



UO'K 621.311.243:621.56

doi.10.70769/2181-284.ME.2(23).2026.9

FARG'ONA VODIYSI SHAROITIDA TARMOQQA ULANGAN SFES ASOSIDA
SANOAT SOVUTISH KORXONASINI ENERGIYA BILAN TA'MINLASH. 1-QISM.
SXEMATIK YECHIMLAR VA EKSPLOATATSION BAHOLASH

Matchanov Nuraddin Azadovich^{1,2}- t.f.d., prof.6

<https://orcid.org/0000-0002-4298-1041> e-mail: sirnornur@mail.ru

Kulmatov Xayrullo Xabibullaevich²- PhD, kat.i.x.,

<https://orcid.org/0009-0008-5504-4875> e-mail: _hayrullo05051986@gmail.com,

Mo'minov Shermuhammad Abdushukur o'g'li² – PhD,

<https://orcid.org/0000-0002-6453-6782> e-mail: muminovshermuhammad@gmail.com

Dexkonova Maxliyoxon Xusniddin qizi³- PhD,

<https://orcid.org/0000-0003-2556-4147> e-mail: dxmaxliyo@gmail.com

Shodiyev Bobur Toyir o'g'li⁴- asisstant

<https://orcid.org/0009-0008-8973-6861> e-mail: boburshodiyev2994@gmail.com

¹I.Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent sh, O'zbekiston

²Farg'ona davlat texnika universiteti, Farg'ona shahar, O'zbekiston

³Energetika vazirligi huzuridagi Qayta tiklanuvchi energiya manbalari milliy ilmiy-tadqiqot instituti, O'zbekiston

⁴“Toshkent irrigatsiya va qishloq xo'jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti” milliy tadqiqot universiteti, Toshkent shahar, O'zbekiston

Annotatsiya. Kirish. Maqolada Farg'ona vodiysi sharoitida 297 kW quvvatli tarmoqqa ulangan fotoelektr stansiya asosida sanoat sovutish korxonasini energiya bilan ta'minlash sxemasi ko'rib chiqilgan. Tadqiqot tashqi tarmoqdan olinadigan elektr energiyasini kamaytirish, sovutish yuklamalarining ishonchliligini saqlash va elektr energiyasi sifati talablariga rioya etishga qaratilgan. Hisoblashlar natijasida yillik generatsiya 445 MWh, solishtirma ishlab chiqarish 1498 kWh/kW-yil, quvvatdan foydalanish koeffitsiyenti 17,1 % hamda yuklamani qoplash ulushi 23,4 % ekani aniqlandi.

Usul va materiallar. Tadqiqot obyekti sifatida Farg'ona viloyati Oltiariq tumanidagi sanoat sovutish korxonasi tanlandi. Tizim tarkibida 540 ta 550 W PV-modul, 3 ta 100 kW invertor, 0,4/10 kV 1000 kVA transformator, himoya vositalari va SCADA/ASU TP tizimi ko'rib chiqildi. Baholash integral va balans usullari asosida amalga oshirildi.

Natijalar. Yillik generatsiya 445 MWh, o'rtacha ekvivalent quvvat 50,8 kW ni tashkil etdi. Korxonaning 1,9 GWh yillik iste'moli fonida quyosh generatsiyasi hisobiga qoplanish ulushi 23,4 % bo'ldi. Umumiy energetik trakt samaradorligi 93 %, yo'qotishlar esa taxminan 7 % deb baholandi.

Xulosa. 297 kW quvvatli tarmoqqa ulangan SFESni sanoat sovutish korxonasining energiya ta'minoti tizimiga integratsiya qilish texnik va energetik jihatdan maqsadga muvofiqdir. Taklif etilgan yechim tashqi tarmoqdan quvvat olishni kamaytiradi, kritik sovutish yuklamalarining ishonchli ishlashini ta'minlaydi va kelgusida tizimni yanada takomillashtirish uchun asos yaratadi.

Kalit so'zlar: tarmoqqa ulangan fotoelektr stansiya, sanoat sovutish majmuasi, energiya samaradorligi, elektr energiyasi sifati, THD, SCADA/ASU TP, yuklamalarni ustuvorlashtirish, Farg'ona vodiysi.

