsion stantsiyalar to‘g‘onli va derivatsion gidroelektr stantsiyalarning ijobiy xususiyatlarini o‘zida birlashtiradi. To‘g‘on-derivatsion GESlar uchun daryo o‘zanini to‘sib qo‘yuvchi to‘g‘on mavjudligi va keyinchalik suvni suv o‘tkazgich orqali o‘zandan chiqarib olish xarakterlidir.



6.7-rasm. Suv o‘tkazgich tipidagi gidroelektr stantsiyalar.

1-yuqori bef; 2-gorizontal filtrlash to‘sig‘i; 3-generatorli suv osti gidroturbinasi; 3-baliq o‘tish kanali; 4-ortiqcha suv toki; 5-shibaning normal holati; 6-quyi bef; 7-turbinadan o‘tgandan keyin suvni chiqarish.

Bunday kombinatsiya suv tokining bosimini qo‘shimcha ravishda oshirishga, shuningdek daryo o‘zanining yuqori qiyaligidan maksimal darajada samarali foydalanishga imkon beradi.

Mikro GES joylashuv o‘rnini va sxemasini tanlash. Mikro GESni joylashtirish joyi va sxemasini tanlash tabiiy sharoitlarga, shuningdek kelajakdagi foydalanuvchining imkoniyatlari va ehtiyojlariga bog‘liq bo‘ladi. Fermer va dehqon xo‘jaliklari hamda ayrim turistik maskanlar odatda tog‘ vodiylari va daralarida, daryo va soylar yaqinida joylashgan bo‘ladi. Shu sababli mikro GES uchun joy odatda yashash joyiga yaqin hududda tanlanadi. Mikro GES uchun joy tanlash suv sarfini o‘lchash va mavjud bo‘lishi mumkin bo‘lgan naporni (bosim balandligini) aniqlashdan boshlanadi.

Dunyo bo‘ylab taxminan 130 ta firma mavjud bo‘lib, ular gidroturbinlar va gidrogeneratorlarni, shuningdek, kichik quvvatli gidroagregatlarni ishlab chiqarish

va yetkazib berish bilan shug‘ullanadi [47; 49]. Ko‘pchilik firmalar an’anaviy turbinalarni ishlab chiqaradi: buriluvchi pichoqli turbinlar (Kaplan turbinasi); radial-o‘qli turbinlar (Frensis turbinasi); kovshli turbinlar (Pelton turbinasi).

Kam sonli firmalar shuningdek, propeller turbinasi va transversal tokli (ikki martali) Banki turbinlarini ishlab chiqaradi. Yagona korxonalar ekzotik turbinalarni ishlab chiqaradi — Straflo, qiyshiq tokli (Turgo) turbinalari.

Ishlab chiqaruvchilarning tahlili shuni ko‘rsatadi:

- **o‘qli turbinalar** 2–5 dan 30-80 m gacha bosim uchun ishlab chiqariladi, bajarilishi vertikal, gorizontal, G-shaklida (agregatlar uchun);
- **radial-o‘qli turbinalar** 10-20 dan 500–600 m gacha bosim uchun mo‘ljallangan, gorizontal yoki vertikal val bilan;
- **kovshli turbinalar** 30–50 dan 500–1000 m gacha bosim uchun ishlab chiqariladi, gorizontal yoki vertikal bajarilishi bilan;
- **transversal tokli turbinalar** 2–5 dan 100–200 m gacha bosim uchun faqat gorizontal val bilan ishlab chiqariladi.

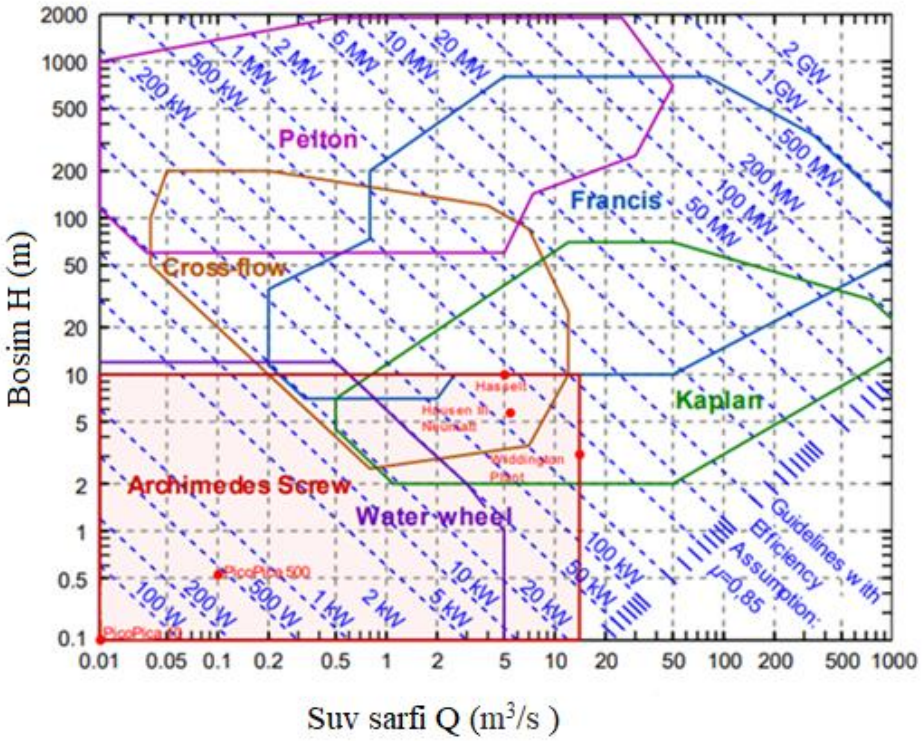
GESlarni loyihalashda turbinalarni tanlab olish ularning asosiy parametrlari(suv sarfi, foydali ish koeffitsienti, aylanishlar soni, bosim)ni aniqlash orqali amalga oshiriladi. Shuningdek, turbinalar ishlashiga qulay sharoit hosil qilish, xamda ularning turlicha ishlash tartibiga qarab grafik ko‘rinishidagi xarakteristikalardan foydalaniladi. Turbinalarning ishlash samaradorligini oshirish hamda ularni to‘g‘ri tanlashda turbinalar xarakteristikalari ko‘rsatilgan yig‘ma grafiklar yordam beradi (6.8-rasm) [88].

6.8-rasmda keltirilgan turbinalarning yig‘ma grafigidan ko‘rish mumkinki Arhimed vintli gidroturbinalar past bosimli suv oqimlariga moslashtirilgan hamda boshqa turbinalardan farqli bosim hosil qiluvchi balandlik 0,1 m bo‘lganda ham yuqori samaradorlikda quvvat olish mumkin.

Turbinalarni hisoblashda va tanlashda bosim hosil qiluvchi balandlik H, quvvati N hamda foydali ish koeffitsienti η asosiy parametr hisoblanadi. Turbinaning bosim hosil qiluvchi balandligi quyidagi formula bilan hisoblanadi [88]:

$$H = H_{st} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} - \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} - h_q \qquad (6.5)$$

bunda $H_{st} = Z_1 - Z_2$ - ta'minlovchi va qabul qiluvchi suv sig'imlari sathlarining ayirmasi; v_1, v_2 - bular sistemaga kiradigan va chiqadigan tok tezliklari; h_q - suv kelishidagi, turbina joylashtirilgan quvurlardagi va tashqi qarshiliklarda yo'qotilgan bosim; g – erkin tushish tezlanishi.



6.8-rasm. Gidroturbinalarning yig'ma grafigi [89].

Suv tokining quvvati esa quyidagi formula yordamida hisoblanadi:

$$N_s = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_s}{1000} \qquad (6.6)$$

bunda Q – suv sarfi; H_s – tokning bosimi; γ – solishtirma og'irlik.

$$H_c = H_{st} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} - \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} \qquad (6.7)$$

Turbina valida hosil bo'ladigan quvvat quyidagi formula yordamida hisoblanadi:

$$N_T = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_s}{1000} \cdot \eta_T \qquad (6.8)$$

bunda η_T turbina g'ildiragining to'liq fodali ish koeffitsienti [89].

§6.4. GESni qurish uchun loyihalashtirish bosqichlari

Kichik gidroelektr stantsiyani (KGES) loyihalash murakkab va ko‘p bosqichli jarayon bo‘lib, u puxta tahlil va rejalashtirni talab etadi. Bu jarayonning muhim jihati yer maydonini rejalash tashkilotining sxemasi hisoblanadi, u barcha zarur ob’ektlar va infratuzilmaning joylashuvini aniqlashni, shuningdek atrof-muhitga ta’sirni baholashni o‘z ichiga oladi.

KGESni loyihalashning birinchi qadami yer maydonini tanlashdir. Bu bosqich gidrologik, geologik va ekologik sharoitlarni o‘rganishni o‘z ichiga oladi. Quyidagi omillarni hisobga olish zarur: 1) suv resursiga yetish imkoniyati; 2) elektr energiyasi ishlab chiqarish salohiyati; 3) ekotizimga ta’siri; 4) mavjud elektr tarmoqlariga yaqinligi; 5) qurilish va xizmat ko‘rsatish uchun kirish imkoniyati.

Maydon tanlanganidan so‘ng topografik suratga olish o‘tkazilishi kerak, bu hududning batafsil xaritasini yaratishga imkon beradi. Bu keyingi loyihalashda yordam beradi, chunki relyef, tabiiy va sun’iy to‘siqlarning mavjudligi, shuningdek mavjud infratuzilmani hisobga olish zarur.

Keyingi bosqich rejalash tashkilotining sxemasini ishlab chiqishdir. U quyidagilarni o‘z ichiga olishi kerak: gidrotexnik inshootlarning joylashuvi (to‘g‘onlar, suv omborlari, suv olish inshootlari); bino va inshootlarni loyihalash (generator, transformator podstansiyalari); ob’ektlarga kirish uchun yo‘l infratuzilmasi; material va uskunalarni saqlash zonalari va atrof-muhitni muhofaza qilish zonalarini rejalashtirish.

Loyihalashda GESlar qurilishini tartibga soluvchi me’yoriy talablar va standartlarni hisobga olish zarur. Bu ekologik me’yorlarga, shuningdek xavfsizlik va ishonchli ekspluatatsiya talablariga rioya qilishni o‘z ichiga oladi. Muhim jihat atrof-muhitga ta’sirni baholash (AMTB) hisoblanadi. Bu jarayon suv balansining o‘zgarishi, o‘simlik va hayvonot dunyosiga ta’siri, shuningdek mahalliy aholi uchun mumkin bo‘lgan ijtimoiy oqibatlar kabi ekotizimga potensial salbiy oqibatlarni tahlil qilishni o‘z ichiga oladi. AMTB natijalari loyiha yechimlarini ishlab chiqishda hisobga olinishi kerak.

Loyihalashning barcha dastlabki bosqichlari tugagach, mahalliy aholi va manfaatdor tomonlar o‘z fikr va takliflarini bildira oladigan jamoat tinglovlarini o‘tkazish zarur. Bu jamiyat fikrini hisobga olish va mumkin bo‘lgan nizolarni minimallashtirish imkonini beruvchi muhim qadam hisoblanadi.

Ushbu loyihalash bosqichini yakunlashda barcha hisob-kitoblar, sxemalar va rejalarni, shuningdek qabul qilingan qarorlarning asoslanishini o‘z ichiga olgan texnik hujjatlarni tayyorlash zarur. Ushbu hujjatlar qurilishga ruxsat olish va loyihani keyingi amalga oshirish uchun asos bo‘ladi.

Texnik hujjatlarni tayyorlaganidan so‘ng, keyingi qadam kichik gidroelektrostantsiyaning barcha elementlari uchun loyiha yechimlarini ishlab chiqishdir. Bu quyidagilarni o‘z ichiga oladi:

Gidrotexnik inshootlar: stantsiyaning ishlashi uchun zarur suv sathini ta’minlaydigan to‘g‘onlar, suv olish inshootlari va kanallarni loyihalash.

Elektr qurilmalari: elektr energiyasini aylantirish va uzatish uchun foydalaniladigan generatorlar, transformatorlar va taqsimlash qurilmalarini tanlash va loyihalash.

Boshqaruv tizimlari: stantsiyaning samarali va xavfsiz ishlashini ta’minlaydigan avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimlarini ishlab chiqish.

Gidrotexnik inshootlarni loyihalashda maksimal samaradorlikka erishish uchun inshootlarning optimal o‘lchamlari va shakllarini aniqlashga yordam beradigan gidravlik hisob-kitoblarni hisobga olish zarur. Bu quyidagilarni o‘z ichiga oladi: suv tokini hisoblash bosim darajasini aniqlash va mumkin bo‘lgan toshqinlar va boshqa tabiiy hodisalarni tahlil qilish.

Loyihalash tugagach, qurilishga o‘tish zarur: qurilish maydonini tayyorlash, gidrotexnik inshootlarni qurish, elektr qurilmalarini montaj qilish, boshqaruv tizimlarini tekshirish va sozlash.

Qurilish jarayonida xavflarni minimallashtirish va ishlarning yuqori sifatini ta’minlash uchun texnologik jarayonlar va xavfsizlik me’yorlariga rioya qilish muhim. Shuningdek, qurilishning barcha bosqichlarini bajarish ustidan muntazam tekshiruvlar va nazorat o‘tkazish zarur.

Qurilish ishlarini tugatganidan so‘ng, ishga tushirish-sozlash ishlari bosqichi boshlanadi. Bu quyidagilarni o‘z ichiga oladi:

- barcha tizimlar va uskunalarni sinovdan o‘tkazish;
- generator va transformatorlarning ishlashini tekshirish;
- stantsiyaga xizmat ko‘rsatadigan xodimlarni o‘qitish/

Ishga tushirish-sozlash ishlari juda muhim, chunki ular stantsiyani ekspluatatsiyaga kirishdan oldin mumkin bo‘lgan kamchiliklarni aniqlash va bartaraf etish imkonini beradi. Barcha sinovlar muvaffaqiyatli yakunlanganidan so‘ng, kichik gidroelektrostantsiyani ekspluatatsiyaga topshirish mumkin.

Elektr ta’minoti tizimlari. Kichik gidroelektr stantsiyani (KGES) loyihalash ko‘plab omillarni hisobga olishni talab qiladigan murakkab va ko‘p qirrali jarayondir. KGESlar qayta tiklanadigan energiyaning muhim manbai hisoblanadi va mintaqalarning barqaror rivojlanishiga sezilarli hissa qo‘shishi mumkin. Ushbu bo‘limda biz dastlabki tadqiqotlardan tortib uskunalarni tanlashgacha bo‘lgan KGESni loyihalashning asosiy bosqichlarini ko‘rib chiqamiz.

1. **Dastlabki tadqiqotlar.** Loyihalashni boshlashdan oldin KGESni qurish maqsadga muvofiqligini aniqlashga yordam beradigan bir qator dastlabki tadqiqotlar o‘tkazish zarur. Dastlabki tadqiqotlarning asosiy bosqichlariga quyidagilar kiradi:

- Gidrologik sharoitlarni baholash: suv sathi, tok tezligi va mavsumiy tebranishlarni o‘z ichiga olgan suv resurslari to‘g‘risidagi ma’lumotlarni tahlil qilish.
- Geologik sharoitlarni o‘rganish: tuproq holatini va uning gidroelektrostantsiya inshootlarini ko‘tara olish qobiliyatini baholash.
- Ekologik baholash: o‘simlik va hayvonot dunyosini, shuningdek ekotizimdagi mumkin bo‘lgan o‘zgarishlarni o‘z ichiga olgan atrof-muhitga ta’sirni tahlil qilish.
- Ijtimoiy-iqtisodiy baholash: mahalliy aholiga ta’sirini, jumladan mumkin bo‘lgan ko‘chirishlar va turmush tarzidagi o‘zgarishlarni o‘rganish.

2. **Qurilish joyini tanlash.** KGES qurilishi uchun joy tanlash loyihalashning eng muhim bosqichlaridan biri hisoblanadi. Quyidagilarni hisobga olish zarur:

- Suv resursiga yetish imkoniyati: yetarli hajmdagi suv bilan daryo yoki tokning mavjudligi.
- Topografik sharoitlar: to‘g‘onlar va boshqa inshootlarni loyihalashga ta’sir qilishi mumkin bo‘lgan hududning relefi.
- Energiya iste’molchilariga yaqinligi: KGESning joylashuvi elektr tarmoqlariga ulanish uchun qulay bo‘lishi kerak.
- Ekotizimga ta’sirni minimallashtirish: atrof-muhitga minimal ta’sir ko‘rsatadigan joyni tanlash.

3. **Gidrotexnik inshootlarni loyihalash.** Gidrotexnik inshootlar KGESning asosi hisoblanadi va quyidagilarni o‘z ichiga oladi:
- To‘g‘onlar: suv ombori hosil qiladigan va suv sathini tartibga soladigan inshootlar.
- O‘tkazgichlar: suv tokini turbinalarga yo‘naltirishga imkon beruvchi inshootlar.
- Turbinalar: suvning kinetik energiyasini mexanik energiyaga aylantiradigan qurilmalar.
- Generatorlar: mexanik energiyani elektr energiyasiga aylantiradigan uskunalar.

