



FARG‘ONA VODIYSI SHAROITIDA SANOAT SOVITISH KORXONASINI QFES, LiFePO₄ BESS VA BOSHQARILADIGAN SOVITISH YUKLAMASI ASOSIDA ENERGIYA BILAN TA‘MINLASH. 2-QISM. REJIM-PARAMETRIK VA TEXNIK-IQTISODIY OPTIMALLASHTIRISH

Mirzabaev Akram Maxkamovich¹ - t.f.d., prof.,

<https://orcid.org/0000-0002-5223-7160> e-mail: mirzabaev.akram@gmail.ru

Matchanov Nuraddin Azadovich^{2,3} - t.f.d., prof.,

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

Kulmatov Xayrullo Xabibullaevich³ - PhD, kat.i.x.,

<https://orcid.org/0009-0008-5504-4875> e-mail: hayrullo05051986@gmail.com,

Mo‘minov Shermuhammad Abdushukur o‘g‘li³ – PhD,

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

Dexkonova Maxliyoxon Xusniddin qizi⁴ - PhD,

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

Shodiyev Bobur Toyir o‘g‘li¹ - asisstant,

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

¹Toshkent irrigatsiya va qishloq xo‘jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti“ milliy tadqiqot universiteti, Toshkent sh., O‘zbekiston

²I.Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent sh., O‘zbekiston

³Farg‘ona davlat texnika universiteti, Farg‘ona sh., O‘zbekiston

⁴Energetika vazirligi huzuridagi Qayta tiklanuvchi energiya manbalari milliy ilmiy-tadqiqot instituti, Toshkent sh., O‘zbekiston

Annotatsiya. Kirish. Maqolada sanoat sovitish korxonasini 297 kVt quvvatli tarmoqqa ulangan quyosh fotoelektr stansiyasi, LiFePO₄ energiya saqlash tizimi va SCADA/MPC asosidagi boshqariladigan sovitish yuklamasi orqali energiya bilan ta‘minlashni optimallashtirish masalasi o‘rganilgan. Tadqiqotning asosiy yondashuvi QFES, BESS va sovitish kameralarini yagona energetik-texnologik tizim sifatida ko‘rib chiqishga asoslangan.

Usul va materiallar. Tadqiqot hisoblash-imitatsion modellashtirish asosida bajarildi. S0–S4 senariylari taqqoslandi: faqat tarmoq, QFES, QFES+BESS, QFES+MPC va QFES+BESS+MPC. Modelda 297 kVt QFES, 400–650 kVt-soat LiFePO₄ BESS, BESS zaryad holati, kameralar termik inersiyasi, olma saqlashning harorat-namlik cheklovlari va kompressorlarning ekspluatatsion cheklovlari inobatga olindi.

Natijalar. Integratsiyalashgan S4 senariysida quyosh energiyasidan mahalliy foydalanish 419,9 MVt-soat/yilga yetdi, tarmoqdan import esa 968,2 MVt-soat/yilgacha kamaydi. S1 senariysi bilan solishtirganda import 94,4 MVt-soat/yilga kamayib, 1000 so‘m/kVt-soat tarifda taxminan 94,4 mln so‘m/yil iqtisodiy samara berdi. Shuningdek, kechki soatlarda tarmoqdan import kamayishi va kompressorlarning shartli ishga tushishlari sonining pasayishi aniqlandi.

Xulosa. QFES, LiFePO₄ BESS va SCADA/MPC boshqaruvini birgalikda qo‘llash sovitish kompleksining energiya samaradorligi va ishonchliligini oshiradi. Tadqiq qilingan obyekt uchun 500 kVt-soat / 200 kVt BESS texnik jihatdan maqbul yechim hisoblanadi, uning samaradorligi nafaqat elektr energiyasini tejash, balki zaxiralash, pik yuklamalarni cheklash va mahsulot saqlash xavflarini kamaytirish bilan ham belgilanadi.

Kalit so‘zlar: tarmoqqa ulangan quyosh fotoelektr stansiyasi; sanoat sovitish kompleksi; LiFePO₄ akkumulyatorli energiya saqlash tizimi; boshqariladigan sovitish yuklamasi; SCADA/MPC; termik inersiya; texnik-iqtisodiy optimallashtirish; Farg‘ona vodiysi.