Дата поступления: 12.05.2026. После обработки: 10.06.2026 Принято печать: 22.06.2026

For citation: Matchanov N.A., Kulmatov Kh.Kh., Muminov SH.A., Dekhkonova M.Kh., Shodiev B.T. Power supply of an industrial refrigeration enterprise based on a grid-connected photovoltaic power plant (Fergana valley). Part 1. Schematic solutions and operational assessment. Alternative energy. 2026. 2(23). pp. 101-111. (In Rus)



УДК 621.311.243:621.56

ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ХОЛОДИЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ СЕТЕВОЙ СФЭС (ФЕРГАНСКАЯ ДОЛИНА). ЧАСТЬ 1. СХЕМАТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ОЦЕНКА

Матчанов Нураддин Азадович^{1,2} - д.т.н., проф.,
<https://orcid.org/0000-0002-4298-1041> e-mail: sirnornur@mail.ru

Кулматов Хайрулло Хабибуллаевич² - PhD, с.н.с.,
<https://orcid.org/0009-0008-5504-4875> e-mail: hayrullo05051986@gmail.com

Муминов Шермухаммад Абдушукур угли² – PhD,
<https://orcid.org/0000-0002-6453-6782> e-mail: muminovshermuhammad@gmail.com

Дехконова Махлиёхон Хусниддин кизи³ - PhD,
<https://orcid.org/0000-0003-2556-4147> e-mail: dxmaxliyo@gmail.com

Шодиев Бобур Тойир угли⁴ - asisstant,
<https://orcid.org/0009-0008-8973-6861> e-mail: boburshodiyev2994@gmail.com

¹Ташкентский государственный технический университет имени И. Каримова, г. Ташкент, Узбекистан

²Ферганский государственный технический университет, г. Фергана, Узбекистан

³Национальный научно-исследовательский институт возобновляемых источников энергии при Министерстве энергетики, г. Ташкент, Узбекистан

⁴Национальный исследовательский университет «ТИИИМСХ», г. Ташкент, Узбекистан

Аннотация. Введение. В статье рассмотрена схема энергоснабжения промышленного холодильного предприятия в условиях Ферганской долины на основе сетевой фотоэлектрической станции мощностью 297 кВт. Исследование направлено на снижение объёма электроэнергии, потребляемой из внешней сети, обеспечение надёжного питания холодильных нагрузок и соблюдение требований к качеству электроэнергии. По результатам расчётов установлено, что годовая генерация составляет 445 МВт·ч, удельная выработка - 1498 кВт·ч/кВт·год, коэффициент использования установленной мощности - 17,1 %, а доля покрытия нагрузки - 23,4 %.

Методы и материалы. В качестве объекта исследования выбрано промышленное холодильное предприятие, расположенное в Олтиарыкском районе Ферганской области. В состав системы вошли 540 PV-модулей мощностью 550 Вт, 3 инвертора по 100 кВт, трансформатор 0,4/10 кВ мощностью 1000 кВА, защитные устройства и система SCADA/ASU TP. Оценка выполнена на основе интегральных и балансовых методов.

Результаты. Годовая генерация составила 445 МВт·ч, а средняя эквивалентная мощность - 50,8 кВт. При годовом электропотреблении предприятия 1,9 ГВт·ч доля покрытия за счёт солнечной генерации достигла 23,4 %. Общая эффективность энергетического тракта оценена на уровне 93 %, а потери - около 7 %.

Заключение. Интеграция сетевой СФЭС мощностью 297 кВт в систему энергоснабжения промышленного холодильного предприятия является технически и энергетически целесообразной. Предложенное решение снижает потребление энергии из внешней сети, обеспечивает надёжное питание критических холодильных нагрузок и создаёт основу для дальнейшего совершенствования системы.

Ключевые слова: сетевая фотоэлектрическая станция, промышленный холодильный комплекс, энергоэффективность, качество электроэнергии, THD, приоритизация нагрузок, SCADA/АСУ ТП, Ферганская долина.



UDC 621.311.243:621.56

POWER SUPPLY OF AN INDUSTRIAL REFRIGERATION ENTERPRISE BASED ON A GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC POWER PLANT (FERGANA VALLEY). PART**1. SCHEMATIC SOLUTIONS AND OPERATIONAL ASSESSMENT****Matchanov Nuraddin Azadovich**^{1,2}- Doctor of Technical Sciences, Professor,<https://orcid.org/0000-0002-4298-1041> e-mail: sirnornur@mail.ru**Kulmatov Khayrullo Khabibullaevich**²- PhD, Senior Researcher,<https://orcid.org/0009-0008-5504-4875> e-mail: hayrullo05051986@gmail.com,**Muminov Shermuhammad Abdushukur ugli**² – PhD,<https://orcid.org/0000-0002-6453-6782> e-mail: muminovshermuhammad@gmail.com**Dekhkonova Makhliyokhon Khusniddin qizi**³- PhD,<https://orcid.org/0000-0003-2556-4147> e-mail: dxmaxliyo@gmail.com**Shodiev Bobur Toir ugli**⁴- asisstant,<https://orcid.org/0009-0008-8973-6861> e-mail: boburshodiyev2994@gmail.com¹Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan²Fergana State Technical University, Fergana, Uzbekistan³ National Research Institute of Renewable Energy Sources under the Ministry of Energy, Tashkent, Uzbekistan⁴National Research University “Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers”, Tashkent, Uzbekistan