4. Uskunalarni tanlash. KGES uchun uskunalarni tanlash ko‘plab omillarga bog‘liq, jumladan:
- Turbinalar turi: tok xususiyatlariga qarab gidravlik, o‘qli yoki radial turbinalar o‘rtasida tanlov.
- Generatorlar quvvati: elektr energiyasiga bo‘lgan ehtiyojlarni qondirish uchun zarur quvvatni aniqlash.
- Boshqaruv tizimlari: stantsiya ishlashini monitoring qilish va boshqarish uchun avtomatlashtirilgan tizimlarni tanlash.

5. **Elektr tizimlarini loyihalash.** KGESning elektr tizimlari elektr energiyasini ishonchli uzatish va taqsimlashni ta’minlashda hal qiluvchi rol o‘ynaydi. Elektr tizimlarini loyihalashning asosiy jihatlari quyidagilarni o‘z ichiga oladi:

- Transformatsiya tizimlari: tarmoq ehtiyojlariga qarab kuchlanishni oshirish yoki kamaytirish uchun transformator podstansiyalarini loyihalash.
- Elektr sxemalari: generatorlar, transformatorlar va taqsimlash qurilmalarini ulash sxemalarini ishlab chiqish.
- Himoya tizimlari: haddan ortiq yuklamalanishlar va qisqa tutashuvlarning oldini olish uchun himoya qurilmalarini joriy etish.
- Avtomatlashtirish: stantsiya ishlashini avtomatik boshqarish va monitoring qilish uchun zamonaviy texnologiyalardan foydalanish.

6. **Qurilish va montaj.** KGES qurilishi bir necha bosqichni o‘z ichiga oladi, ularning har biri puxta rejalashtirish va muvofiqlashtirrishni talab etadi:

- Maydonni tayyorlash: qurilish uchun hududni tozalash va tekislash.
- Gidrotexnik inshootlarni qurish: to‘g‘onlar, kanallar va boshqa inshootlarni barpo etish.
- Uskunalarni montaj qilish: turbinalar, generatorlar va elektr tizimlarini o‘rnatish.
- Sinovlarni o‘tkazish: ishonchlilik va xavfsizligini ta’minlash uchun barcha tizimlar va uskunalarni sinash.

7. **Ekspluatatsiya va texnik xizmat ko‘rsatish.** Qurilish va KGESni ishga tushirishni yakunlashdan so‘ng uning samarali ekspluatatsiyasini va muntazam texnik xizmat ko‘rsatishni ta’minlash zarur:

- Ishlashni monitoring qilish: mumkin bo‘lgan muammolarni aniqlash uchun stantsiya ishlash parametrlarini doimiy kuzatib borish.
- Rejalashtirilgan texnik xizmat: avariyalarning oldini olish uchun uskunalarni muntazam tekshirish va almashtirish.
- Xodimlarni o‘qitish: stantsiyani boshqarish va xizmat ko‘rsatish uchun malakali mutaxassislarni tayyorlash.

8. Ekologik va ijtimoiy jihatlar. KGESni loyihalash va ekspluatatsiya qilish ekologik va ijtimoiy jihatlarni hisobga olishi kerak:

- Atrof-muhitga ta’sirni baholash: ekotizimga salbiy ta’sirni minimallashtirish uchun muntazam tadqiqotlar.

- Mahalliy aholi bilan o‘zaro munosabat: loyiha bilan bog‘liq jarayonlarda mahalliy aholini xabardor qilish va jalb etish.
- Ijtimoiy dasturlar: mahalliy aholini qo‘llab-quvvatlash va mintaqani rivojlantirishga qaratilgan tashabbuslari ishlab chiqish.

Shunday qilib, kichik gidroelektr stantsiyani loyihalash texnik, ekologik va ijtimoiy jihatlarni hisobga olgan kompleks yondashuvni talab etadi. Loyihalash va qurilishning har bir bosqichi stantsiyaning samarali va xavfsiz faoliyatini ta’minlash uchun puxta o‘ylangan bo‘lishi kerak.

7-BOB. BIOGAZLI ELEKTR STANSIYALARINI LOYIHALASH

§7.1. Biogaz olish qurilmalari va ulardan foydalanish jarayoni.

Zamonaviy texnika va texnologiyalar tiklanadigan energiya manbalaridan foydalanish istiqbollarini ochib bermoqda. Ilmiy va amaliy ishlarni shu Mutaxassislikka yo‘naltirish, organik yoqilg‘i iste’molini kamaytirishga yordam beradi.

Bioenergetika–qayta tiklanuvchi energiya manbai bo‘lib, energiya qishloq xo‘jaligi hamda maishiy chiqindilarni qayta ishlash asosida olinadi. Hosil qilinadigan energiyaning birlamchi turi–biogaz, ikkilamchisi–elektr energiya. O‘zbekistonning qishloq xo‘jaligi va agrosanoati rivojlanayotgan davlat ekanligini hisobga oladigan bo‘lsak, bioenergetika kelajagi tez rivojlanadigan energetika sohasi bo‘lib qoladi.

7.1-rasm. Dunyodagi eng katta biomassa yoquvchi stansiyaning ko‘rinishi.

Stansiya 1 soatda 1000 m^3 bioyoqilg‘ini yoqib energiya oladi. Yoqilg‘i yoqiladigan qozonning pastki (asosi) diametri 8,5 m va 40 m balandlikdagi yuqori diametri 24 metrni tashkil qiladi. Stansiyani bioyoqilg‘i bilan ta’minlash uchun 1 kunda 120 dona yuklama tashish mashinalaridan foydalaniladi. Stansiyada yoqilg‘i sifatida toshko‘mirdan ham foydalanish mumkin.

Biomassa va uning tarkibi. Biomassa – o‘simlik va hayvonot dunyosidagi barcha organik moddalarni kelib chiqishini birlashtiruvchi termindir. Biomassa birlamchi-o‘simliklar, hayvonlar, mikroorganizmlar va boshqalar hamda ularning uzoq yillik jarayonlardan sung boshqa turdagi yoqilg‘iga aylanishi va ikkalamchilarga (biomassani qayta ishlashda hosil bo‘ladigan chiqindilar hamda inson va hayvonlarning hayoti davomida foydalaniladigan mahsulotlar) bo‘linadi.

a) ***b)***

7.2-rasm. Bioyoqilg‘i xom ashyolari:

a- qoratollardan barpo qilingan bioyoqilg‘i maydonlari; b- o‘simlik dunyosining uzoq yillik biologik jarayonlardan sung torf holatidagi ko‘rinishi

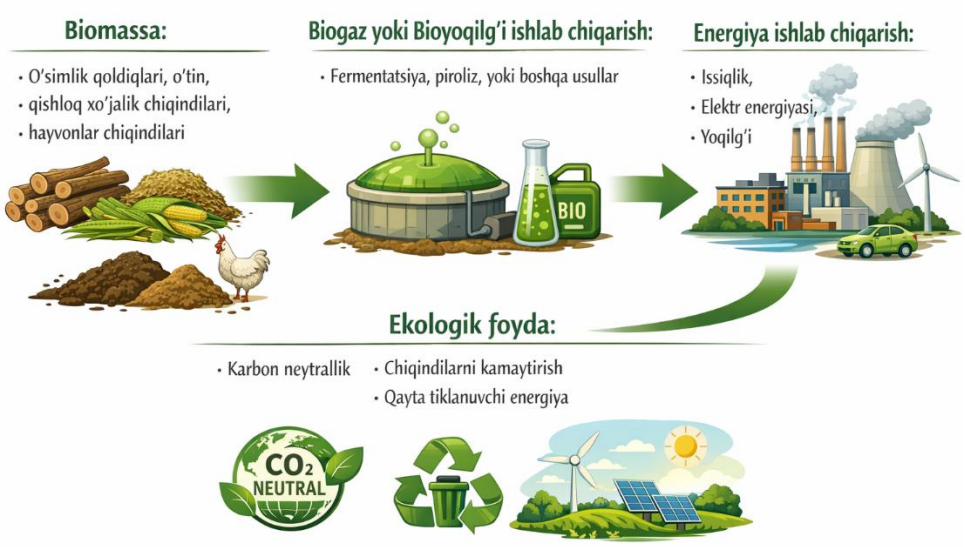
O‘z navbatida chiqindilar ham birlamchilarga–birlamchi biomassani qayta ishlaganda hosil bo‘ladigan chiqindilar (xashak, poya va barglar, qirindilar, spirt quyqasi, shox-shabbalar) va ikkalamchilarga-inson va hayvonot dunyosining fiziologik olmoshishi mahsulotlari kiradi.

Bundan tashqari ba’zi bir Evropa mamlakatalarida, elektr energiyasi olishda, xom ashyo sifatida o‘rmonlarni haddan ko‘p kesilishini oldini olish uchun maxsus tez o‘sadigan o‘simliklardan foydalanishadi. Masalan Shvetsiyada, biomassa uchun maxsus tez o‘sar qoratollar ekiladi (7.2 a-rasm). Qoratollar ekiladigan maydonlar miqdori, biomassa bilan ishlaydigan elektr stansiyalarining biomassa yoqig‘isi bilan ta’minlanishiga nisbatan belgilanadi. Bunday stansiyalar biologik yoqilg‘i sifatida biomassadan tashqari, biomassaning uzoq yillik biologik jarayonlardan keyingi ko‘ri-nishidagi torf va boshqa yoqilg‘ilardan ham foydalanishi mumkin (7.2 b-rasm).

Biomassa keng ko‘lamli qayta tiklanadigan energiya resurslari demakdir va yog‘och, sanoat, qishloq xo‘jaligi va maishiy chiqindilarni o‘z ichiga oladi. Biomassadan energetika manbai sifatida yoqish, gazlashtirish, piroliz, spirt yoki biogaz olish uchun biokimyoviy qayta ishlash orqali foydalanish mumkin. Bu jarayonlarning har biri, belgalangan maqsadda qo‘llanish sohasiga ega. Ba’zibir ma’lumotlarga ko‘ra, biomassadan olinadigan energiyaning dunyo energetikasiga qo‘shadigan hissasi 12% ni tashkil qiladi. Evropa Ittifoqi mamlakatlarida biomassadan olinadigan energiya miqdori, umumiy energiyaning atigi 3 % ni, ammo ba’zi mamlakatlada masalan, Avstriyada-12%, Shvetsiyada-18% va Finlyandiyada-23% ni tashkil qiladi.

Birlamchi biomassani tabiiy holda quruqlikda va suvda o‘sadigan o‘simliklar tashkil qiladi. Biomassa fotosintez natijasida hosil bo‘ladi, ya’ni fotosintez natijasida quyosh energiyasi, o‘sayotgan o‘simlik massasida to‘planadi. Fotosintezning energetik FIK o‘rtacha 5 % ni tashkil qiladi.

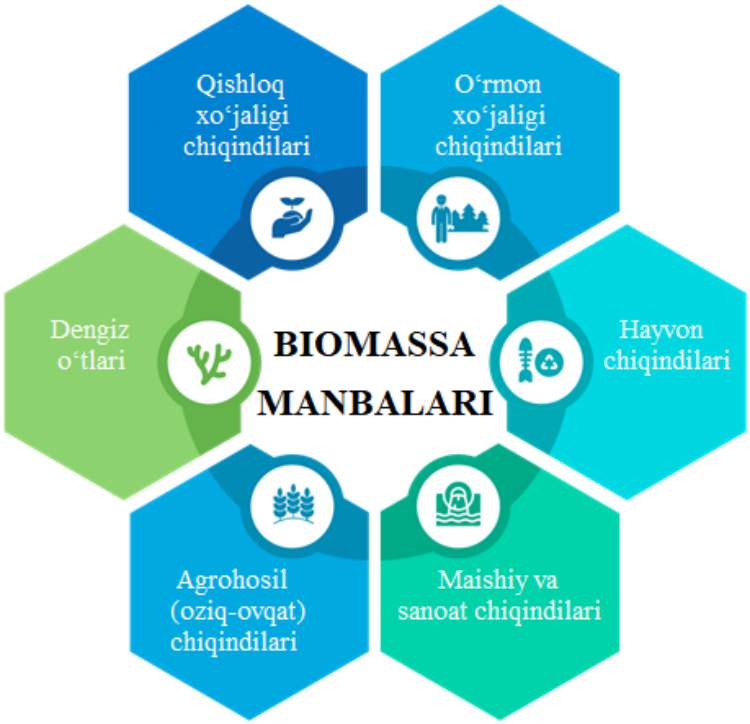
Energiya olish maqsadida birlamchi biomassadan, ana’naviy yoqilg‘ilar o‘rnini qoplaydigan yoqilg‘i sifatida foydalaniladi. Birlamchi biomassaga, o‘rmon va yog‘ochni qayta ishlash sanoati hamda qishloq xo‘jalik mahsulotlari chiqindilarini kiritish mumkin.



7.3-rasm. Biomassadan energiya ishlab chiqarish bosqichi.

O‘zbekistonda sug‘oriladigan qishloq xo‘jalik maydonlarini asosan g‘o‘za, g‘alla, tamaki, kungaboqar va poliz ekinlari egallaydi. Hozirgi kungacha g‘o‘zaning poyasidan qisman spirt, qog‘oz va bir qancha qurilish materiallarini ishlab chiqarishda xom ashyo sifatida foydalanib kelinadi. Qolgan o‘simliklarning poyalari tashlab yoki yoqib yuboriladi. Mana shu qishloq xo‘jalik chiqindilaridan ham biomassa, ya’ni bio yoqilg‘i sifatida foydalanish mumkin.

Biomassa energiyasi qayta tiklanadigan energiyaning eng istiqbolli manbai hisoblanib, organik moddalar (o‘simliklar va hayvonlar)dan ishlab chiqariladigan toza va qayta tiklanadigan energiya shaklidir. Biomassaga asoslangan energiya tizimlari xom-ashyoning keng tarqalganligi bilan bir qatorda ham issiqlik ham elektr energiyasini ishlab chiqarish qobiliyati bilan ajralib turadi. Biomassa turli xil konversiya usullaridan foydalangan holda issiqlik va elektr energiyasi, kimyoviy xom-ashyo ishlab chiqarishda keng qo‘llaniladi. Eng keng tarqalgan biomassa resurslariga yog‘och, yog‘och qirindisi(opilka), somon, qishloq xo‘jaligi chiqindilari, oziq-ovqat mahsulotlarini qayta ishlash chiqindilari, o‘rmon xo‘jaligi chiqindilari, ekinlar, maishiy chiqindilar va oqava suvlar kiradi (7.4-rasm).



7.4-rasm. Biomassa manbalari.

Boshqa barqaror energiya manbalaridan farqli o‘laroq, biomassa kimyoviy moddalar bilan birga to‘g‘ridan-to‘g‘ri yoqilg‘i ishlab chiqarishi mumkin. Haqiqattan ham biomassa qazilma yoqilg‘ilarga munosib muqobildir, chunki u ichki kimyoviy energiyani o‘zida saqlaydigan va atmosferaga chiqadigan issiqxona gazlari chiqindilarini kamaytirishga yordam beradigan qazib olinmaydigan organik materialdir. Uning yillik global energiya salohiyati 200-500 EJ ga teng deb baholanadi. Biomassa dunyo bo‘ylab ishlatiladigan energiyaning 14 % ini ta’minlaydi va sezilarli o‘sish istiqbollari bilan toza, qayta tiklanadigan, uzluksiz hamda dasturlashtiriladigan energiya manbai sifatida tasniflanadi. Undan energetik maqsadlarda foydalanish butun dunyoda keng tarqalgan va o‘rnatilgan.

Biomassa – bioyoqilg‘i va elektr energiya ishlab chiqarishda foydalanish mumkin bo‘lgan o‘rmon hamda qishloq xo‘jaligidagi o‘simlik qoldiqlari, oqava suv cho‘kindilari, organik modda va qoldiqlaridan iborat qayta tiklanuvchi energiya manbai. Qattiq maishiy chiqindi(QMCH)lar biomassaning bir turi bo‘lib, asosan, oziq-ovqat, qog‘oz, plastmassa, yog‘och, tekstill, metal va shisha mahsulotlari qoldiqlaridan, shu bilan birgalikda elektr lampochka, akkumulyator, avtoqismlar hamda tashlandiq dori vositalari kabi ayrim xavfli chiqindilardan tashkil topgan biomassaning bir turi bo‘lib, ekologik toza energiya (biogaz, bioyoqilg‘i) olish manbai hisoblanadi [89].

§7.2. Organik biomassani anaerobik parchalash jarayoni.