Дата поступления: 15.07.2026. После обработки: 16.07.2026 Принято печать: 23.09.2026



For citation: Mirzabaev A.M., 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. *Muqobil energetika*. 2026. 3(24). pp. 9-27.

УДК 621.311.243:621.56

ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ХОЛОДИЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ СЕТЕВОЙ СФЭС В УСЛОВИЯХ ФЕРГАНСКОЙ ДОЛИНЫ. ЧАСТЬ 2. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНФИГУРАЦИИ «СФЭС + LiFePO₄ BESS + УПРАВЛЯЕМАЯ ХОЛОДИЛЬНАЯ НАГРУЗКА»

Мирзабаев Акрам Махкамович¹- д.т.н., проф.,
<https://orcid.org/0000-0002-5223-7160> e-mail: mirzabaev.akram@gmail.ru
Матчанов Нураддин Азадович^{2,3}- д.т.н., проф.,
<https://orcid.org/0000-0002-4298-1041> e-mail: sirnornur@mail.ru
Кулматов Хайрулло Хабибуллаевич³- PhD, с.н.с.,
<https://orcid.org/0009-0008-5504-4875> e-mail: hayrullo05051986@gmail.com,
Муминов Шермухаммад Абдушукур угли³ – PhD,
<https://orcid.org/0000-0002-6453-6782> e-mail: muminovshermuhammad@gmail.com
Дехконова Махлиёхон Хусниддин кизи⁴- PhD,
<https://orcid.org/0000-0003-2556-4147> e-mail: dxmaxliyo@gmail.com
Шодиев Бобур Тойир угли¹- ассистент,
<https://orcid.org/0009-0008-8973-6861> e-mail: boburshodiyev2994@gmail.com

¹Национальный исследовательский университет «ТИИИМСХ», г. Ташкент, Узбекистан

²Ташкентский государственный технический университет имени И. Каримова,
г. Ташкент, Узбекистан

³Ферганский государственный технический университет, г. Фергана, Узбекистан

⁴Национальный научно-исследовательский институт возобновляемых источников энергии
при Министерстве энергетики, г. Ташкент, Узбекистан

Аннотация. Введение. В статье рассматривается развитие ранее обоснованной схемы энергоснабжения промышленного холодильного предприятия с сетевой СФЭС мощностью 297 кВт за счёт интеграции накопителя LiFePO₄ и прогнозного SCADA/MPC-управления холодильной нагрузкой. Предложенный подход основан на совместном рассмотрении СФЭС, внешней сети, накопителя и холодильных камер как единой энергетико-технологической системы.

Методы и материалы. Исследование выполнено методом расчётно-имитационного моделирования. Сравнивались сценарии S0–S4: сеть, СФЭС, СФЭС+BESS, СФЭС+MPC и СФЭС+BESS+MPC. В расчётах использованы параметры СФЭС 297 кВт, накопителя 400–650 кВт·ч, холодильной нагрузки промышленного комплекса, состояние заряда BESS, термическая инерция камер и технологические ограничения хранения яблок.

Результаты. В интегрированном сценарии S4 локальное использование солнечной энергии увеличилось до 419,9 МВт·ч/год, а импорт из сети снизился до 968,2 МВт·ч/год. По сравнению со сценарием S1 снижение импорта составило 94,4 МВт·ч/год, что при тарифе 1000 сум/кВт·ч соответствует экономии около 94,4 млн сум/год. Одновременно уменьшается вечерний сетевой максимум и повышается доля собственного использования PV-энергии.

Заключение. Интеграция СФЭС, LiFePO₄ BESS и SCADA/MPC-управления обеспечивает больший системный эффект, чем раздельное применение накопителя или только управления нагрузкой. Для рассматриваемого объекта технически рациональной является конфигурация BESS порядка 500 кВт·ч / 200 кВт, обеспечивающая резервирование



критической холодильной нагрузки, сглаживание вечернего импорта и формирование цифрового контура управления холодильным предприятием.

Ключевые слова: сетевая солнечная фотоэлектрическая станция, промышленный холодильный комплекс, накопитель энергии LiFePO_4 , управляемая холодильная нагрузка, SCADA/MPC, термическая инерция, технико-экономическая оптимизация, Ферганская долина.