Abstract. Introduction. The paper considers a power supply scheme for an industrial refrigeration enterprise in the Fergana Valley based on a 297kW grid-connected photovoltaic power plant. The study is aimed at reducing electricity consumption from the external grid, ensuring reliable supply of refrigeration loads, and meeting power quality requirements. The calculations show that the annual generation is 445MWh, the specific yield is 1498kWh/kW-year, the capacity factor is 17.1%, and the load coverage share reaches 23.4%

Methods and materials. The research object is an industrial refrigeration enterprise located in the Oltiariq district of the Fergana region. The system includes 540 PV modules rated at 550 W, three 100 kW inverters, a 0.4/10 kV 1000 kVA transformer, protection devices, and a SCADA/ASU TP monitoring system. The assessment was carried out using integral and balance-based methods.

Results. The annual generation amounted to 445MWh, while the average equivalent power reached 50.8 kW. Against the enterprise's annual electricity consumption of 1.9 GWh, the solar generation coverage share reached 23.4%. The overall efficiency of the energy conversion chain was estimated at 93%, while losses were about 7%.

Conclusion. The integration of a 297kW grid-connected photovoltaic power plant into the energy supply system of an industrial refrigeration enterprise is technically and energetically feasible. The proposed solution reduces electricity intake from the external grid, ensures reliable operation of critical refrigeration loads, and provides a basis for further system improvement.

Keywords: grid-connected photovoltaic power plant, industrial refrigeration complex, energy efficiency, power quality, THD, load prioritization, SCADA/ASU TP, Fergana Valley.

Введение

Повышение энергоэффективности промышленных предприятий всё чаще связывается с интеграцией распределённых возобновляемых источников энергии, прежде всего сетевых солнечных фотоэлектрических станций. Для промышленных объектов наиболее практичны не автономные, а сетевые конфигурации, в которых генерация СФЭС согласуется с графиком технологического потребления, параметрами внешней сети и алгоритмами управления мощностью [1, 2].



Особую группу составляют предприятия с холодильными нагрузками: компрессорные агрегаты и воздухоохладители имеют длительный режим работы, выраженные пусковые токи и повышенные требования к надёжности питания. Совмещение дневного профиля солнечной генерации с тепловыми и холодильными нагрузками позволяет уменьшить сетевой отбор, но требует проверки электротехнической совместимости оборудования, качества электроэнергии и устойчивости параллельной работы [3, 4].

При подключении СФЭС к промышленной сети должны выполняться требования к интерфейсу присоединения, допустимым отклонениям напряжения и частоты, коэффициенту мощности, гармоническим искажениям и антиостровной защите [5-7]. Дополнительный эффект обеспечивают цифровой мониторинг, SCADA-ориентированное управление и приоритизация критических потребителей, что соответствует логике Smart Energy Systems и промышленного энергетического менеджмента [8-10].

Цель настоящей работы - разработать и обосновать принципиальную и функциональную схему энергоснабжения промышленного холодильного предприятия с сетевой СФЭС мощностью 297 кВт для условий Ферганской долины. Для достижения цели решались следующие задачи: согласование PV-массива, инверторов, шин 0,4 кВ и трансформатора 0,4/10 кВ; оценка энергетического баланса и потерь; формирование алгоритмов приоритизации нагрузок; определение требований к защитах, антиостровной автоматике и SCADA/АСУ ТП.

Методы и материалы

Объект исследования и исходные условия. Рассматриваемый объект расположен в Олтиарикском районе Ферганской области и относится к агропромышленным предприятиям с преобладанием холодильных нагрузок. Для региона характерны высокая летняя температура, выраженная сезонность солнечной радиации и значительный потенциал фотоэлектрической генерации, что делает дневное использование СФЭС особенно актуальным для холодильных предприятий [11-13].

В состав локальных нагрузок входят промышленный холодильный комплекс, воздухоохладители, административное здание, освещение, вспомогательные электроприёмники и зарядное устройство. Холодильный комплекс является критическим потребителем и должен получать питание непрерывно; остальные нагрузки допускают частичное ограничение или перенос во времени. Такой профиль потребления типичен для холодильных хозяйств, где надёжность питания компрессорных и вентиляционных установок прямо влияет на сохранность продукции [14].