Anaerob parchalanish — bu organik chiqindilarning kislorodsiz muhitda bakteriyalar tomonidan gazsimon yoqilg‘iga parchalanish jarayonidir. Jarayon bir necha bosqichda amalga oshib, organik moddalarni ketma-ket ravishda yanada sodda organik birikmalarga ajratadi. Yakuniy mahsulot biogaz bo‘lib, u metan, karbonat angidrid hamda oz miqdordagi is gazlar aralashmasidan iborat. Biogaz, shuningdek, botqoq gazi, kanalizatsiya gazi, yoqilg‘i gazi, nam gaz nomlari bilan ham ataladi. Hindistonda esa u ko‘pincha “gobar gas” deb yuritiladi. Quyidagi 7.1-jadvalda biogaz tarkibidagi asosiy gaz birikmalari va ularning miqdori keltirilgan.

7.1-jadval. Biogaz tarkibi

№	Tashkil etuvchilar	Formulasi	Ulushi, %
1	Metan	CH_4	50-65
2	Karbonat angidrid	CO_2	30-45
3	Vodorod	H_2	1-3
4	Azot	N_2	0-5
5	Kislorod	O_2	0.01
6	Vodorod sulfid	H_2S	1-2

Anaerob sharoitda bakteriyalar va boshqa organizmlar yordamida ko‘p miqdorda organik moddalarni o‘z ichiga olgan har qanday kanalizatsiya chiqindilari yoki boshqa chiqindilarni qayta ishlash odatda anaerob parchalash deb ataladi hamda jarayon quyidagi uch bosqichdan iborat:

(i) gidroliz bosqichi;

(ii) kislota hosil bo‘lish bosqichi;

(iii) metan ishlab chiqarish bosqichi.

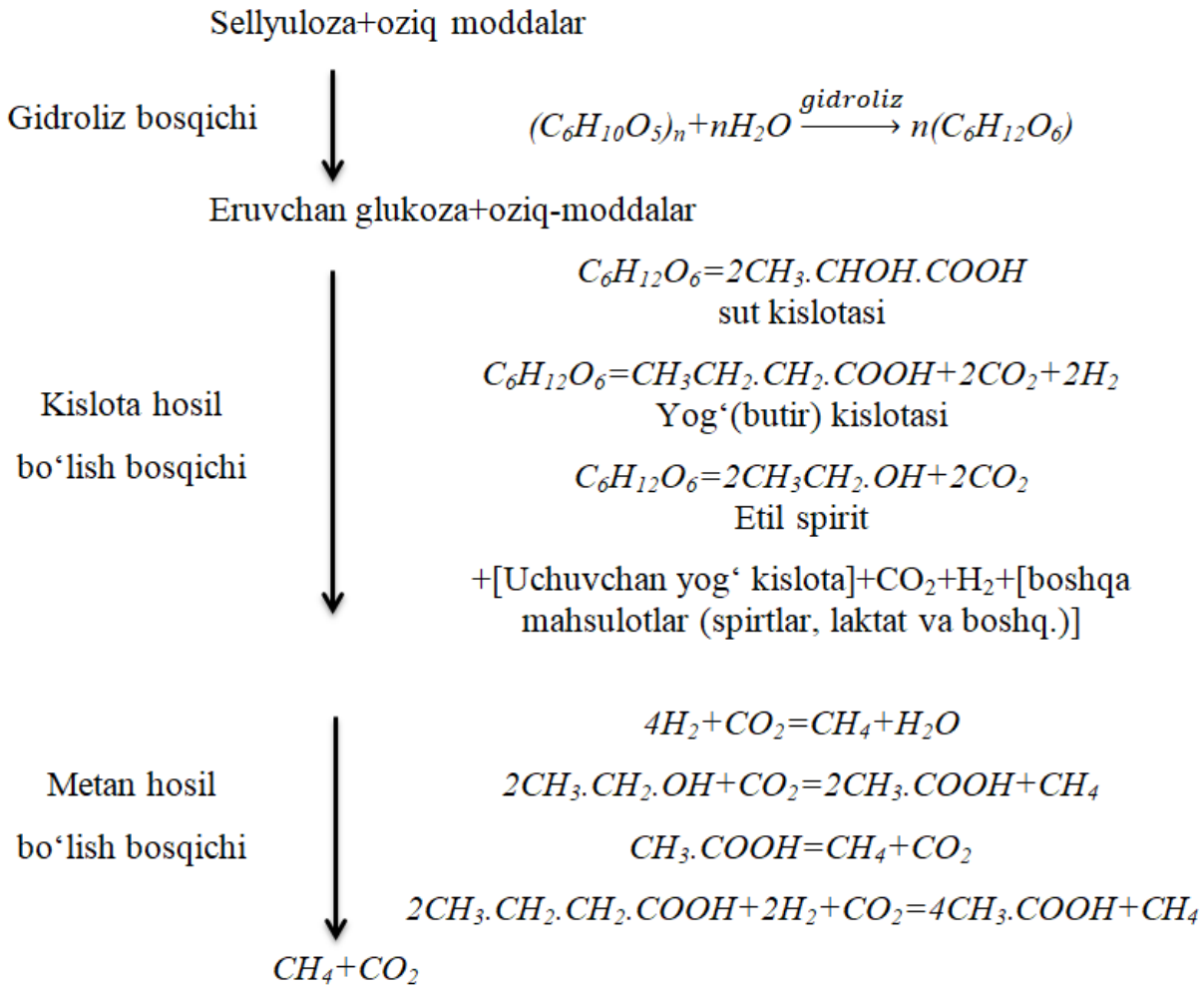
Gidroliz. Katta molekulalar fermentlar tomonidan kichikroq molekulalarga bo‘linadi, ular esa o‘z navbatida bakteriyalar tomonidan parchalanadi. Polisaxaridlar, oqsillar va lipidlar kabi organik moddalar monosaxaridlarga, peptidlarga, aminokislotalarga va yog‘ kislotalariga aylanadi. Keyin ular atsetat, propionat va butirat kabi organik kislotalarga aylanadi. *Cellulytica* bakteriyalari zanjirning qisqarishi va tarmoqlanishiga yordam beradi. *Cellulytica* bakteriyalar ikki turga bo‘linadi: mezofilik (30-40 °C) va termofilik (50-60 °C).

Kislota hosil bo‘lishi. Kislota hosil bo‘lish fazasi oddiy organik birikmalar uchuvchan yog‘ kislotalari kabi sodda kislotalarga aylanadigan faza. Sirka kislotasi yog‘lar, kraxmallar va oqsillarni parchalashning keng tarqalgan ikkilamchi mahsulotidir. Metan ishlab chiqaruvchi bakteriyalar qat’iy anaeroblar bo‘lib, metanni sirka kislotasini fermentatsiyalash orqali metan va karbonat angidrid hosil qilish yoki vodorod yordamida karbonat angidridni metanga qaytarish orqali ishlab chiqarishi mumkin. Sirka kislotasi metanogen bakteriyalar bilan reaksiyaga

kirishishi natijasida metan hosil bo‘ladi. Metan hosil bo‘lishining 70 foizi sirka kislotasi hisobiga bo‘ladi.

Metan hosil bo‘lishi. Metanogen bakteriyalar sirka kislotasi, etanol, karbonat angidrid va vodorod bilan reaksiyaga kirishib metan hosil qiladi. Metan hosil qiluvchi bakteriyalar sekin ishlaydi — 25 °C da parchalash jarayonini taxminan 14 kun ichida yakunlaydi. Qolgan parchalanmaydigan modda esa “shlam” (slurry) deb ataladi.

Biogaz ishlab chiqarish parchalanishga moyil organik moddalarni energiyaga boy gazga aylantirish uchun turli fizik, kimyoviy va biologik jarayonlarni o‘z ichiga oladi. Quyida jarayonga ta’sir etuvchi ayrim parametrlarga to‘xtalib o‘tamiz.



7.5-rasm. Anaerobik parchalash jarayonining biokimyoviy tasnifi.

C/N nisbati. Xomashyoda mavjud bo‘lgan uglerod va azot miqdorining nisbati C:N nisbati deb ataladi. Bu parchalash jarayoni uchun qulay muhitni saqlab turishda

juda muhim omildir. Uglerod energiya manbai sifatida, azot esa hujayra tuzilmasini shakllantirish uchun ishlatiladi. Anaerob parchalanishning optimal sharoiti 20 dan 30:1 gacha bo‘lgan C:N nisbatida kuzatiladi. Bu shuni anglatadiki, bakteriyalar azotga nisbatan uglerodni taxminan 20–30 barobar tezroq iste’mol qiladi.

Agar xom-ashyo tarkibida uglerod juda ko‘p bo‘lsa, avvalo azot sarflanib tugaydi va uglerod ortib qoladi. Bu esa parchalsh jarayonining sekinlashishiga va oxir-oqibat to‘xtab qolishiga olib keladi. Aksincha, agar azot miqdori haddan tashqari ko‘p bo‘lsa, uglerod tezda tugaydi va fermentatsiya jarayoni to‘xtaydi. Ortiqcha azot vodorod bilan birikib ammiak hosil qiladi. Bu esa bakteriyalarni, ayniqsa metan ishlab chiqaruvchi mikroorganizmlarni o‘ldirishi yoki ularning o‘sishini susaytirishi mumkin.

Harorat. Harorat parchalovchi qurilma (digester) ichida kechadigan reaksiyalar tezligiga bevosita ta’sir qiladi. Atrof-muhit haroratining ko‘tarilishi reaksiyalar tezligini oshiradi va shu bilan biogaz ishlab chiqarish hajmi ham ortadi. Metan hosil qiluvchi bakteriyalar eng yaxshi 35-38 °C haroratda faoliyat ko‘rsatadi. Gaz ishlab chiqarish 20 °C da kamayishni boshlaydi va 10 °C da to‘liq to‘xtaydi. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatdiki, digester harorati 25 °C bo‘lganida 4,25 m^3 chorva go‘ngidan har kuni 2,25 m^3 gaz hosil bo‘lgan. Harorat 28,3 °C ga ko‘tarilganda esa gaz ishlab chiqarish 50 foizga oshib, kuniga 3,75 m^3 ni tashkil etgan.

Saqlanish vaqti. Saqlanish vaqti — bu ma’lum hajmdagi xomashyo biogaz reaktorida qancha vaqt qolishini bildiradi. Boshqacha aytganda, bu vaqt material anaerob jarayon ta’sirida bo‘lish muddatidir. Saqlanish vaqti reaktor hajmi/kunlik xom-ashyo miqdori bilan hisoblanadi va kunlarda ifodalanadi.

Anaerob parchalanish sekin kechadi, shuning uchun to‘liq parchalanishi uchun materialni reaktorda uzoq vaqt ushlab turish kerak. Hindiston turidagi reaktorlarda xomashyo suv bilan suyultiriladi, shuning uchun qattiq va suyuq moddalar o‘rtasida aniq ajratish bo‘lmaydi. Bunda bakteriyalar oqava bilan tashqariga chiqadi, shuning uchun qattiq moddalar saqlanish vaqti va gidravlik saqlanish vaqti bir xil bo‘ladi.

Yuklash darajasi. Yuklash darajasi — bu reaktor hajmining bir birligiga kunlik kiritilayotgan xom-ashyo miqdori sifatida ta’riflanadi. Agar reaktor ortiqcha

yuklamalansa, kislotalarning to‘planishi ortib, kunlik gaz ishlab chiqarishga salbiy ta’sir qiladi. Aksincha, agar reaktor yetarlicha yuklamalanmasa, bu reaktor dizayn qilingan gaz ishlab chiqarish hajmiga salbiy ta’sir ko‘rsatadi.

pH yoki vodorod ionlari kontsentratsiyasi. Gaz ishlab chiqarishni barqaror saqlash uchun reaktorda mos pH oralig‘ini ta’minlash zarur. Shlamning pH qiymati parchalsh jarayonining turli bosqichlarida o‘zgaradi. Fermentatsiya jarayonining dastlabki kislota hosil bo‘lish bosqichida pH taxminan 6 yoki undan past bo‘ladi va ko‘p miqdorda CO_2 ajraladi. Keyingi 2–3 hafta ichida, o‘zgaruvchan kislotalar va azot birikmalari parchalanib, CH_4 hosil bo‘lgan sari pH oshadi.

Reaktor odatda pH 6,5–7,5 oralig‘ida bo‘lsa, mikroorganizmlar juda faol bo‘ladi va parchalsh jarayoni samarali kechadi. Agar pH 4–6 oralig‘ida bo‘lsa, bu kislotali deb ataladi; agar pH 9–10 oralig‘ida bo‘lsa, bu ishqoriy hisoblanadi. Ikkala holat ham metan hosil qiluvchi (metanogen) bakteriyalar uchun zararli hisoblanadi.

Umumiy qattiq modda miqdori

Chorva go‘ngi 80–82 % namlikni o‘z ichiga oladi. Qolgan 18-20 % esa umumiy qattiq modda deb ataladi. Chorva go‘ngi odatda 1:1 nisbatda aralashtiriladi, shunda umumiy qattiq modda miqdori 8-10% ga tushiriladi. Umumiy qattiq modda miqdorini shu tarzda ta’minlash materiallarning tezroq parchalanishiga yordam beradi va biogaz reaktorida turli hosil qoldiqlarini xom-ashyo sifatida aralashtirishni belgilashga imkon beradi.

Quyidagi 7.2-jadvalda biogaz ishlab chiqarishda zaruriy parametrlarning optimal qiymatlari keltirilgan.

7.2-jadval. Biogaz ishlab chiqarishning optimal parametrlari

Parametrlar	Optimal qiymat
Harorat	30 – 35 ^oC
pH	6.8 – 7.5
C/N nisbat	20 – 30:1
Qattiq modda miqdori	8 – 10 %
Saqlanish vaqti	20 – 50

Bioenergetika sohasini rivojlantirish nafaqat ekologik muammolar, balki i) energiya xavfsizligini ta’minlash, ya’ni energiya manbalarini diversifikatsiya qilish va import qilinuvchi qazilma yoqilg‘ilarga qaramlikni kamaytirish, ii) tabiiy resurslardan barqaror va samarali foydalanish hamda iii) qishloq hududlari iqtisodiyotini jonlantirish imkoniyatlarini yaratishi bilan ham dolzarb masala hisoblanadi. Shunga ko‘ra, qayta tiklanuvchi energiya manbalarining ulushini oshirish nafaqat issiqxona gazlari (IG) chiqindilarini kamaytirish, balki yuqorida qayd etilgan tizimli muammolarni bartaraf etish nuqtai nazaridan ham energetika tizimi uchun muhim yo‘nalish sanaladi.

Bugungi kunda chiqindilardan energiya olish konsepsiyasi energetika sektorida barqaror rivojlanish yo‘lidagi muhim yo‘nalish sifatida faol ilgari surilmoqda. Xususan, o‘rmon va qishloq xo‘jaligi chiqindilari, shuningdek, boshqa biomassa chiqindilaridan (qishloq xo‘jaligi va sanoat faoliyati natijasida hosil bo‘ladigan) bioenergiya, asosan elektr va issiqlik energiyasi ishlab chiqarish uchun foydalanish energetika tizimida muhim rol o‘ynamoqda va yaqin yillarda ushbu ulushning ortishi kutilmoqda. Biroq biomassaning notekis vaqti-vaqti bilan mavjudligi, texnik xizmat ko‘rsatish va logistika bilan bog‘liq nisbatan yuqori xarajatlar biomassa asosida elektr energiyasi ishlab chiqarish bilan bog‘liq yuqori xarajatlar hisoblanadi. Shu sababli, butun jarayonni iqtisodiy jihatdan samarali va raqobatbardosh qilish maqsadida bir qator chora-tadbirlar ko‘rilmoqda.

O‘rmon yoki qishloq xo‘jaligi faoliyati natijasida hosil bo‘ladigan yog‘och chiqindilaridan issiqlik va elektr energiyasi ishlab chiqarish energetika xavfsizligini sezilarli darajada oshirishi, issiqxona gazlari chiqindilarini kamaytirishi hamda chiqindilarning qiymatini oshirishi mumkin. Portugaliya va Uganda kabi mamlakatlarda o‘tkazilgan turli tadqiqotlarda energiya ishlab chiqarish uchun mavjud o‘rmon biomassasi qoldiqlari miqdori baholangan. Ushbu tadqiqotlar natijalariga ko‘ra, faqat kogeneratsiya (bir vaqtning o‘zida issiqlik va elektr energiyasi ishlab chiqarish) texnologiyalarini joriy etish orqali yog‘och yoqilg‘isi resurslari talab qilinadigan quvvat ehtiyojini qondirish uchun yetarli bo‘lishi mumkin. Shuningdek, biomassa yetkazib berish sohasidagi raqobatga, xususan,

xalqaro bozor uchun energetik maqsadlarda, asosan yog‘och chiqindilaridan ishlab chiqariladigan qattiq biomassa mahsulotlarining eng yirik turlaridan biri bo‘lgan granulalar (pelletlar) ishlab chiqarish bilan bog‘liq raqobatga alohida e’tibor qaratish zarur.