UDC 621.311.243:621.56

POWER SUPPLY OF AN INDUSTRIAL REFRIGERATION ENTERPRISE BASED ON A GRID-CONNECTED PV PLANT IN THE FERGANA VALLEY. PART 2. OPTIMIZATION OF THE “PV PLANT + LiFePO_4 BESS + CONTROLLABLE REFRIGERATION LOAD” CONFIGURATION

Mirzabaev Akram Maxkamovich¹- Doctor of Technical Sciences, Professor,
<https://orcid.org/0000-0002-5223-7160> e-mail: mirzabaev.akram@gmail.ru

Matchanov Nuraddin Azadovich^{2,3}- Doctor of Technical Sciences, Professor,
<https://orcid.org/0000-0002-4298-1041> e-mail: sirnornur@mail.ru

Kulmatov Khayrullo Khabibullaevich³- PhD, Senior Researcher,
<https://orcid.org/0009-0008-5504-4875> e-mail: hayrullo05051986@gmail.com,

Muminov Shermuhammad Abdushukur ugli³- PhD,
<https://orcid.org/0000-0002-6453-6782> e-mail: muminovshermuhammad@gmail.com

Dekhkonoa Makhliyokhon Khusniddin qizi⁴- PhD,
<https://orcid.org/0000-0003-2556-4147> e-mail: dxmaxliyo@gmail.com

Shodiev Bobur Toir ugli¹- asisstant,
<https://orcid.org/0009-0008-8973-6861> e-mail: boburshodiyev2994@gmail.com

¹National Research University “Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers”, Tashkent, Uzbekistan

²Islam Karimov Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

³Fergana State Technical University, Fergana, Uzbekistan

⁴National Research Institute of Renewable Energy Sources under the Ministry of Energy, Tashkent, Uzbekistan

Abstract. *Introduction. The paper develops the previously justified power supply scheme of an industrial refrigeration enterprise with a 297kW grid-connected PV plant by integrating LiFePO_4 battery storage and predictive SCADA/MPC control of the refrigeration load. The proposed approach considers the PV plant, grid, BESS, and cold rooms as a single energy-technological system.*

Methods and materials. *The study was carried out using simulation modeling. Five scenarios were compared: S0 - grid only, S1 - PV, S2 - PV+BESS, S3 - PV+MPC, and S4 - PV+BESS+MPC. The calculations used a 297kW PV plant, a 400–650 kWh LiFePO_4 BESS, the refrigeration load profile, BESS state of charge, thermal inertia of cold rooms, and apple storage constraints.*

Results. *In the integrated S4 scenario, local PV utilization increased to 419.9 MWh/year, while grid import decreased to 968.2 MWh/year. Compared with S1, the grid import was reduced by 94.4 MWh/year, giving an estimated annual saving of about 94.4 million UZS at an electricity tariff of 1,000 UZS/kWh. The evening grid peak is also reduced, and PV self-consumption is increased.*

Conclusion. *The combined use of a PV plant, LiFePO_4 BESS, and SCADA/MPC control provides a higher system-level effect than separate storage or load control. For the considered facility, a BESS configuration of approximately 500 kWh / 200 kW is technically reasonable, providing backup for the critical refrigeration load, evening-import smoothing, and a digital control loop for the refrigeration enterprise.*



Keywords: *grid-connected solar photovoltaic plant; industrial refrigeration complex; LiFePO₄ battery energy storage system; controllable refrigeration load; SCADA/MPC; thermal inertia; techno-economic optimization; Fergana Valley.*

Введение.

Повышение энергоэффективности агропромышленных предприятий с холодильными нагрузками является одной из наиболее актуальных задач современной промышленной энергетики. Для Ферганской долины данная задача имеет особое значение, поскольку регион характеризуется высоким аграрным потенциалом, выраженной сезонностью климатических параметров и значительным солнечным ресурсом [1]. В условиях роста требований к качеству хранения плодоовощной продукции промышленное овощехранилище должно рассматриваться не только как технологический объект, но и как энергоёмкий, управляемый потребитель электрической энергии.

В первой части настоящего исследования была рассмотрена схема энергоснабжения промышленного холодильного предприятия с сетевой СФЭС мощностью 297 кВт, подключенной к шинам 0,4 кВ и внешней сети через трансформатор 0,4/10 кВ мощностью 1000 кВА. Обобщение опыта эксплуатации и расчётная оценка показали, что данная конфигурация обеспечивает снижение сетевого отбора в дневные часы при сохранении требований к качеству электроэнергии, селективности защит, антиостровной логике и SCADA/АСУ ТП. В качестве опорной энергетической базы для имитационного моделирования в настоящей статье принята расчётно-нормированная доступная АС-энергия СФЭС порядка 445 МВт·ч/год, согласованная с балансовой верификацией Части 1 [2, 3].