СФЭС имеет установленную DC-мощность 297 кВт и работает параллельно с внешней сетью через узел 0,4 кВ и трансформатор 0,4/10 кВ. Электрическая сеть в данной схеме является буфером: при дефиците солнечной генерации она покрывает недостающую мощность, а при избытке - принимает экспорт, если это разрешено условиями присоединения.

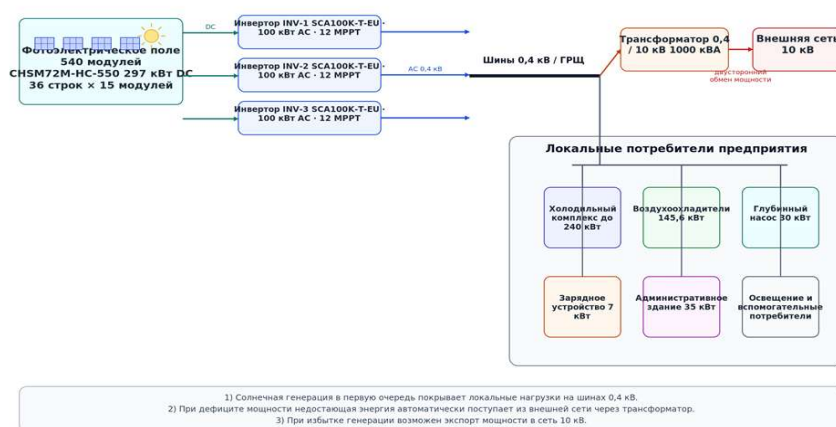


Рис. 1. Принципиальная схема энергоснабжения промышленного объекта с сетевой СФЭС 297 кВт.

Схематическое решение и состав оборудования. Фотоэлектрическая часть станции включает 540 монокристаллических модулей CHSM72M-NC-550 номинальной мощностью 550 Вт. Суммарная установленная мощность составляет 297 кВт DC. При объединении по 15 модулей в последовательную строку формируется 36 строк, которые распределяются между тремя стринговыми инверторами по 12 строк на каждый инвертор. Такая конфигурация устраняет противоречие между числом модулей и числом входов: часть MPPT-каналов инвертора используется с двумя параллельными строками при соблюдении допустимых токов и напряжений [15, 16].

Инверторная часть выполнена на трёх сетевых инверторах SUN2000-100KTL-M2 мощностью по 100 кВт. Инверторы преобразуют постоянный ток PV-массива в трёхфазный переменный ток 0,4 кВ, синхронизируются с сетью, поддерживают коэффициент мощности, контролируют параметры качества электроэнергии и отключаются при исчезновении внешней сети. Соотношение DC/AC для станции составляет $297/300 = 0,99$, что исключает значительное ограничение мощности по стороне AC и соответствует расчётной логике промышленной сетевой СФЭС.

Для связи с распределительной сетью применяется трансформатор 0,4/10 кВ мощностью 1000 кВА. Его мощность превышает номинальную мощность инверторов, что обеспечивает резерв для пусковых токов холодильного оборудования, питания локальных нагрузок и возможного двустороннего перетока. На стороне 0,4 кВ предусматриваются ГРЩ, автоматические выключатели, устройства защиты от перенапряжений, коммерческий/технический учёт и каналы связи со SCADA/АСУ ТП.

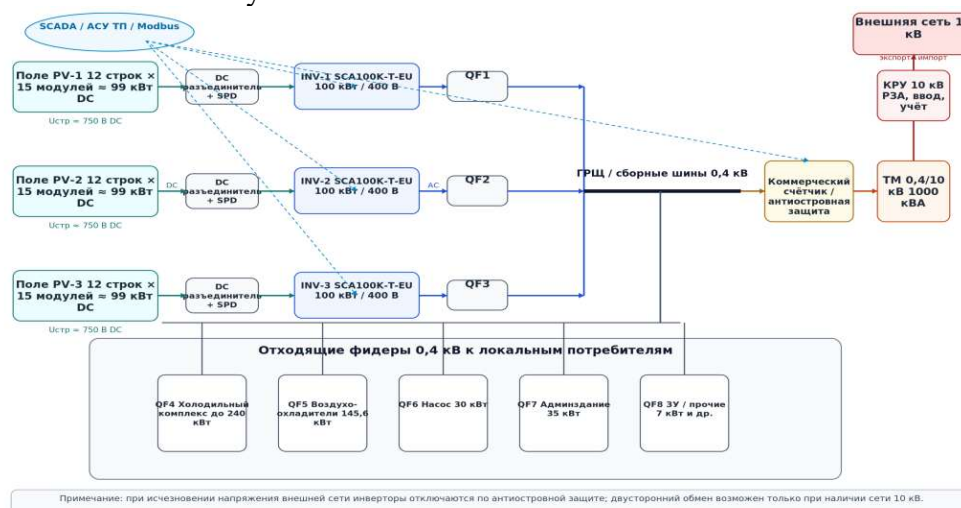


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема СФЭС 297 кВт и узла присоединения 0,4/10 кВ.