Sara González-García va Jacopo Bacenetti [92] lar Italiyada o‘rmon hamda qishloq xo‘jaligi faoliyati natijasida hosil bo‘ladigan yog‘och biomassasidan elektr va issiqlik energiyasi ishlab chiqarishni turli ishlab chiqarish ssenariylari hamda yakuniy foydalanish turlarini inobatga olgan holda tahlil qilishgan. Chunki mamlakatda o‘rmon xo‘jaligi umumiy maydoni 10 467 000 gektarni tashkil etib, bu Italiya hududining taxminan 34,7 foizini qamrab oladi. Mavjud bo‘lgan turli o‘rmon boshqaruv tizimlari orasida himoya kesish (yuqori o‘rmon) va tabiiy qayta tiklanishni birlashtirgan tizim keng tarqalgan. Ushbu hollarda o‘rmonlarni kesish jarayonida hosil bo‘ladigan yog‘och chiqindilari (asosan shox-shabba va uchlari) bioenergiya ishlab chiqarishda foydalanish uchun salohiyatga ega. Shunga ko‘ra, tadqiqotning asosiy maqsadi Italiyada kichik quvvatli biomassa yoqilg‘isi asosidagi issiqlik energiyasi ishlab chiqarish qurilmalarini kengaytirish orqali qazilma yoqilg‘ilarga bo‘lgan ehtiyojni kamaytirishga qaratilgan. Tahlilda intensiv tez o‘suvchi energiya o‘simliklari qatoriga kiruvchi tol va terak plantatsiyalaridan, shuningdek, tabiiy o‘rmonlardan hamda an’anaviy terak plantatsiyalaridan olingan biomassaning energetik salohiyati baholangan. Tadqiqot natijalari Italiyadagi an’anaviy energiya ishlab chiqarish ssenariysi, ya’ni tabiiy gaz asosida elektr va issiqlik energiyasi ishlab chiqarish profili bilan solishtirildi.

Ushbu tadqiqotda ekologik profilni baholash uchun tanlangan funktsional birlik — bu organik Rankin sikli (ORC) asosida ishlovchi kogeneratsiya (issiqlik va elektr energiyasi ishlab chiqaruvchi) qurilmasida ishlab chiqarilgan 1 kVt·soat elektr energiyasidir. ORC tizimida elektr energiyasi ishlab chiqarish samaradorligi 20%, qozonning issiqlik samaradorligi esa 85% deb qabul qilingan bo‘lib, bu qiymatlar biomassa manbaidan qat’i nazar bir xil bo‘lib qoladi. Ko‘rib chiqilgan kogeneratsiya (issiqlik va elektr energiyasi ishlab chiqarish) tizimi asosan ikki asosiy bo‘limdan: yog‘och biomassasi yoqiladigan qozon (issiqlik quvvati 6,047 MVt) va ORC asosida

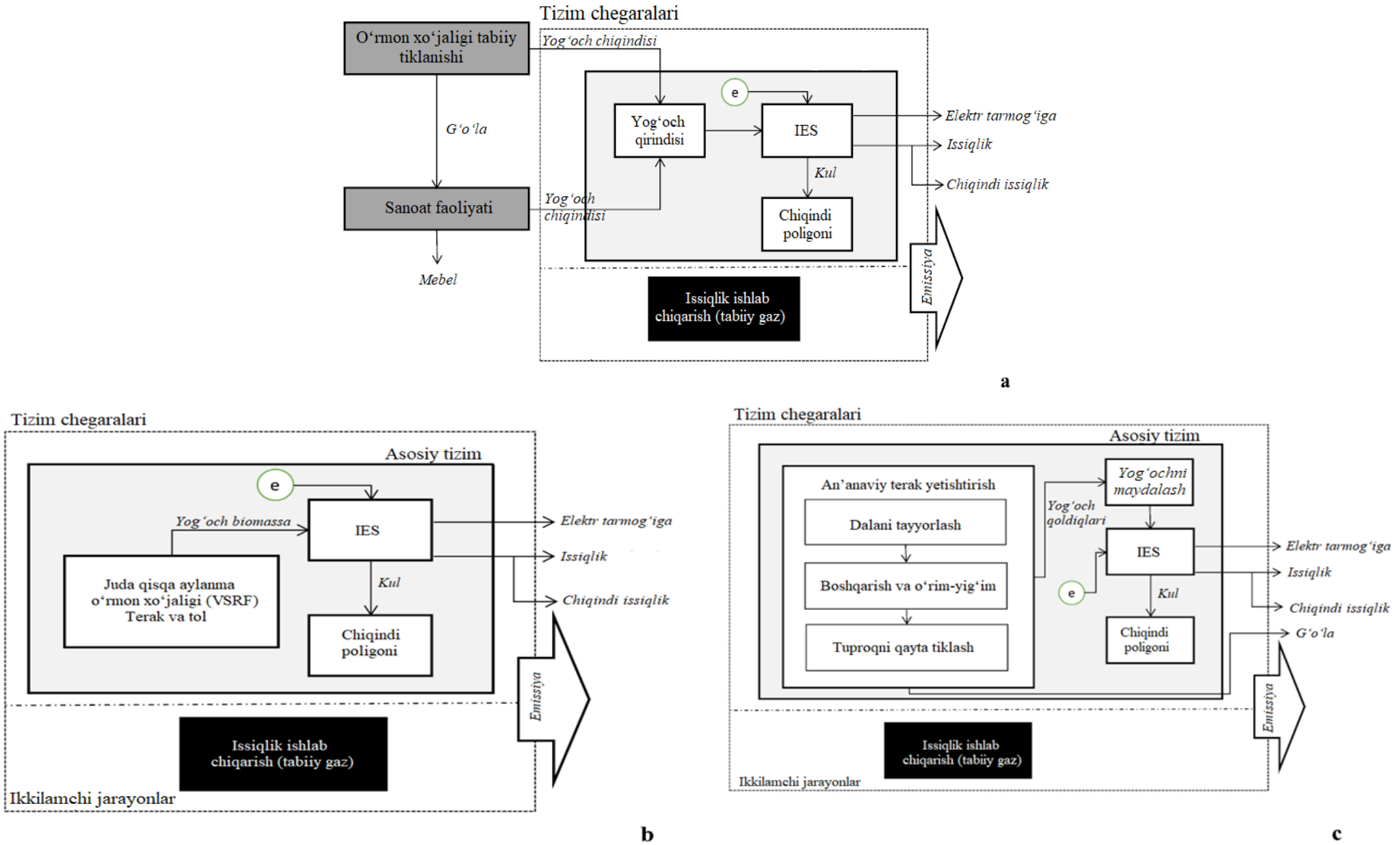
ishlovchi turbina (elektr quvvati 1 MVt) dan iborat bo‘lib, u an’anaviy bug‘ turbinasiga o‘xshash tarzda, issiqlik energiyasini avval mexanik, so‘ngra esa elektr energiyasiga aylantiruvchi turbogenerator orqali ishlaydi. Biroq, ORC tizimida suv o‘rniga yuqori molekulyar massaga ega bo‘lgan organik suyuqlik (masalan, HCFC-123, molekulyar massasi 152,9 $g \cdot mol^{-1}$) ishlatiladi. Bu esa turbinaning sekinroq aylanish tezligi, pastroq bosimda ishlashi, shuningdek, metall qismlar va parraklarning eroziyaga uchramasligini ta’minlaydi.

Issiqlik elektr stansiyasida (IES) biomassa qayta ishlash orqali hosil bo‘lgan issiqlik diatermik moy (310–315 °C va 6 bar) orqali ORC tizimiga uzatiladi, bu yerda issiqlik mexanik energiyaga aylantiriladi va elektr generatori orqali elektr energiyasiga o‘zgaradi. Ya’ni, organik suyuqlikdan olingan bug‘ turbinani aylantiradi, u esa to‘g‘ridan-to‘g‘ri elektr generatoriga ulangan. Shundan so‘ng, ishlatilgan bug‘ regenerator orqali o‘tib, kondensatorga yo‘naltiriladi va sovutish konturi yordamida sovutiladi. Markazlashtirilgan issiqlik ta’minoti tizimida foydalanilgan issiqlik kondensatorda qayta tiklanadi. Ko‘rib chiqilayotgan markazlashtirilgan issiqlik ta’minoti tarmog‘ining uzunligi taxminan 1,5 km bo‘lib, xizmat muddati 30 yilni tashkil etadi.

Yuqoridagi 7.6-rasmda bazaviy tadqiqotlar sifatida ko‘rib chiqilgan to‘rtta ssenariyga mos keluvchi oldingi bosqich tizim chegaralari ko‘rsatilgan. Ishlab chiqarilgan butun elektr energiyasi to‘g‘ridan-to‘g‘ri Italiya milliy tarmog‘iga uzatilsa, ishlab chiqarilgan umumiy issiqlikning atigi 16 foizi yaqin atrofdagi kasalxona va maktabning isitish ehtiyojlarini qondirish uchun yetkazib beriladi. Qolgan 84 foiz issiqlik esa qayta tiklanmaydigan chiqindi sifatida baholanadi.

1-ssenariy (Sc 1) tabiiy o‘rmon xo‘jaligi va sanoat faoliyati natijasida hosil bo‘ladigan qoldiqlarning xom-ashyo sifatida foydalanilishini o‘z ichiga oladi (7.6 a-rasm). Ushbu ssenariyda olinadigan biomassa asosan mebel sanoati uchun xom-ashyo (yumaloq yog‘och) sifatida yo‘naltiriladi. Yog‘ochni yig‘ib olish jarayonida hosil bo‘ladigan yog‘och qoldiqlari, jumladan uchlari va shox-shabbalari yig‘ib olinadi hamda butun plantatsiya davrida ushbu jarayon davom ettiriladi. Shu bilan birga, bu ssenariy doirasida ushbu yog‘och qoldiqlari bioenergetika ishlab

chiqarishida xom-ashyo sifatida baholanadi. Dastlab yog‘och qoldiqlari o‘rmon xo‘jaligida o‘z-o‘zini harakatlantiruvchi maydalagich yordamida maydalab olinadi va bioenergetika qurilmasiga tashiladi. Shuningdek, mebel ishlab chiqarish faoliyati natijasida hosil bo‘lgan qoldiqlar ham inobatga olinadi va zavodda maydalab tayyorlanadi. Ushbu senariyda ko‘p funksiyali jarayonning barcha ekologik yuklari (faqat o‘rmonni yig‘ib olish amaliyotidan kelib chiqadigan) asosiy mahsulot (yumaloq yog‘och)ga taqsimlanadi. Shu bois, yog‘och qoldiqlari chiqindi sifatida baholanadi va ularga faqat o‘rmon chiqindilarini maydalash hamda yog‘och qirindilarini tashish bosqichlari doirasida ekologik yuklama yuklanadi.



7.6-rasm. Bir xil miqdorda bio-energiya (issiqlik va elektr energiyasi) ishlab chiqaruvchi modellashtirilgan bio-energiya tizimlarining chegaralari.

2-ssenariy (Sc 2) va **3-ssenariy (Sc 3**) mos ravishda VSRF (tez o‘sadigan daraxt turlari) terak va tol plantatsiyalaridan olingan biomassa asosida issiqlik va elektr energiyasi ishlab chiqarishni ko‘rib chiqadi (1.13 b-rasm). VSRF plantatsiyalarini boshqarish tizim chegaralari doirasida baholangan bo‘lib, bu jarayon plantatsiyalarni tayyorlash va boshqarish, hosilni yig‘ib olish hamda plantatsiya davri (taxminan 10 yil har ikkala tur uchun) yakunida maydonlarni tiklash kabi barcha bosqichlarni o‘z ichiga oladi. Shuni alohida ta’kidlash joizki, sanoat maqsadlari uchun yumaloq yog‘och ishlab chiqarishga mo‘ljallangan o‘rmon plantatsiyalaridan farqli ravishda, ushbu ssenariylarda barcha ishlab chiqarilgan biomassa (shu jumladan shoxlar va barglar kabi yog‘och qoldiqlari) to‘liq yig‘ib olinadi va bioenergetika ishlab chiqarishiga yo‘naltiriladi. Butun plantatsiyadagi daraxtlar maxsus moslashtirilgan o‘rim mashinalari yordamida to‘liq kesiladi va bevosita maydonda maydalab tayyorlanadi.

4-ssenariy (Sc 4) an’anaviy terak plantatsiyalaridan olingan o‘rmon chiqindilarini qiymatlash (valorizatsiya) konsepsiyasiga asoslangan bo‘lib, bu plantatsiyalar asosan sellyuloza va mebel ishlab chiqarish uchun yumaloq yog‘och yetishtirishga mo‘ljallangan. Yog‘och qoldiqlari 1-ssenariy (Sc 1) dagi kabi qayta ishlanadi, ya’ni ular elektr stansiyasida maydalab tayyorlanib, issiqlik va elektr energiyasi ishlab chiqaruvchi (IES) blokida yoqiladi. Plantatsiyalarda amalga oshiriladigan barcha o‘rmon ishlari tizim chegaralari doirasida hisobga olingan (7.6 c-rasm). Shu tarzda, organik o‘g‘itlash, yer haydash, boronalash va ko‘chat ekish plantatsiya maydonlarini tayyorlash jarayonlari tarkibiga kiritilgan. Shuningdek, begona o‘tlarga va zararkunandalarga qarshi kimyoviy kurash, mexanik ravishda begona o‘tlarni yo‘q qilish, ob-havo sharoitlariga qarab sug‘orish ishlari hamda 12 yillik hayotiy davr oxirida hosilni yig‘ib olish jarayoni plantatsiyani boshqarish va yig‘im-terim bosqichiga qo‘shilgan. Nihoyat, hosil yig‘ib olingandan so‘ng plantatsiya maydonini tiklash ham o‘rmon maydalagichi yordamida amalga oshiriladi.

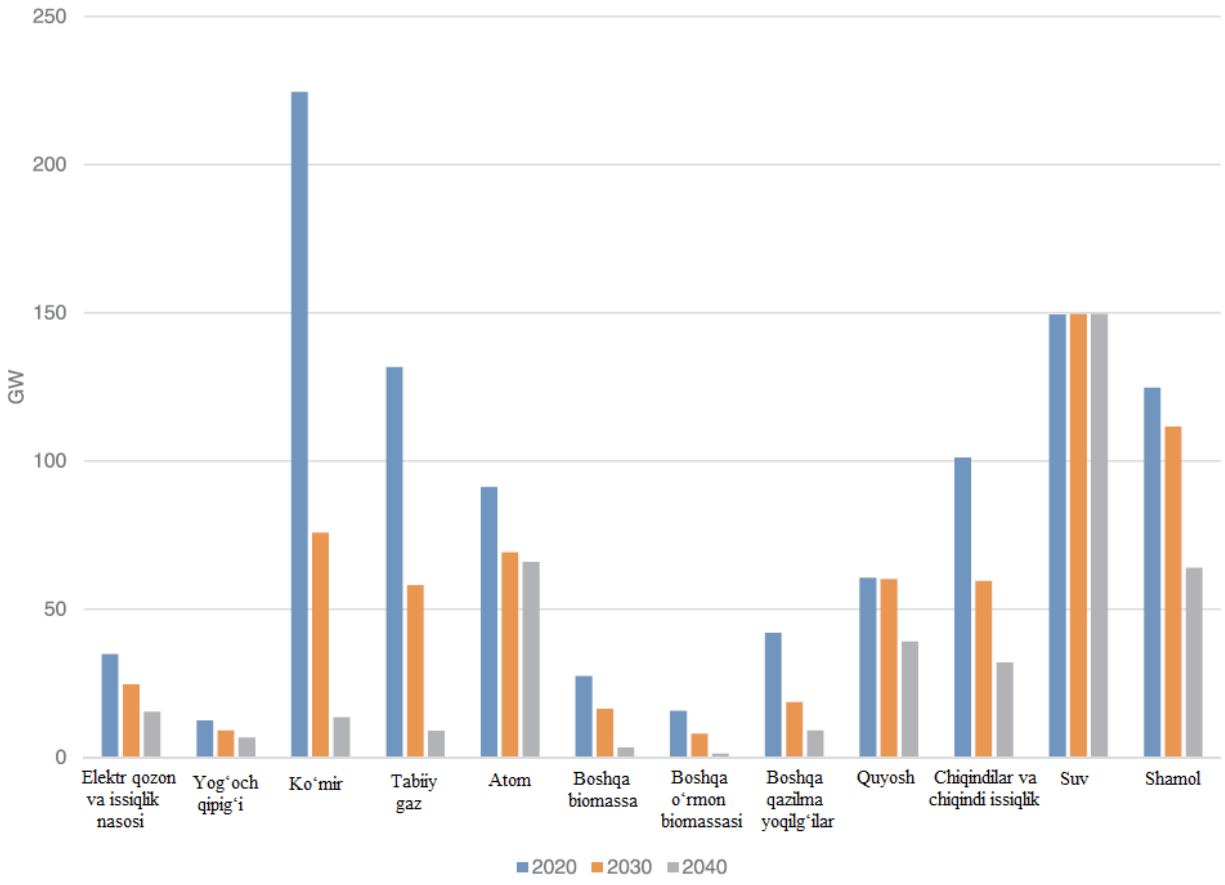
Har bir ssenariyda, shuningdek, oldini olingan jarayonlar (avoided processes) ham inobatga olingan, chunki biomassa yoqilishi natijasida issiqlik ishlab

chiqarishda tabiiy gaz sarfini tejash mumkin deb hisoblangan. Shu sababli, yakuniy iste’molchilar (yaqin atrofdagi kasalxona va maktab)ga yetkazib beriladigan issiqlik miqdori, maishiy qozonda tabiiy gaz yoqilishi orqali ishlab chiqarilgan issiqlik bilan solishtirilgan.