Таблица 1.

Конфигурация СФЭС и основные нагрузки объекта

Элемент системы	Принятое значение	Эксплуатационное назначение
PV-модули	540×550 Вт = 297 кВт DC	Основной источник дневной генерации
Строки PV-массива	36 строк по 15 модулей	Согласование напряжения и MPPT-диапазона
Инверторы	3×100 кВт, 0,4 кВ AC	Преобразование DC/AC и синхронизация с сетью
Трансформатор	0,4/10 кВ, 1000 кВА	Связь с внешней сетью и резерв по мощности



Элемент системы	Принятое значение	Эксплуатационное назначение
Промышленный холодильник	до 240 кВт	Критическая непрерывная нагрузка
Воздухоохладители	до 145,6 кВт	Высокий приоритет, сезонная нагрузка
Административное здание	до 35 кВт	Дневная нагрузка среднего приоритета
Зарядное устройство	7 кВт	Переносимая нагрузка низкого приоритета

Функциональная логика работы. В нормальном дневном режиме PV-массив генерирует электроэнергию, инверторы выдают активную мощность на шины 0,4 кВ, а локальные потребители используют солнечную энергию в приоритетном порядке. В первую очередь покрываются холодильный комплекс и связанные с ним воздухоохладители. Если генерация меньше текущей нагрузки, дефицит автоматически покрывается из внешней сети. Если генерация превышает потребление, избыток направляется в сеть при наличии разрешённого режима экспорта.

В ночные часы и при недостаточной освещённости инверторы прекращают генерацию, а холодильное предприятие питается от внешней сети через трансформатор 10/0,4 кВ. При исчезновении напряжения внешней сети инверторы отключаются антиостровной защитой и не формируют автономный остров, если отдельно не предусмотрены накопитель энергии и соответствующая система резервирования.

SCADA/АСУ ТП должна регистрировать мгновенную мощность СФЭС, нагрузку предприятия, обменную мощность с сетью, напряжения, токи, $\cos \phi$, ТНД, состояния выключателей и аварийные события. На основе этих данных реализуется логика управления: критические холодильные нагрузки сохраняют питание, а переносимые потребители временно ограничиваются при дефиците мощности или неблагоприятном качестве напряжения.

Таблица 2.

Режимы работы и логика управления нагрузками

Режим	Условие	Действие системы	Приоритет
Дневной баланс	$P_{PV} \leq P_{load}$	Вся генерация потребляется локально	Холодильник, воздухоохладители
Избыток генерации	$P_{PV} > P_{load}$	Экспорт в сеть или включение переносимых нагрузок	Зарядка, вспомогательные потребители
Дефицит генерации	$P_{PV} < P_{load}$	Импорт недостающей мощности из сети	Критические нагрузки без ограничения
Авария сети	U/f вне допуска	Отключение инверторов антиостровной защитой	Переход на резерв при наличии

Методика расчёта энергетических показателей. Расчёт энергетической эффективности СФЭС выполняется по интегральным и балансовым показателям, применяемым при мониторинге сетевых фотоэлектрических систем [17-19]. Годовая генерация определяется интегрированием мгновенной мощности или через удельную выработку:

$$E_{PV,year} = \sum_{t=1}^N P_{PV}(t) \Delta t \quad (1)$$

$$E_{PV,year} = P_{inst} Y_{sp} \quad (2)$$



где $E_{PV,year}$ - годовая выработка СФЭС, кВт·ч/год; $P_{PV}(t)$ - мгновенная мощность станции, кВт; Δt - расчётный шаг, ч; P_{inst} - установленная мощность станции, кВт; Y_{sp} - удельная выработка, кВт·ч/кВт·год.

Удельная выработка, коэффициент использования установленной мощности и средняя эквивалентная мощность определяются по выражениям:

$$Y_{sp} = \frac{E_{PV,year}}{P_{inst}} \quad (3)$$

$$CF = \frac{E_{PV,year}}{P_{inst} \cdot 8760} \quad (4)$$

$$P_{avg} = \frac{E_{PV,year}}{8760} \quad (5)$$

Баланс мощности в узле 0,4 кВ описывает обмен с внешней сетью и объём собственного потребления солнечной генерации:

$$P_{grid}(t) = P_{load}(t) - P_{PV}(t) \quad (6)$$

$$P_{self}(t) = \min(P_{PV}(t), P_{load}(t)) \quad (7)$$

$$E_{PV} = E_{self} + E_{export} \quad (8)$$

$$E_{load} = E_{self} + E_{import} \quad (9)$$

$$K_{cov} = \frac{E_{self}}{E_{load}} \cdot 100\% \quad (10)$$

Для оценки токовых нагрузок и потерь в сети 0,4 кВ используются классические электротехнические зависимости:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} \quad (11)$$

$$\Delta P_{line} = 3I^2 R \quad (12)$$

$$\Delta U = \sqrt{3} I (R \cos \varphi + X \sin \varphi) \quad (13)$$

Суммарная эффективность энергетического тракта и температурное снижение мощности PV-модулей определяются как:

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{inv} \eta_{DC} \eta_{AC} \eta_{tr} \quad (14)$$

$$P_{m,T} = P_{m,STC} [1 + \gamma (T_c - 25)] \quad (15)$$

$$R_{DC/AC} = \frac{P_{DC,inst}}{P_{AC,nom}} \quad (16)$$

где I - линейный ток, А; U - линейное напряжение, кВ; R и X - активное и реактивное сопротивления линии; η_{inv} , η_{DC} , η_{AC} , η_{tr} - КПД инверторов, DC-цепей, AC-сети и трансформатора; γ - температурный коэффициент мощности PV-модуля; T_c - температура солнечного элемента.

Результаты расчётной оценки и обсуждение

По расчётным данным и результатам моделирования годовая генерация СФЭС составляет около 445 МВт·ч. При установленной мощности 297 кВт это соответствует удельной выработке 1498 кВт·ч/кВт·год, коэффициенту использования установленной мощности 17,1 % и средней эквивалентной мощности около 50,8 кВт. Для промышленной станции, работающей без накопителя и ориентированной на дневное покрытие холодильных нагрузок, такие показатели согласуются с методикой оценки производительности сетевых PV-систем [20].

При принятом годовом электропотреблении предприятия 1,9 ГВт·ч расчётная доля покрытия нагрузки за счёт собственной солнечной генерации составляет 23,4 %. В летние месяцы, когда солнечная радиация и холодильная нагрузка возрастают одновременно, месячная доля покрытия может быть выше среднегодовой. Это подтверждает целесообразность размещения СФЭС непосредственно в узле питания холодильного комплекса.

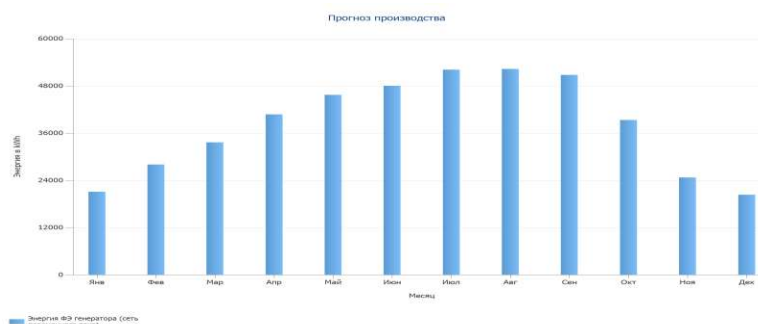


Рис. 3. Расчётное распределение годовой генерации сетевой СФЭС мощностью 297 кВт.

Потери в инверторах при полной загрузке составляют около 2 %, то есть примерно 6 кВт суммарно для трёх инверторов. С учётом потерь в DC-цепях, AC-кабелях и трансформаторе общий КПД энергетического тракта «PV-массив - инвертор - трансформатор - нагрузка/сеть» оценивается на уровне 93 %, а технологические потери -около 7 %. Наличие трансформатора 1000 кВА обеспечивает достаточный резерв для пусковых токов холодильного оборудования и параллельной работы с внешней сетью.

Таблица 3.

Основные расчётные показатели СФЭС

Показатель	Значение	Комментарий
Установленная мощность PV-массива	297 кВт DC	540 модулей по 550 Вт
Номинальная мощность инверторов	300 кВт AC	3×100 кВт
DC/AC ratio	0,99	Ограничение мощности минимально
Годовая генерация	445 МВт·ч/год	Расчётная оценка/PVsyst
Удельная выработка	1498 кВт·ч/кВт·год	По формуле (3)
Коэффициент использования мощности	17,1 %	По формуле (4)
Средняя эквивалентная мощность	50,8 кВт	По формуле (5)
Годовое электропотребление объекта	1,9 ГВт·ч	Расчётное допущение
Покрывание годовой нагрузки	23,4 %	По формуле (10)
Суммарные потери тракта	около 7 %	Инверторы, DC/AC-цепи, трансформатор

Эксплуатационная устойчивость схемы определяется не только энергетическими показателями, но и качеством управления. Для холодильного предприятия важно, чтобы алгоритмы не допускали отключения критических нагрузок при кратковременных колебаниях генерации. Поэтому логика управления должна использовать прогноз солнечной мощности, текущую температуру камер, состояние компрессоров, ограничения по пусковым токам и доступность внешней сети.