Mazkur tadqiqotning asosiy xulosalariga ko‘ra, LCA (Life Cycle Assessment – hayotiy siklni baholash) metodologiyasi atrof-muhitga oid yondashuv asosida qaror qabul qilish strategiyalarini qo‘llab-quvvatlashda qimmatli va foydali vosita bo‘lib xizmat qilishi mumkin. Biroq, to‘liq manzara hosil qilish maqsadida faqat ekologik barqarorlik emas, balki ijtimoiy va iqtisodiy ustunliklarni ham qamrab olgan qo‘shimcha tadqiqotlar o‘tkazish lozim. Bundan tashqari, jamoatchilik muhokamasida ko‘proq e’tibor qaratiladigan iqlim o‘zgarishi va qazilma yoqilg‘i tanqisligi kabi omillar bilan bir qatorda, biomassa yonishidan kelib chiqadigan havo ifloslantiruvchi moddalar emissiyasi bilan bevosita bog‘liq bo‘lgan boshqa toifalarga ham alohida e’tibor qaratish zarur, ayniqsa maxsus energiya ekinlari ko‘rib chiqilganda.

Eirik Ogner Jåstad va boshq. [93] tomonidan o‘tkazilgan tadqiqotda Shimoliy Yevropaning (Norvegiya, Shvetsiya, Finlyandiya, Daniya, Boltiqbo‘yi davlatlari, Polsha va Germaniya) markazlashgan issiqlik va elektr energiyasi bozorini qamrab oluvchi qisman muvozanat (Balmorel) modelidan foydalanilgan. Mazkur model issiqlik va elektr energiyasini ishlab chiqarish hamda yetkazib berish xarajatlarini soatlik vaqt aniqligida minimallashtirishga qaratilgan. Tadqiqotda turli uglerod narxlari ssenariylari doirasida yog‘och biomassasidan energiya ishlab chiqarishda foydalanishning roliga e’tibor qaratilgan. Yog‘och biomassasidan foydalanish natijasida yuzaga keladigan emissiya ta’sirini baholash uchun eng past xarajatli biomassa joriy etilishi sharoitida qazilma yoqilg‘ilardan kelib chiqadigan emissiyalar biomassa elektr va issiqlik ishlab chiqarishda umuman ishlatilmaydigan holat bilan solishtirilgan. Shundan so‘ng, yog‘och biomassasidan issiqlik va elektr energiyasi ishlab chiqarishdagi emissiya kamaytirish ta’siri xuddi shu miqdordagi biomassaning transport sektorida qazilma yoqilg‘ilarni almashtirish uchun qo‘llanilgandagi ta’siri bilan solishtirilgan.

Balmorel modelida energiya ishlab chiqarish jarayoni ekzogen yoki endogen tarzda belgilangan ishlab chiqarish quvvatlarining yuqori chegaralari doirasida amalga oshiriladi. Ekspluatatsiyaga kiritiladigan yoki chiqarib yuboriladigan rejadagi quvvatlar modelga ekzogen tarzda kiritilgan, holbuki, kelajakdagi investitsion imkoniyatlar model tomonidan endogen tarzda tanlanadi — bunda bozor narxlari kapital xarajatlari va o‘zgaruvchan ishlab chiqarish xarajatlarini qoplagan taqdirda investitsiya qarori qabul qilinadi. Ekzogen tarzda belgilangan quvvatlar 7.7-rasmda ko‘rsatilgan; vaqt o‘tishi bilan barcha texnologiyalar uchun bu quvvatlar pasayib boradi, faqat gidroenergetika texnologiyalari bundan mustasno. Amaldagi quvvatlarning ekspluatatsiyadan chiqarilishi belgilangan bosqichma-bosqich chiqarish strategiyalari va kutilayotgan texnik-iqtisodiy xizmat muddatlariga muvofiq amalga oshiriladi. Xususan, Belgiyada va Germaniyada atom elektr stansiyalarining 2020-2030 yillar oralig‘ida to‘liq ekspluatatsiyadan chiqarilishi nazarda tutilgan.



7.7-rasm. Yoqilg‘i va texnologiya turlari bo‘yicha elektr energiyasi hamda issiqlik ishlab chiqarishning ekzogen o‘rnatilgan quvvatlari (GVt).

Mavjud elektr stansiyalarining ekspluatatsiyadan chiqarilishi natijasida Balmorel modeliga iste’molni qondirish uchun yangi ishlab chiqarish quvvatlariga investitsiya kiritish zarur bo‘ladi. Ushbu iste’mol hajmlari 7.3-jadvalda ko‘rsatilgan. Optimallashtirish modeli esa talabni qondirish uchun mavjud bo‘lgan eng samarali va iqtisodiy jihatdan foydali texnologiyalar asosida investitsiyalarni baholaydi. Shuni ta’kidlash joizki, 7.3-jadvalda keltirilgan issiqlik va elektr energiyasining yakuniy iste’moli barcha stsenariylar uchun bir xil deb qabul qilingan.

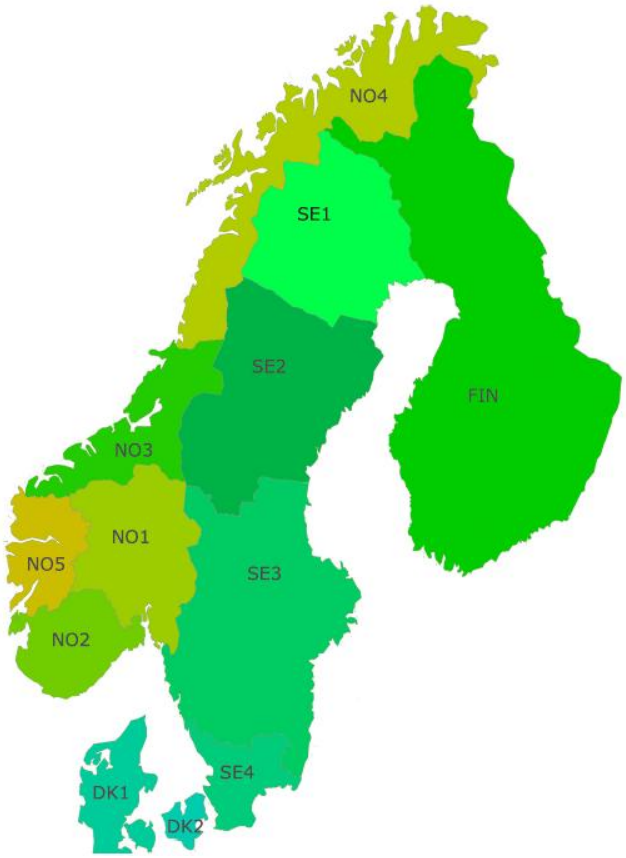
7.3-jadval. Taxminiy issiqlik va elektr energiyasi iste’moli (TW·soat/yil).

	Elektr energiyasiga talab 2020–2040	**Issiqlik energiyasiga talab 2020–2040**
Germaniya	530	116
Daniya	32	33
Estoniya	7.7	5.0
Finlandiya	82	79-76
Litva	6.5	7.7-6.0
Latviya	11	6.0
Polsha	144	66-88
Shvetsiya	131	90-85
Norvegiya	121	13-15
Belgiya	83	
Fransiya	448	Issiqlik sektori
Niderlandiya	111	kiritilmagan
Buyuklama Britaniya	311	
Umumiy	2018	415-428

Ushbu jadvalda issiqlik va elektr energiyasi iste'molining prognoz qilinayotgan miqdorlari keltirilgan. Elektr energiyasiga bo‘lgan talab barcha yillarda doimiy bo‘lib qoladi, issiqlik energiyasiga bo‘lgan talab esa ayrim mamlakatlar uchun ma'lum diapazonda ortib borishi ko‘zda tutilmoqda.

Ushbu tadqiqotda qo‘llanilgan model versiyasi Norvegiya, Shvetsiya, Finlyandiya, Daniya, Estoniya, Latviya, Litva, Germaniya va Polshada markazlashgan issiqlik ta’minoti va elektr energiyasi bo‘yicha taklif va talabni, shuningdek, Belgiya, Fransiya, Niderlandiya va Buyuklama Britaniyada elektr

energiyasi bo‘yicha taklif va talabni qamrab oladi. Har bir mamlakat bir yoki bir nechta mintaqalardan iborat. Mazkur model versiyasida umumiy hisobda 24 ta elektr ta’minoti mintaqalari mavjud bo‘lib, ularning chegaralari NordPool hududlari bilan mos keladi [93]. Shimoliy Yevropa mamlakatlari bo‘yicha hududiy bo‘linish 7.8-rasmda ko‘rsatilgan.



7.8-rasm. Skandinaviya mamlakatlaridagi hududlar, bundan tashqari, Germaniya 4 ta hududga, Estoniya, Latviya, Litva, Polsha, Belgiya, Fransiya, Niderlandiya va Buyuklama Britaniya esa bittadan mintaqaga bo‘lingan.

Shuningdek, mazkur tadqiqotda Balmorel modelining xarajatlarni minimallashtirish versiyasi qo‘llanilgan bo‘lib, unda belgilangan energiya iste’molini eng past xarajatlar bilan qondirish maqsad qilib olingan. Modelning maqsadli funktsiyasi quyidagi xarajat komponentlarini o‘z ichiga oladi: yoqilg‘i xarajatlari, ekspluatatsiya va texnik xizmat ko‘rsatish xarajatlari, gidroakkumulyatsiya uchun suv omborlari va ishlash xarajatlari, uzatish xarajatlari, elektr va issiqlik energiyasi ishlab chiqarish, uzatish va saqlash quvvatlarini oshirish

uchun investitsion annuitet xarajatlari hamda soliqlar. Balmorel modelidagi eng muhim cheklov energiya balansi cheklovidir. Bu cheklov har bir vaqt bosqichi va subregionda energiya iste'moli, ishlab chiqarish, uzatish, yo'qotishlar va saqlashning yig'indisi nolga teng bo'lishini ta'minlaydi.

Elektr energiyasi va isitish tizimlarining batafsil modellashtirilishi asosida tadqiqotchilar yog'och biomassasidan issiqlik va elektr energiyasi ishlab chiqarishda foydalanish, avvalo, 2040 yilga kelib tabiiy gaz asosida elektr energiyasi ishlab chiqarishni kamaytirishga yordam beradi degan xulosaga kelishgan. Bundan tashqari, barcha o'rganilgan uglerod narxlari ssenariylarida biomassa issiqlik va elektr energiyasi ta'minotida muhim rol o'ynashda davom etadi. Agar yog'och qipig'i issiqlik va elektr energiyasi ishlab chiqarishda yoqilg'i sifatida chiqarib tashlansa, umumiy tizim xarajatlari 0,2–0,7% ga oshadi, 2030 yilga kelib esa issiqlik narxlari o'rtacha 8–20% ga ko'tariladi. Issiqlik narxlariga ta'sir ba'zi mamlakatlarda unchalik katta bo'lmasa-da, Shvetsiya va Finlyandiya kabi mamlakatlarda sezilarli darajada yuqori bo'ladi. Biomassadan foydalanish, ma'lum darajada, shamol energiyasi, ko'mir va markazlashgan issiqlik ta'minoti tizimlarida elektr energiyasi iste'molini almashtiradi. Shunday qilib, yog'och qipig'i yordamida elektr va issiqlik ishlab chiqarish qazilma yoqilg'idan kelib chiqadigan chiqindilarni kamaytiradi, ammo modellashtirish natijalari shuni ko'rsatadiki, chiqindilarni kamaytirish miqdori uglerod narxi va issiqlik va elektr sektorlaridagi texnologik tarkibga bog'liq. Biomassa o'rnini bosuvchi effektlar uglerod narxining oshishi bilan kamayadi va 2040-yilda 2030-yilga nisbatan pastroq bo'ladi. Bu esa 2040-yilda energetika tizimida qazilma yoqilg'i ulushi umumiy kamayishi bilan bog'liq. Shimoliy Yevropa energetika tizimi (Polsha, Germaniya, Skandinaviya va Boltiqbo'yi mamlakatlari) uchun yog'och qipig'i optimallashtirilgan holda ishlatilsa, 2030 yilda qazilma uglerod chiqindilari 7–19 million tonna CO_2eq ga (4–27% ga) qisqaradi. 2040 yilda esa mos ravishda 10–17 million tonna CO_2eq ga (7–43% ga) qisqarishi kuzatiladi. Agar modellashtirish ssenariylarida yog'och qipig'i yoqilg'i varianti sifatida ko'rib chiqilmasa, issiqlik saqlash quvvatidan foydalanish biomassa qo'shilgan ssenariyga nisbatan 24% ga oshadi.

Marokashda bioqoldiqlarning katta miqdori mavjudligi sababli, biomassa energiyasidan elektr energiyasi ishlab chiqarish mazkur muammolarni yumshatishi va quyoshli, yomg‘irli hamda shamolsiz davrlarda shamol va quyosh energiyasi ishlab chiqarishining pasayishini qoplash imkonini beradi. Shu munosabat bilan, Meisam Mahdavi va boshqalar [94] tomonidan Marokashning Tazuta qishlog‘i hamda Fes shahri qishloq hududlarida biomassa, shamol va quyosh energiyasidan foydalanilgan gibrid elektr energiyasi ishlab chiqarish imkoniyati baholangan.

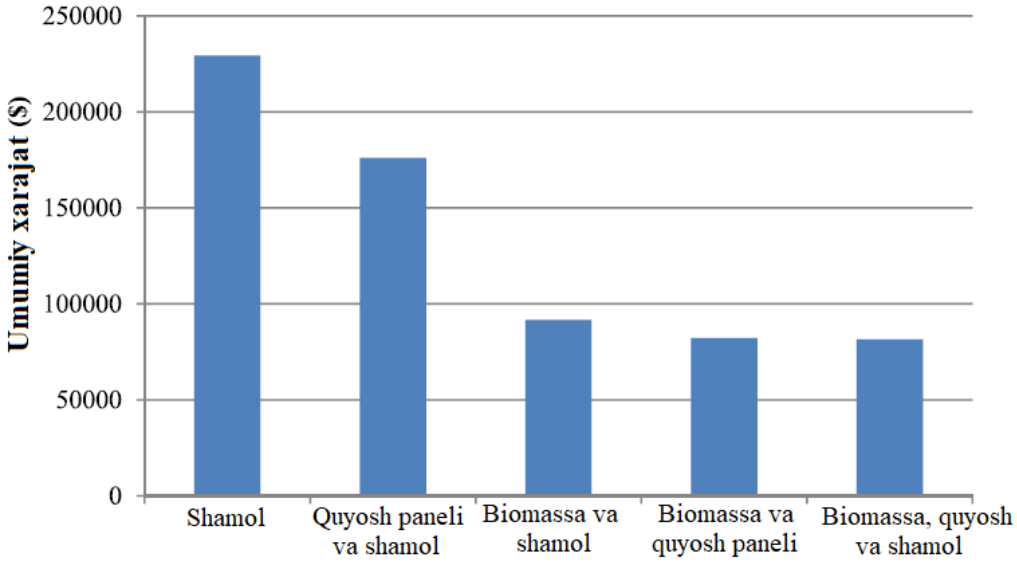
Energiya importi uchun to‘lanayotgan yuqori xarajatlar, neft narxlarining o‘sish tendensiyasi va mamlakatda iqtisodiy rivojlanish, sanoatlashtirish, aholining o‘sishi, urbanizatsiya hamda yashash darajasining oshishi kabi omillar Marokashni qayta tiklanuvchi energiya manbalarini muqobil energiya manbasi sifatida keng joriy etishga undamoqda.

Quyosh va shamol elektr stansiyalarida elektr energiyasi ishlab chiqarish darajasi juda o‘zgaruvchan bo‘lib, bu energiya tizimining barqarorligini pasaytiradi. Shu bois, ushbu qayta tiklanuvchi manbalar bilan birgalikda biomassa asosidagi ayrim energiya resurslarining integratsiyalashuvi energiya tizimini barqarorlashtirishda muhim ahamiyat kasb etishi mumkin.