Предложенная схема не является автономной: без накопителя энергии и сетевого формирователя напряжения СФЭС не может питать предприятие при полном исчезновении внешней сети. Однако в сетевом режиме она существенно уменьшает дневной сетевой отбор, снижает нагрузку на трансформатор в часы генерации и создаёт основу для дальнейшего развития конфигурации «СФЭС + накопитель + интеллектуальное управление нагрузкой».

Подтверждение объекта и особенности технологии охлаждения. Промышленный объект, рассматриваемый в работе, представляет собой действующий холодильный комплекс, размещённый на отдельной производственной площадке в Ферганской области. На территории объекта расположены складские корпуса, холодильные камеры, инженерная



инфраструктура и наземное поле фотоэлектрических модулей. Такое размещение позволяет сократить длину внутренних линий 0,4 кВ, упростить эксплуатационный доступ к оборудованию и увязать солнечную генерацию с дневным профилем технологической нагрузки. Общий вид объекта и фотоэлектрического поля показан на рис. 4.



Рис. 4. Визуальное подтверждение объекта исследования: общий вид холодильного комплекса и размещённого рядом поля фотоэлектрических модулей.

Технология охлаждения предприятия основана на компрессионном холодильном цикле с распределённой системой воздух охлаждения. Основную холодильную нагрузку формируют компрессорное оборудование, циркуляционные насосы и воздухоохладители, установленные в камерах хранения. Воздухоохладитель обеспечивает теплообмен между хладагентом и циркулирующим воздухом, поддерживая требуемую температуру и равномерность микроклимата в камерах. Для хранения плодоовощной продукции характерен длительный и практически непрерывный режим работы, поэтому соответствующая электрическая нагрузка относится к критическим и должна иметь приоритетное питание [3,14].



Рис. 5. Элементы технологии охлаждения: воздухоохладитель и внутренний объём холодильного коридора.

С точки зрения режимов работы энергосистема предприятия функционирует в трёх основных состояниях. В дневном режиме при наличии солнечной генерации и внешней сети приоритетно покрываются холодильный комплекс, воздухоохладители и насосы; при дефиците мощности недостающая энергия автоматически добирается из внешней сети. В переходном режиме (утро/вечер, переменная облачность) управление инверторами и SCADA/АСУ ТП обеспечивает устойчивое перераспределение мощности без нарушения питания критических потребителей. В ночном режиме питание полностью осуществляется от сети 10/0,4 кВ, тогда как при исчезновении внешнего напряжения инверторы отключаются по антиостровной защите. Указанные сценарии согласуются с логикой, представленной на рис. 2 и в табл. 2.

Дополнительно следует отметить, что наземное размещение фотоэлектрического поля и близость узла трансформации создают удобную для эксплуатации конфигурацию: визуальный контроль модулей, короткие кабельные трассы до ГРЩ 0,4 кВ и возможность централизованного обслуживания инверторов и коммутационной аппаратуры. Для промышленного холодильного предприятия это особенно важно, поскольку отказ на стороне присоединения может привести не только к энергетическим потерям, но и к риску нарушения температурного режима хранения продукции.



Рис. 6. Планировочное размещение фотоэлектрического поля и внешний вид узла трансформаторного присоединения.

Таким образом, добавленные визуальные материалы подтверждают реальность рассматриваемого объекта, а описание технологической цепочки охлаждения позволяет увязать электрическую схему СФЭС с фактическим профилем холодильной нагрузки. Для журнальной версии это важно, поскольку показывает не абстрактную фотоэлектрическую установку, а действующий промышленный комплекс с конкретной технологией хранения и охлаждения продукции.

Выводы

Обоснована возможность интеграции сетевой СФЭС мощностью 297 кВт в систему энергоснабжения промышленного холодильного предприятия с подключением к шинам 0,4 кВ и внешней сети через трансформатор 0,4/10 кВ мощностью 1000 кВА. Исправленная конфигурация PV-массива включает 36 строк по 15 модулей, распределённых между тремя инверторами по 100 кВт.

Расчётные показатели подтверждают энергетическую эффективность решения: годовая генерация составляет около 445 МВт·ч, удельная выработка - 1498 кВт·ч/кВт·год, коэффициент использования установленной мощности - 17,1 %, а покрытие годового электропотребления предприятия - 23,4 %.

Суммарный КПД энергетического тракта оценивается на уровне 93 %, что соответствует потерям около 7 %. При полной генерации потери в инверторах составляют около 6 кВт суммарно, а резерв трансформатора обеспечивает устойчивость при пусковых токах холодильного оборудования.

При корректной настройке инверторов, антиостровной автоматики, защит и SCADA/АСУ ТП предложенная схема обеспечивает приоритетное питание холодильных нагрузок в дневные часы и устойчивую параллельную работу с сетью. Дальнейшее развитие работы целесообразно направить на оценку накопителя энергии, Volt/VAR-регулирования и технико-экономической оптимизации для группы холодильных хозяйств Ферганской долины.

Использованная литература

- [1]. Ахметов Р.М., Салахов А.Р. Повышение энергоэффективности промышленных предприятий с интеграцией сетевых солнечных электростанций // Энергетика и электротехника. – 2021. – Т. 12. – № 3. – С. 45–52.
- [2]. Кожевников В.В., Кузнецов И.А. Оптимизация режимов работы фотоэлектрических установок в гибридных энергосистемах // Вестник энергетика. – 2020. – Т. 8. – № 2. – С. 33–41.
- [3]. Belyaev A., Ivanova T. Integration of photovoltaic systems with industrial refrigeration loads: control strategies and power quality issues // Journal of Renewable and Sustainable Energy. – 2022. – Vol. 14. – No. 6. – Art. 062302.
- [4]. Махмудов Ш.Х., Ходжаев А.А. Моделирование работы сетевых фотоэлектрических станций в условиях Ферганской долины // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2023. – № 2(98). – С. 17–25.



- [5]. IEC 61727:2015. Photovoltaic (PV) Systems – Characteristics of the Utility Interface. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2015.
- [6]. IEEE Std 1547-2018. Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. – New York: IEEE Power & Energy Society, 2018.
- [7]. Гафуров Б.Р., Турсунов Ф.Н. Исследование параметров качества электроэнергии при работе фотоэлектрических инверторов // Вестник Ташкентского государственного технического университета. – 2022. – Т. 5. – № 4. – С. 72–80.
- [8]. Ahmed N., Patel M. Energy management algorithms for PV integrated industrial microgrids using SCADA systems // Renewable Energy and Power Quality Journal. – 2021. – Vol. 19. – No. 1. – P. 185–192.
- [9]. Мирахмедов И.Ш., Юсупов Х.Х. Интеллектуальное управление нагрузками промышленных объектов на основе приоритизации и прогнозирования генерации СЭС // Энергетические системы и управление. – 2023. – Т. 11. – № 1. – С. 59–68.
- [10]. Lund H., Østergaard P.A., Connolly D. et al. Smart Energy Systems and the Transition to 100% Renewable Energy Systems // Energy. – 2017. – Vol. 137. – P. 554–565.
- [11]. Hydrometeorological Service of Uzbekistan. Climatic Data Summary 2005–2024. – Tashkent: Uzhydromet, 2024.
- [12]. SolarGIS Database. Global Solar Atlas for Uzbekistan. – Bratislava: SolarGIS, 2024.
- [13]. Avezova N.R., Rakhimov E.Yu., Frid S.E. et al. Assessment of the Technical Potential of Photovoltaic Convertors: The Case of the Fergana Valley. Part I: Dynamics of Climate Data Changes in the Region // Applied Solar Energy. – 2022. – Vol. 58. – P. 697–707.
- [14]. Рыбаков И.П., Никифоров С.А. Энергопотребление и управление холодильными нагрузками на промышленных предприятиях // Известия вузов. Электромеханика. – 2021. – Т. 64. – № 3. – С. 42–49.
- [15]. Astronergy. CHSM72M-HC Monofacial Series (182), 540–555 W. Technical Datasheet. – 2024.
- [16]. Huawei. SUN2000-100KTL-M2 SmartPV Controller Three-Phase String Inverter. Technical Datasheet. – 2024.
- [17]. IEC 61724-1:2021. Photovoltaic System Performance – Part 1: Monitoring. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2021.
- [18]. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Solar PV AC-DC Translation. Annual Technology Baseline (ATB). – Golden, CO: NREL.
- [19]. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS). A Methodology for the Analysis of PV Self-Consumption Policies. – Paris: IEA PVPS, 2016.
- [20]. U.S. Department of Energy, National Renewable Energy Laboratory (NREL). Understanding Solar Photovoltaic System Performance: An Assessment of 75 Federal Photovoltaic Systems. – Golden, CO: NREL, 2022.