Biomassadan to‘g‘ridan-to‘g‘ri elektr va issiqlik energiyasi olish mumkin bo‘lib, bu odatiy yoqish usuli orqali amalga oshiriladi yoki bilvosita gazifikatsiya, anaerobik parchalanish hamda fermentatsiya kabi jarayonlar orqali bio-yoqilg‘i ishlab chiqarishda foydalanilishi mumkin.

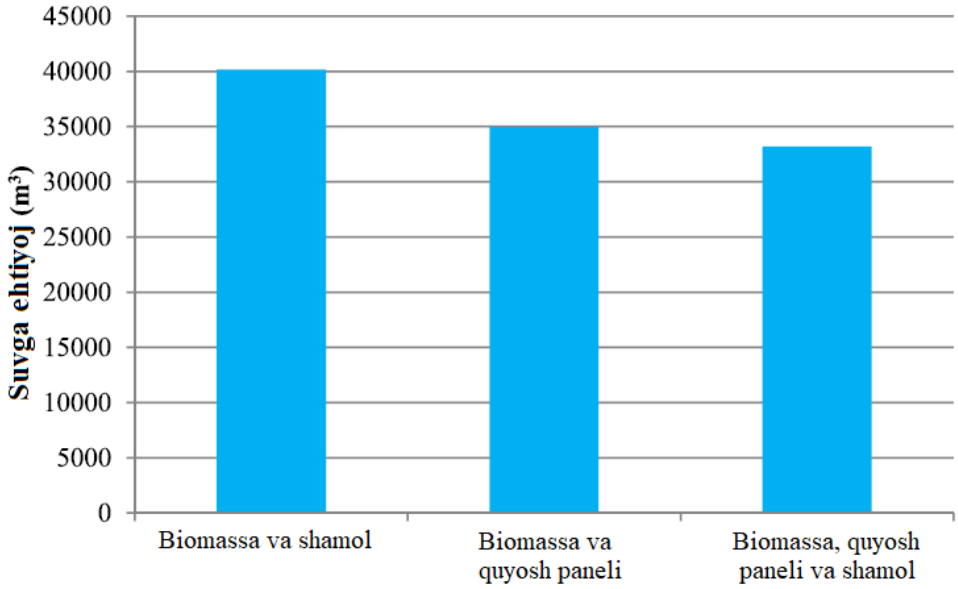
Quyidagi rasmlarda turli elektr energiyasi ishlab chiqarish usullarining umumiy xarajatlari solishtiriladi (7.9-rasm), biomassadan energiya generatsiyasi uchun zarur bo‘lgan suv miqdori (7.10-rasm) va barcha energiya generatsiya usullari uchun CO_2 chiqindilari hajmi (7.11-rasm) tasvirlangan.

Yuqoridagi 7.9-rasmdan ko‘rinib turibdiki, elektr energiyasini biomassa elektr stansiyalarini boshqa qayta tiklanadigan energiya texnologiyalari bilan birlashtirib ishlab chiqarish faqat shamol turbinalari yoki fotoelektrik va shamol energiyasining gibrid tizimidan foydalanishga qaraganda iqtisodiy jihatdan foydaliroqdir.



7.9-rasm. Turli ishlab chiqarish texnologiyalarining umumiy narxi.

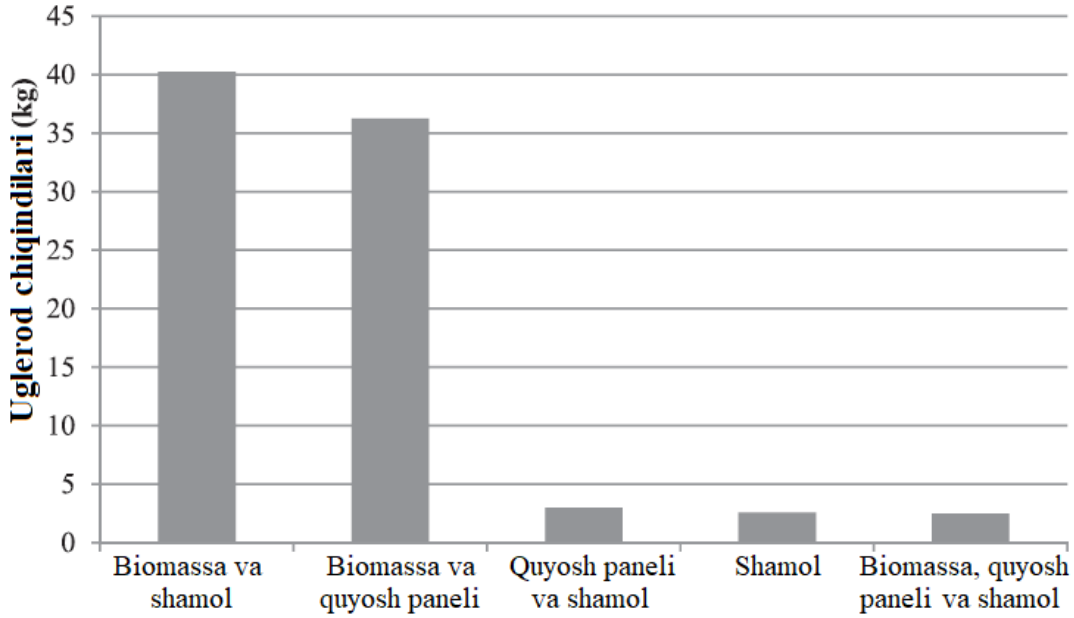
Buning asosiy sababi biomassadan energiya ishlab chiqarishda batareyalar va konvertorlarni o‘rnatish talab qilinmasligi, holbuki shamol va fotoelektrik tizimlarda bunday uskunalar zarur bo‘lib, bu qo‘shimcha xarajatlarga olib keladi.



7.10-rasm. Turli ishlab chiqarish usullari, jumladan, biomassa uchun suv talablari.

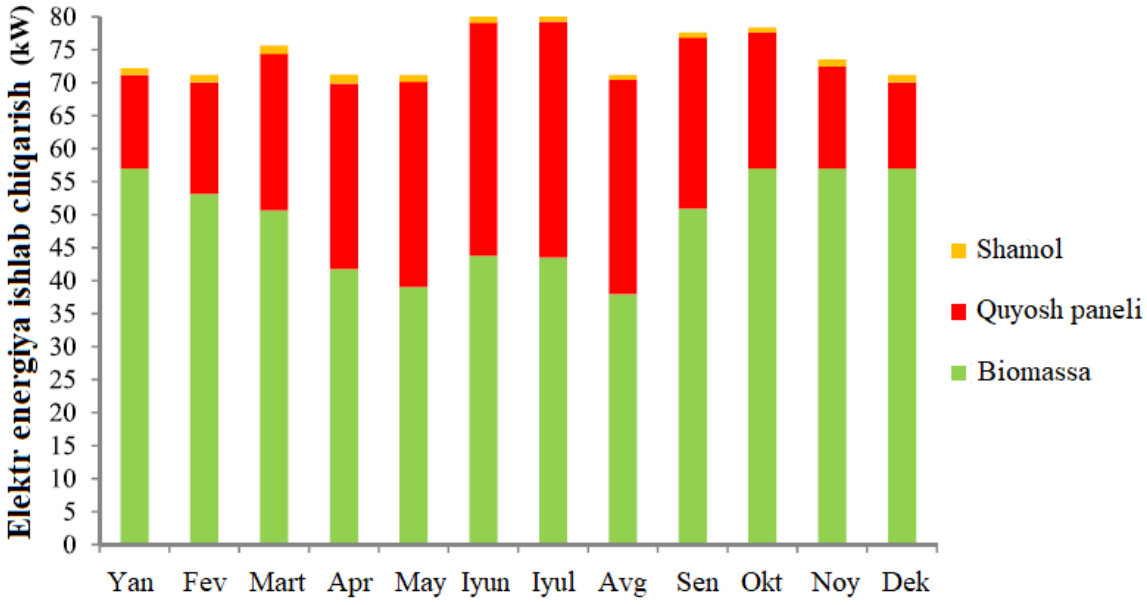
Yuqoridagi 7.10-rasm va 7.11-rasm mos ravishda ko‘rsatadiki, biomassa, quyosh va shamol energiyalarining gibrid generatsiyasida suv iste’moli hamda karbonat angidrid (CO_2) chiqindilari biomassa ishtirokidagi boshqa elektr energiyasi ishlab chiqarish usullariga nisbatan ancha pastdir. Bu natijalar shuni anglatadiki,

mazkur uch manbali gibrid tizim suv resurslari va atrof-muhitga eng kam zarar yetkazuvchi, barqarorroq elektr energiyasi ishlab chiqarish variantidir.



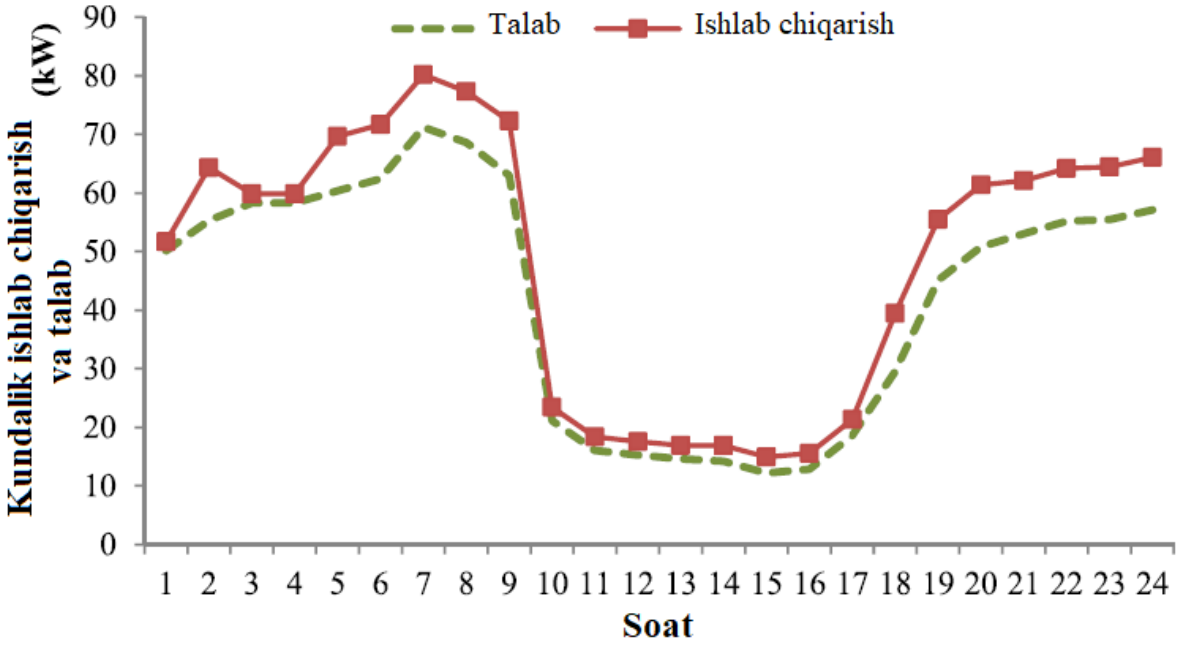
7.11-rasm. Barcha ishlab chiqarish usullaridan chiqadigan uglerod chiqindilari.

Quyidagi 7.12-rasm biomassa, fotoelektrik va shamol energiyasi tizimlari birgalikda ishlaganda har bir texnologiyaning ikki hududdagi umumiy yuklamalamani qoplashdagi ulushini ko‘rsatadi. Bundan tashqari, 7.13-rasm esa taklif etilgan tizim umumiy kunlik yuklamalamani qanday qondirishini grafik tarzda tasvirlaydi.



7.13-rasm. Yil davomida elektr energiyasi ishlab chiqarish.

Yuqoridagi 1.26-rasmdan ko‘rinib turibdiki, biomassadan ishlab chiqarilgan elektr energiyasi oylik elektr energiyasiga bo‘lgan talabning katta qismini qoplaydi. Buning sababi shundaki, shamol energiyasi ishlab chiqarish jarayoni shamol tezligiga kuchli bog‘liq bo‘lib, bu parametr nafaqat yil davomida, balki oy, hafta va hatto kun mobaynida ham o‘zgaruvchan xususiyatga ega. Bundan tashqari, fotoelektrik energiya ishlab chiqarishda ham ba'zi qisqarishlar kuzatiladi, ayniqsa yanvar, fevral, noyabr va dekabr oylarida yomg‘irli mavsumlar tufayli, bu davrda quyosh nurlanishining pastligi yomg‘irli va bulutli ob-havo sharoitlari bilan bog‘liq.



7.14-rasm. Umumiy kunlik yuklamalamaga qarab kunlik ishlab chiqarish ko‘rsatkichlari.

Tadqiqot natijalariga ko‘ra, Marokashning Tazuta qishlog‘ida va Fesning qishloq hududida biomassa elektr stansiyalari, shamol turbinlari hamda fotoelektrik qurilmalarning gibrid ishlatilishi faqat shamol turbinlarining ishlashiga va boshqa gibrid ishlab chiqarish senariyalariga nisbatan arzonroq elektr energiyasi ishlab chiqarish hamda havoga chiqindilarni kamaytiradi. Biomassa va fotoelektrik modullarining elektr stansiyalarini qurish gibrid ishlash holatida qimmat shamol turbinalarining sonini kamaytiradi. Shu sababli, biomassa energiya ishlab chiqarish Tazuta va FES hududlaridagi umumiy energiya talabining deyarli uchdan ikki qismini qondirishi mumkin. Bu esa fotoelektrik va shamol qurilmalarining mos

ravishda 33% va 2% ga nisbatan yuqori. Biomassa elektr stansiyalari iste'molchilarga yil davomida quyosh nurining va shamolning yo'qligi davrlarida barqaror energiya taqdim etishi mumkin. Biomassa qurilmalarini shamol va quyosh qurilmalari bilan birgalikda ishlatish doimiy hamda uzluksiz elektr ta'minotini ta'minlash uchun zarur.

§7.3. Biogaz, uning tarkibi, hosil bo'lish jarayoni va miqdori.

Biologik chiqindilarni to'g'ridan-to'g'ri yoqish yo'li bilan energiya olishdan tashqari biogaz ham olish mumkin. **Biogaz**-har xil biologik mahsulotlarni havosiz muhitda fermentatsiya-achishi natijasida hosil bo'ladigan mahsulotdir. Biogaz-gazlarning aralashmasi. Uning asosiy tashkil qiluvchilari: metan (SN_4) - 55-70%, uglerod dioksidi (SO_2) – 28-43% va oz miqdordagi masalan, 500 promill vodorod sulfid (N_2S) va boshqa gazlardir. O'rtacha 1 kg organik modda 70 % biologik parchalanganda 0,18 kg metan, 0,32 kg karbonot angidrid, 0,2 kg suv va 0,3 kg ajralmaydigan qoldiqqa bo'linadi. Fermentatsiya natijasida hosil bo'lgan gazlardan uylarni va suvni isitishda, ovqat tayyorlashda va boshqa maqsadlarda foydalanish mumkin. Ayniqsa asosiy energetik tarmoqlardan uzoqda joylashgan qishloqlarda biogazdan foydalanish, qishloq aholisi uchun juda ko'p qulayliklarni yaratishga xizmat qiladi.

Biogaz va organik o'g'itlar hosil bo'lish jarayoni maxsus bioreaktorlar-metantenklarda amalga oshiriladi. Unitilgan yoqilg'i manbasi hisoblangan biogaz, qadim Xitoyda birinchi bo'lib foydalanilgan. Shuning uchun hozirgi kunda, biogaz ishlab chiqarish bo'yicha dunyoda etakchi o'rinlarni Xitoy egallaydi. O'tgan asrning 70-yillari o'rtalarida bu mamlkatda bir millionga yaqin metan tanklar qurilib ishga tushirilgan. Hozirgi vaqtda ularning soni 20 mln. dan oshib ketgan. Xitoy Xalq Respublikasida milliy energetik iste'molining 30 % biogaz hisobidan qoplanadi.

Biogaz ishlab chiqarish bo'yicha dunyoda ikkinchi o'rinni Hindiston egallaydi. O'tgan asrning 30-yillarida dunyoda birinchi bo'lib Hindistonda biogas olish texnologiyasini rivojlantirish bo'yicha milliy dastur qabul qilingan. 2000 yilning oxirlarida Hindistonning qishloqlarida qurilgan metan tanklarning soni 1 mln. dan oshib ketdi. Natijada bir qancha qishloqlarning energiya bilan ta'minlanishi hamda ularning sanitar-gigienik holati yaxshilandi, o'rmonlardagi daraxtlarni kesish

keskin kamaydi va tuproqning tarkibi yaxshilandi. Bugungi kunda Hindistonda kunlik biogaz ishlab chiqarish miqdori 2,5÷3,0 mln. m^3 dan oshib ketdi.

Nepalda milliy biogaz kompaniyasi tashkil qilindi va u faol bilan ish olib bormoqda. YAponiyaniyaning 8 dona chorvachilik xo‘jaliklarida qurilgan biogaz qurilmalari muvaffaqiyatli ekspluatatsiya qilinmoqda.

Dastlabki hisoblar shuni ko‘rsatadiki, chiqindilar bilan aralashtirilgan 1 t. o‘simlik biomassasidan 350 m^3 (metan, vodorod) gaz olish mumkin.

Bir sigirning go‘ngidan bir kunda 4,2 m^3 gacha biogaz olish mumkin. 1 m^3 biogazning energiyasi, 0,6 m^3 tabiiy yoqilg‘i gaz, 0,74 l neft, 0,65 l dizel yoqilg‘isi, 0,48 l benzin va boshqalarning energiyasiga to‘g‘ri keladi. Biogaz qo‘llash bilan yoqilg‘i mazuti, ko‘mir, elektr energiya va boshqa elektr energiyasi ishlab chiqaruvchi manbalar tejaladi. Biogaz qurilmalarini tadbiq etish, chorvachilik va parrandachilik fermalarining hamda ular joylashgan atrof-muhit ekologiyasini yaxshilaydi.

Bir kilogramm go‘ngdan qancha gaz olish mumkin? Bir litr suvni qayna- tish uchun 26 litr gaz sarflanshini hisobga olib quyidagi chiqindilardan qancha suvni qaynatishga etarli gaz olish mumkinligi aniqlangan:

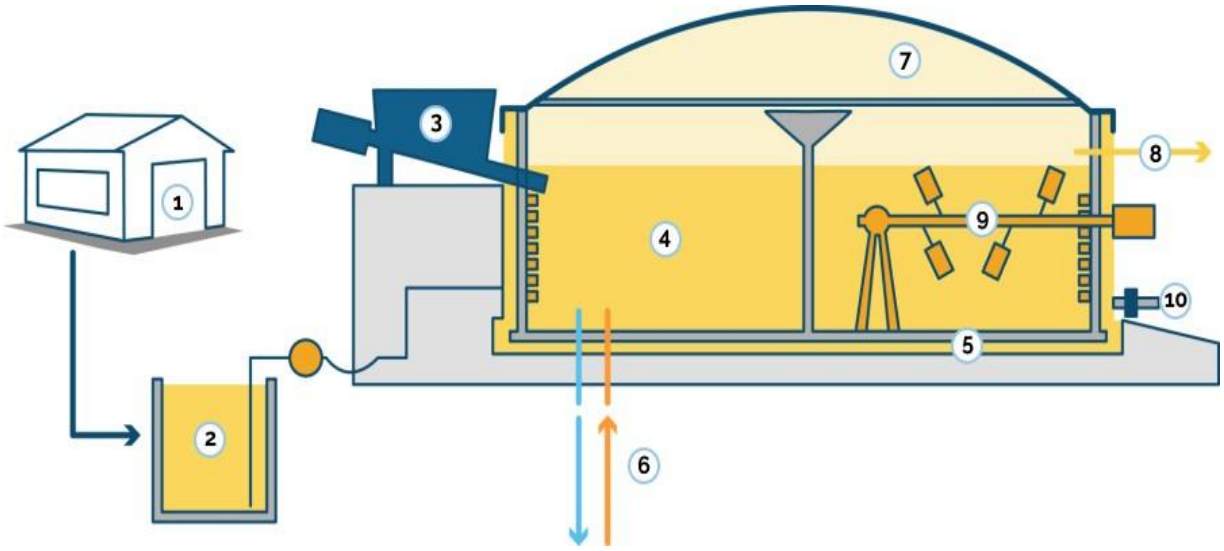
- qoramolning 1 kg go‘ngidan 7,5÷15 litr suvni qaynatishga;
- cho‘chqaning 1 kg go‘ngidan 19 litr suvni qaynatishga;
- qushlarning 1 kg tezagidan 11,5÷23 litr suvni qaynatishga;
- dukkakli ekinlarning 1 kg poxolidan 11,5 litr suvni qaynatishga;
- kartoshkaning 1 kg poyasidan 17 litr suvni qaynatishga;
- pomidorning 1 kg poyasidan 27 litr suvni qaynatishga.

Biogazning afzalliklaridan biri, hohlagan joyda issiqlik va elektr energiya ishlab chiqarishdan iboratdir.

Chiqindilarni biokonversiya jarayoni, energetik muammoni hal qilishdan tashqari yana ikkita masalani hal qiladi. Birinchidan, achigan go‘ng odatdagi go‘ngga qaraganda qishloq xo‘jalik ekinlarining hosildorligini 10÷20 % oshiradi. Ikkinchidan, chiqindilar achigan vaqtda go‘ng tarkibida ko‘p miqdorda bo‘lgan begona o‘tlarning urug‘lari, har xil mikroblarning birikmalari, gelmintin urug‘lari va ytoksiz hidlar yo‘qotiladi.

Biogaz olish qurilmalari va ulardan foydalanish jarayoni. Biogaz olish qurilmalarining sxemasi va konstruktiv-texnologik parametrlari, qayta ishlanadigan xom ashyoning hajmiga, achitiladigan xom ashyo materialining xossalariga, issiqlik-namlik rejimiga, xom ashyoni yuklamalash va achitish usuligi va boshqa bir qancha omillarga bog‘liqdir. Biogaz qurilmasining asosiy jihozi-issiqlik

almashtiruvchi germetik yopilgan idish (issiqlik uzatuvchi 50-60°C gacha qizlirilgan suv), go‘ngni kiritish va chiqarish hamda hosil bo‘lgan gazni chiqarib ketish moslamalaridir (7.4-rasm).



7.15-rasm. Biogaz ishlab chiqarish qurilmasining sxemasi.
1-Suyuq biomassa ishlab chiqarish; 2-Suyuq xom ashyoni yig‘ish va gomogenizatsiya qilish sig‘imi; 3-Qattiq xom ashyoni yuklamalovchi qurilma; 4-Bioreaktor; 4-Metantenk; 5-Qurilmani isitish uchun issiq suvni uzatish va chiqarish tizimi; 6-Gazgolder; 7-Biogazni chiqarish; 8-Aralashtiruvchi mexanizm; 9-Biomassani chiqarish.

Biogaz maxsus biogaz qurilmalarida ishlab chiqariladi. Bunday qurilmalar ichida kislorodsiz muhit saqlanadi, unda bakteriyalar biomassani biogazga aylantiradi. Biogaz qurilmalari xilma-xil bo‘lib, ularning konstruksiyasi, mahalliy sharoitga hamda biogaz olish uchun xom ashyo miqdoriga bog‘liqdir. Quyida ba’zibir biogaz qurilmalaring konstruksiyalarini ko‘rib chiqamiz.

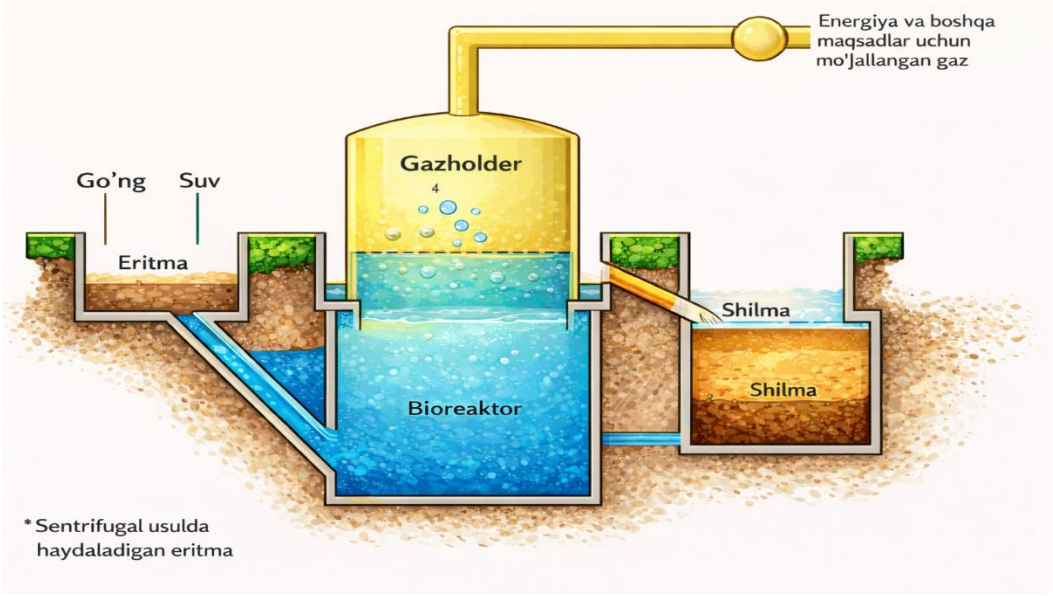
Biogaz ishlab chiqarish qurilmasining asosiy qismlari biomassa qabul qilish qurilmalari va metantenk hisoblanadi. Metantenk tarkibiga esa o‘z navbatida bioreaktor va gazgolder kiradi. Biomassa qabul qilish qurilmalarida biomassa anaerob parchalanishga tayyorlanadi, zarur bo‘lsa, unga dastlabki ishlov beriladi. Shundan so‘ng tayyorlangan biomassa bioreaktorga uzatiladi.

Bioreaktor suv o‘tkazmaydigan va havo o‘tkazmaydigan idish bo‘lib, unga biomassa kiritish uchun maxsus qurilmaga ega. Uning ichida anaerob muhit saqlanadi. Bioreaktor biomassa hajmi bo‘ylab parchalanish jarayonining bir tekis kechishi uchun aralashtirish vositalari bilan jihozlangan. Reaktor ichida

parchalanish jarayoni optimal kechishi uchun zarur harorat - taxminan 40°C saqlanadi. Shuningdek, bioreaktor parchalanish tugagandan keyin biomassani chiqarib yuborish uchun maxsus quvur bilan ta’minlangan.

Gazgolder esa po‘latdan yasalgan germetik idish bo‘lib, parchalanish jarayonida hosil bo‘ladigan gazni to‘playdi. U biogazni gazgolderdan chiqarish uchun mo‘ljallangan gaz chiqarish quvuri bilan jihozlangan.

7.5-rasmda biogaz reaktorining soddalashtirilgan sxemasi keltirilgan bo‘lib, sxemaga asosan xom ashyo - suv va go‘ng aralashmasi bioreaktorga joylashtiriladi. Xom ashyo – substrat miqdori bioreaktor hajmining 90% ni to‘ldirishga etishi lozim. Substrat bioreaktorda 7÷12 kun ushlab turiladi. Olingan gazni yoqib har xil maqsadlarda foydalaniladi, yoxud uni issiqlik yoki elektr energiyaga aylantirish mumkin.



7.16-rasm. Biogaz reaktorining soddalashtirilgan sxemasi.

Foydalanib bo‘lingan xom ashyo bioreaktordan chiqarib tashlanadi va bioreaktor yangi xom ashyo bilan to‘ldiriladi. Biogazdan foydalanish quydagi afzalliklarga ega:

- biogaz SO_2 ga qaraganda neytral yoqilg‘i hisoblanadi, undan foydalanish esa atmosferada organik chiqindilarni achitishda yuzaga keladigan metan gazi miqdori ko‘payishining oldini oladi;

- achitilgan bimossadan olinadigan o‘g‘itlar qiymati boshlang‘ich xom ashyonikidan ancha yuqori;

- fermerlarga qarashli erlarda ozuqa moddalarini ekologik xafsiz va iqtisodiy foydali uslubda ikkilamchi qayta ishlash qattiq biomassani biogaz olish uchun achitishning afzalligi hioblanadi;

- atrof-muhitning ifloslanishi kamayishi hisobiga insonlarning sog‘ligi yaxshilanadi;

- uzoq qishloqlarda ham maishiy qulayliklar yaratadi;

- erlarni hosildorligini oshiradi;

- chiqindilardan foyda olish imkonini beradi;

- energetik qaramlikdan ozod qiladi.

Hozirgi vaqtda, bir kunda taxminan 6-8 m^3 biogaz va 100-120 litr o‘g‘it ishlab chiqaradigan kichik bioreaktorlar o‘rnatilmoqda.

7.17-rasm. Buxoro viloyati Qaravul bozor tumanidagi Buxoro Neftni qayta ishlash zavodiga qarashli YOSHQ fermasining organik chiqindilarida ishlaydigan biologik gaz olish qurilmasi.

Rasmda umumiy hajmi 300 m^3 bo‘lgan mamlakatimizdagi mavjud biogaz qurilmalaridan biri keltirib o‘tilgan.

Biogaz qurilmalarini ishlatishning iqtisodiy samaradorligi. Biogaz qurilmalarini ishlatishning iqtisodiy samaradorligini ularda qo‘llaniladigan organik chiqindilardan biogaz olish jarayonida hosil bo‘ladigan yuqori sifatli organik o‘g‘it, biogaz (metan) yoki hayvonlar, parrandalar va boshqa turdagi jonivorlarga qo‘shimcha emish sifatida beriladigan darmondorining (V12) olinish usuli va qurilmalarining hajm birligida ishlov beriladigan biomassa miqdori belgilaydi.

Ko‘pgina adabiyotlarda bu samara-dorlik organik chiqindilarni ishlov berishda ulardan olinadigan mahsulot sifati va miqdori tanlanishiga bog‘liqligi keltiriladi.

Biogaz olish qurilmalarining iqtisodiy samaradorligi hisob-lash davrida ulardan olinadigan mahsulotlarning turi va sifatiga qarab, yuqori sifatli organik o‘g‘it, biogaz yoki darmondorining sotishdan olingan foyda bilan baholangani ma’qul. Bundan tashqari anaerob jarayonda qatnashayotgan organik chiqindilar atmosferaga chiqarayotgan zaxarli gazlarning keskin kamayishini hisobga olish kerak. Ammo BGQda organik chiqindilarni qayta ishlash davrida atmosferaga chiqarib tashlanayotgan issiqxona gazlarining tutib qolingan miqdori atmosferaga ko‘rsatadigan ta’sir tannarxini hisoblash metodikasi shu vaqtgacha mavjud emasligi salbiy ta’sir (anamaliya) deb yuritilib kelinmoqda. Biogaz olish qurilmalarida yuqori sifatli organik chiqindilar tannarxi uni sotishdan olingan foyda hisoblanadi. Bunda bir tonna organik chiqindi tarkibidagi organik o‘g‘itning mineral o‘g‘itlarga solishtirish (yerlarga va o‘simliklarga solish me’yori) hisobidan olingani maqsadga muvofiq. Bioshlam tarkibining asosiy qismini suv (88,5% dan ortiq) va quruq organik modda (11,5%) tashkil qiladi. Agar qoramol organik chiqindilariga mo‘ljallangan xo‘jalikda 10 m^3 hajmdagi bioreaktor uzluksiz (termofil harorat rejimida) holatda ishlatilayotgan bo‘lsa, undagi qayta ishlangan bioshlam tarkibidan bir sutkada to‘g‘ridan-to‘g‘ri erga solish uchun mo‘ljallangan organik azot (2 … 3 kg), fosfor (1,6 kg), kaliy (3,6 kg) va natriy 0,96 kg va kalsiy 1,28 kg olish imkoniyati paydo bo‘ladi. Bioreaktorlarda texnologik shart-sharoitlar to‘liq saqlansa o‘rtacha 1 m^3 foydali hajmidan sutkada 3m^3 gacha biogaz olish imkoniyati tug‘iladi

Organik chiqindilarni anaerob qayta olish qurilmalarini qurish, ishlatishni tashkil qilish, qanday korxona va tashkilotlarda qo‘llash iqtisodiy samara berishi ularda paydo bo‘ladigan kundalik organik chiqindilarning miqdoridan kelib chiqib belgilangani ma’qul. Bunday korxonalar tarkibiga: a) qishloq xo‘jaligida: qoramolchilik fermalari, parranda fabrikalari, cho‘chqaxona va otxonalar hamda qishloq xo‘jaligi o‘simliklari chiqindixonalari; b) issiqxonalardan chiqaètgan ildizpoya chiqindilari; v) mahsulotlarni qayta ishlovchi korxonalar: spirt, pivo, qand zavodlari, baliq, go‘sht, sut va poliz mahsulotlarini mevalarni qayta ishlash

zavodlari, non mahsulotlari ishlab chiqarish korxonalari, so‘nggi vaqtlarda sho‘rlangan erlarni mineralizatsiyasini kamaytirish uchun zaxkashlarda ekilayotgan yuqori suv o‘tlarini qayta ishlash zavodlari; g) shahar oqova suvlarini tozalash korxonalari. d) qishloq joyi mahallalari chiqindilar yig‘ilish joylarini kiritish mumkin.

Qishloq bioreaktorlari o‘rta hajm bioreaktorlari bo‘lib (kunida 10 tonnagacha organik chiqindiga qayta ishlov beradigan) ularni katta xarajatlarsiz qishloq aholisi hashari orqali mahalliy ashyolar yordamida qurib ishga tushirish mumkin. Bunday qurilmalar shu qishloq aholisi tomorqalarining mineral o‘g‘itlarga bo‘lgan talabini to‘liq qondirish bilan birga qo‘shimcha ravishda elektr energiyasi bilan ta’minlash va atmosferaga chiqarilayotgan noxush gazlarni tutib qolish imkoniyatini yaratadi. Organik chiqindilarni tabiiy sharoitda qayta ishlash (anaerob jarayonni 99,99% tabiiy bijg‘itish deyish mumkin) va ularni boricha tabiatga qaytarishdan olinadigan iqtisodiy samaradorligi behisob. Ma’lumki, tirik mavjudodlar kundalik iste’mol bilan tirik. Inson organizmiga ovqat bilan singadigan tarkib uning fiziologik va aqliy rivojlanishi hamda umrining uzayishini belgilaydi. Kam miqdorda ovqatlanish tartibini buzilishi (ho‘l va quruq mevalar, ildizmevali poliz ekinlari va boshqalar tarkibidagi kichik o‘zgarishlar) inson organizmi immunitetini pasaytiradi. Buning asosiy sababi esa ekologik muhitning kam miqdorda radionuklidlar, toksik elementlar, nitrobirikmalar, pestitsidlar, antibiotiklar va garmonlar bilan ifloslanishidir. Bunga asosiy sabab zaruratdan ishlatilgan, yuqorida keltirilgan moddalarning organik chiqindilarga qo‘shilib, qayta ishlov berilmay, o‘simlik dunèsiga qaytarish hisoblanadi. Bu ko‘rsatkich anaerob qayta ishlashning asosiy iqtisodiy samaradorligini belgilaydi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. Decree of the President of the Republic of Uzbekistan No. UP-158 dated September 11, 2023, ‘On the Strategy "Uzbekistan - 2030".

2. https://minenergy.uz.

3. Allaev K.R. Modern Energy Sector and Prospects for Its Development. Tashkent: Fan va texnologiyalar, 2021. - 951 p.

4. Gerasimov V.G. et al. Electrical Engineering Handbook. Volume 3. Generation, Transmission, and Distribution of Electric Power. Moscow: MEI, 2004. - 964 p.

5. Product Catalog of the Joint-Stock Company SP AO «UZKABEL». Tashkent, 2021. - 464 p.

6. IEC 60364-5-52:2009. Low-voltage electrical installations – Part 5 -52: Selection and erection of electrical equipment – Wiring systems. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2009. - 214 p.

7. https://solar.huawei.com/.

8. https://www.solaxpower.com/.

9. GOST R IEC 60050-121-2010. International Electrotechnical Vocabulary. Part 121. Electromagnetism. Moscow: Standartinform, 2011. – 42 p.

10. R.R. Avezov, A.Yu. Orlov. Solar Heating and Hot Water Supply Systems. Tashkent: Fan, 1988. - 288 p.

11. N.R. Avezova, R.R. Avezov, A.U. Vokhidov. Resource Indicators of Flat Solar Water Heating Collectors. Methodology for Calculating the Main Thermal, Techno-Eco- nomic, and Environmental Indicators of Solar Collectors // LAP-Lambert Academic Publishing - Saarbrücken, Germany, 2016. – 93 p.

12. GOST 32144–2013. Electric Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Standards for Electric Energy Quality in General-Purpose Power Supply Systems. Moscow: Standartinform, 2014. – 16 p.

13. M. Mirzaboev, Q. Rasulov. Solar Battery Elements. Tashkent:

Uzbekistan, 1979. – 23 p.

14. https://globalsolaratlas.info/.

15. A.M. Mirzabaev, T.A. Makhkamov, O.R. Sytdykov, Sh.M. Mirzabekov, Sh.I. Dungbaev. Development of Solar Energy in Uzbekistan and Methods for Its Promotion. Issues of Energy and Resource Conservation. Tashkent: Fan va texnologiyalar, 2017, No. 1-2, pp. 182–186.

16. I.A. Yuldoshev, M.Q. Sultonov, F.M. Yuldashev. Solar Energy. T.: Bookany Print, 2022. – 338 p.

17. M.M. Mirzabaev, K. Rasulov, A. Komilov, A. Iskanderov, S.T. Tashhodzhaeva. Characteristics of physical processes in photoconverters based on silicon and gallium arsenide under concentrated solar radiation. T.: Fan, 1986. – 144 p.

18. R. Verduci, V. Romano, G. Brunetti, N. Yaghoobi Nia, A. Di Carlo, G. D'Angelo, C. Ciminelli. Solar Energy in Space Applications: Review and Technology Perspectives. Advanced Energy Materials, 2022. DOI: 10.1002/aenm.202200125.

19. J. Li, A. Aierken, Y. Liu, Y. Zhuang, X. Yang, J. H. Mo, R. K. Fan, Q. Y. Chen, S. Y. Zhang, Y.M. Huang, Q. Zhang. A Brief Review of High Efficiency III-V Solar Cells for Space Application. Frontiers in Physics, 2021, Vol. 8, Article 631925. DOI: 10.3389/fphy.2020.631925.

20. IEC 60904-1:2020. Photovoltaic devices – Part 1: Measurement of photovoltaic current- voltage characteristics. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2020. - 64 p.

21. IEC 60904-3:2019. Photovoltaic devices – Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2019. -44 p.

22. IEC 61853-1:2011. Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating – Part 1: Irradiance and temperature performance measurements and power rating. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2011. — 42 p.

23. IEC 61853-2:2016. Photovoltaic (PV) module performance testing and

energy rating – Part 2: Spectral response, incidence angle and module operating temperature measurements. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2016. — 50 p.

24. IEC 61215-1:2016. Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval – Part 1: Test requirements. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2016. – 62 p.

25. IEC 61215-2:2016. Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval – Part 2: Test procedures. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2016. – 9 p.

26. A.M. Mirzabaev. RENEWABLE ENERGY SOURCES AND UTILIZATION TECHNOLOGIES. T.: Fan Ziyosi, 2023. — 244 p.

27. M.M. Koltun. Optics and Metrology of Solar Cells. Moscow: Nauka, 1985. – 280 p.

28. https://www.jinkosolar.com/.

29. Akram M. Mirzabayev, Temur A. Makhkamov, Shakhnoza A. Mukhamadova, Lazizakhon R. Makhkamova, Sanobar N. Avliyakulova. Effect of Surface Soiling on the Energy Output of Monocrystalline Photovoltaic Modules. International Scientific and Technical Conference 'Challenges and Solutions for the Efficient Use of Alternative Energy Sources'. ProceedinHz. Karshi, 2024. pp. 526– 530.

30. Mohan, N., Undeland, T. M., Robbins, W. P. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. – 3rd ed. – Hoboken, NJ: Wiley, 2022. – 832 p.

31. Rashid, M. H. Power Electronics: Devices, Circuits, and Applications. – 5th ed. Hoboken, NJ: Pearson, 2023. – 1072 p.

32. Andreev, V.D., Zharkov, Yu.D. Power Electronics: A Textbook for Universities. Moscow: Akademiya, 2010. – 544 p.

33. SUN2000-(3KTL-10KTL)-M1 High Current Version User Manual. – 2025. Huawei Digital Power Technologies Co., Ltd.

34. NFPA 70: National Electrical Code (NEC) – 2023 edition. Article 690:

Solar Photovoltaic (PV) Systems. Includes requirements for circuit sizing and overcurrent protection, specifically clauses 690.8(A)(1) and 690.8(B)(1), detailing factors of 1.25 and 1. 56 for fuse/ conductor sizing. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2023.

35. IEC 62548:2016. Design requirements for photovoltaic (PV) arrays. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2016.

36. IEC 62109-1:2010. Safety of power converters for use in photovoltaic power systems –Part 1: General requirements. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2010.

37. IEC 62109-2:2011. Safety of power converters for use in photovoltaic power systems – Part 2: Particular requirements for invertors. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2011.

38. IEC 62305-1:2024. Protection against lightning – Part 1: General principles. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2024.

39. IEC 62305-3:2024. Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2024.

40. IEC 62305-4:2024. Protection against lightning – Part 4: Electrical and electronic systems within structures. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2024.

41. A.M. Mirzabaev, T.A. Makhkamov. Issues of Integration of Photovoltaic Power Plants into the Electric Power System. Problems of Energy and Resource Saving. Special Issue No. 87. Tashkent: Fan va texnologiyalar, 2004. pp. 365–377.

42. Akram M. Mirzabaev, Temur A. Makhkamov, Afzalkhuja R. Kudratov, Shahnosa A. Mukhamadova, Lazizakhon R. Makhkamova. The impact of the grid invertor’s connection point on the operational efficiency of a photovoltaic power plant. International Scientific and Technical Conference ‘Problems and Solutions for the Effective Use of Alternative Energy Sources.’ ProceedinHz Collection. Karshi, 2024. pp. 477–480.

43. EN 50618:2014. Electric cables for photovoltaic systems. Brussels:

CENELEC, 2014 (incorporating Corrigendum 2015).

44. TÜV 2 PfG 1169/08.2007. Requirements for cables for use in photovoltaic systems (PV1-F). Cologne: TÜV Rheinland, 2007.

45. Electrical Installation Regulations (PUE), Seventh Edition. Moscow: ENAS NC Publishing House, 2003. 557 pp.

46. Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E. *Wind Energy Handbook*. 2nd ed., Wiley, 2011.

47. Hau, E. *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Springer, 2013.

48. Manwell, J.F., McGowan, J.G., Rogers, A.L. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. Wiley, 2010.

49. Paraschivoiu, I. *Wind Turbine Design: With Emphasis on Darrieus Concept*. Polytechnic International Press, 2002.

50. Gasch, R., Twele, J. *Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation*. Springer, 2012.

51. Mathew, S. *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Springer, 2006.

52. Hansen, M.O.L. *Aerodynamics of Wind Turbines*. 3rd ed., Earthscan, 2015.

53. International Renewable Energy Agency. *Renewable Capacity Statistics 2023*. Abu Dhabi, 2023.

54. International Energy Agency. *World Energy Outlook 2023*. Paris, 2023.

55. Global Wind Energy Council. *Global Wind Report 2024*. Brussels, 2024.

56. Brinkmann Consulting. *Global Wind Market Forecast 2023–2033*.

57. International Electrotechnical Commission. *IEC 61400-1: Wind Turbines – Design Requirements*. Geneva, 2019.

58. International Electrotechnical Commission. *IEC 61400-2: Small Wind Turbines*. Geneva, 2013.

59. International Electrotechnical Commission. *IEC 61400-3: Offshore Wind Turbines*. Geneva, 2019.

60. International Organization for Standardization. *ISO 19900: Offshore*

Structures – General Requirements.

61. API. *API RP 2A-WSD: Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms*.

62. Rezaeiha, A., Kalkman, I., Blocken, B. Effect of solidity on the performance of vertical axis wind turbines. *Energy Conversion and Management*, 2017.

63. Castelli, M.R., Englaro, A., Benini, E. The influence of blade geometry on Darrieus wind turbine performance. *Journal of Fluids Engineering*, 2011.

64. Musial, W., Butterfield, S., Ram, B. Energy from offshore wind. *Energy Policy*, 2006.

65. Hansen, M.O.L., Sørensen, J.N. Aerodynamic analysis of wind turbines. *Progress in Aerospace Sciences*, 2008.

66. O‘zbekiston Respublikasi Energetika vazirligi. Qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirish konsepsiyasi (2020–2030).

67. “O‘zbekenergo” AJ, GEONET, Intec-Gopa. *O‘zbekiston shamol energetikasi atlasi*. Toshkent, 2015.

68. Vestas Wind Systems. *Wind Turbine Technology Overview*.

69. GE Renewable Energy. *Wind Turbine Technical Documentation*.

70. Quantis. *Lifecycle Assessment of Wind Turbines and Recycling Technologies*.

71. Пашковскаya Е.Е., Сивеев Т.М., Дубина Д.С., Илин С.В. Разработка схемы размещения ветряной энергоустановки на площадке ветроэлектростанции оценка выработки ветроэлектростанции//Современные научные исследования: актуалные вопросы, достижения и инновации– 2021 – С. 83 – 85

72. Проектирование гидроэлектростанции / С.В. Евдокимов [и др.]. — Самара: Самарский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2019. — 87 с.

73. A.Davirov, N.Abdug‘aniyev. MikroGES charxpalagi parraklarining optimal burchagini aniqlash bo‘yicha dastlabki tadqiqotlar // “Qishloq va suv

xo‘jaligining zamonaviy muammolari” XX – yosh olimlar, magistrantlar va iqtidorli talabalarning ilmiy-amaliy anjumani to‘plami, Toshkent, 2021 y., 25-26 may.

74. D.Kodirov, Kh.Muratov, A.Davirov, J.Normuminov, B.Mamadjanov, A.Shukuraliyev, I.Berdiyorova, and Sh.Musayev // Study on the effective use of solar and hydro energy for powering agriculture and water management, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1142 (2023) 012029 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/1142/1/012029

75. Y. Yassi Experimental Study of a High Speed Micro Waterwheel // Iranian Journal of Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 1, March. 2013. Pages: 33-47

76. F.Weichbrodt, S.Dimke, J.Hadler, P.Fröhle Großmaßstäbliche Modellversuche mit einem schwimmenden Energiewandler // 29334. Dresdner Wasserbaukolloquium 2011: Wasserkraft – mehr Wirkungsgrad + mehr Ökologie = mehr Zukunft, Pages:291-299

77. Cleynen, O., Kerikous, E., Hoerner, S., & Thevenin, D. (2017). Influence of flotation bodies on the power characteristics of a free-stream water wheel. Computational and Experimental Methods in Multiphase and Complex Flow IX 55-60.

78. G.Müller, C.Wolter The breastshot water wheel: design and model tests / Proc. ICE Eng. Sustain ability , Vol. 157, Issue E S4, 2004, Pages:203 – 212.

79. Müller, G., & Kauppert, K. (2004). Performance characteristics of water wheels. Journal of Hydraulic Research, 42(5), 451–460

80. Müller, G., Denchfield, S., Marth, R., & Shelmerdine, R. (2007). Stream wheels for applications in shallow and deep water. Proc. 32nd IAHR Congress, Venice C (2c, Paper 291).

81. Khan, F., Ahmed, A., Khan, U., & Haider, F. (2015). Modeling, simulation and fabrication of an undershot floating waterwheel. J. Eng. and Appl. Sci., 34(2), 55–69.

82. D.B.Qodirov Past bosimli suv oqimlari uchun energiya samarador mikrogidroelektrstansiya // Texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori(PhD) avtoreferati. Toshkent 2018. 41 bet

83. D.Qodirov., A.Davirov., R.Qobilov. Kichik gidroelektrstansiyalarni loyihalashtirish// Mashinasozlik ilmiy-texnika jurnali, Andijon, 2022 yil, 1120-1126-bet

84. A.B.Mamadjanov. Gravitatsion girdobli mikrogidroelektr stansiyaning energiya samaradorligini oshirish // Texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori(PhD) ilmiy darajasini olish uchun yozilgan dissertatsiya ishi. Toshkent 2023. 131 bet

85. O.U.Zoxidov. Konchilik korxonalarida muqobil energiya manbalari asosida elektr energiya iste’moli samaradorligini oshirish// Texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori(PhD) ilmiy darajasini olish uchun yozilgan dissertatsiya ishi. Toshkent 2023. 140 bet.

86. Yoosef Doost, A.; Lubitz, W.D. Archimedes screw turbines: A sustainable development solution for green and renewable energy generation-a review of potential and design procedures. Sustainability 2020, 12, 7352.].

87. https://rreda.ru/industry/acquaintance/res-hydro/

88. Scott C. Simmons, Chris Elliott, Mike Ford, Adrian Clayton, William David Lubitz // Archimedes screw generator powerplant assessment and field measurement campaign// Energy for Sustainable Development 65 (2021) 144-161

89. Q.Латипов, С.Эргашев, Гидравлика ва гидромашиналар о‘қув қо‘лланма Тошкент 1986

90. Имомов Ш. Ж., Усмонов К.Э. Биогаз: экологиуа ва органик о‘g‘ит / жамоа. Тошкент, Адабиёт ychqунлари, 2016 – 240 б. Номограмма

91. Sara González-García, Jacopo Bacenetti. Exploring the production of bio-energy from wood biomass. Italian case study. Science of the Total Environment 647 (2019), pp 158–168

92. Eirik Ogner Jastad et al. The role of woody biomass for reduction of fossil GHG emissions in the future North European energy sector. Applied Energy 274 (2020), 115360.

93. NordPool. Historical Market Data. Available at: http://www.nordpoolspot.com/historical-market-data/; 2018.

94. Meisam Mahdavi et al. Hybrid biomass, solar and wind electricity

generation in rural areas of Fez-Meknes region in Morocco considering water consumption of animals and anaerobic digester. Applied Energy 343 (2023) 121253.