Однако сетевая СФЭС, работающая без накопителя энергии и без активного управления холодильной нагрузкой, остается зависимой от суточной и сезонной неравномерности солнечной генерации. В светлое время суток возможен избыток мощности, тогда как вечером и ночью холодильный комплекс питается преимущественно от внешней сети. При прочих равных условиях именно это несовпадение генерации и нагрузки ограничивает дальнейшее повышение доли собственного потребления солнечной энергии [4].

Специфика холодильного предприятия заключается в том, что часть нагрузки может быть управляемой без нарушения технологического процесса. Холодильные камеры, продукция, ограждающие конструкции и внутренний воздух обладают термической инерцией. Следовательно, в часы высокой генерации СФЭС возможно предварительное охлаждение камер в пределах допустимого температурного диапазона, что позволяет снизить потребление в вечерние часы. Но такое управление может быть реализовано только при учете режима хранения конкретной продукции, влажности воздуха, теплопритоков, пусковых токов компрессоров и требований к надежности питания критической нагрузки [4].

В свете реализации последнего этапа цифровизации промышленных энергетических объектов актуальной становится разработка интегрированной конфигурации «СФЭС + накопитель + управляемая холодильная нагрузка». Такая конфигурация позволяет рассматривать холодильный комплекс не как пассивную нагрузку, а как элемент энергетического менеджмента, взаимодействующий с СФЭС, внешней сетью, накопителем LiFePO₄ и SCADA/АСУ ТП.

В связи с этим цель настоящей статьи заключается в разработке и верификации режимно-параметрической модели и алгоритмов управления системой энергоснабжения промышленного холодильного предприятия с сетевой СФЭС, накопителем энергии и дифференцированными холодильными режимами хранения продукции, обеспечивающих снижение сетевого отбора и повышение устойчивости критических нагрузок без нарушения технологических ограничений хранения.

Объектом исследования настоящего сообщения является система энергоснабжения промышленного холодильного предприятия Ферганской области, в которой сетевая СФЭС



установленной мощностью порядка 300 кВт подключена непосредственно к контуру электроснабжения холодильного комплекса [2].

В данной статье административный корпус, зарядное устройство и прочие вспомогательные нагрузки не включаются в расчетную нагрузку промышленного холодильного предприятия, что позволяет сфокусировать исследование на энергообеспечении собственно промышленного холодильника как критического технологического объекта.

Предметом исследования являются режимы совместной работы СФЭС, внешней сети, накопителя энергии LiFePO_4 , холодильных камер и SCADA/MPC-алгоритма при различных климатических и технологических условиях.

Гипотеза исследования формулируется следующим образом: если учитывать не только график генерации СФЭС и электрическую нагрузку, но и термическую инерцию холодильных камер, режим хранения конкретной продукции, ограничения по качеству электроэнергии и стоимость сетевой электроэнергии, то оптимизированная конфигурация «СФЭС + накопитель + управление нагрузкой» даст больший системный эффект, чем любая из подсистем по отдельности.

В Табл. 1 представлены исходные условия и границы постановки задачи промышленного холодильного комплекса оснащенной СФЭС.

Таблица 1.

Исходные условия и границы постановки задачи

Компонент	Принято в расчетах
СФЭС	297 кВт DC, 540 модулей по 550 Вт
Инверторы	3×100 кВт, работа параллельно с сетью
Трансформатор	0,4/10 кВ, 1000 кВА
Расчетная нагрузка	только промышленный холодильный комплекс
Культура хранения	Яблоко (технологический сценарий)
Режим хранения	1...5 °C, RH 90–95 % [4] FAO/технологические нормы
Тариф электроэнергии	1000 сум/кВт·ч
Накопитель	LiFePO_4 , сценарно 400–650 кВт·ч
Резервирование	2 часа для критического холодильного контура

Как видно из Табл. 1, исходная постановка задачи сохраняет инженерную преемственность с Частью 1, но одновременно сужает расчётную нагрузку до промышленного холодильного комплекса. Это принципиально важно, поскольку при исключении административного корпуса и зарядного устройства модель становится более строгой технологически: вся оптимизация направлена на обеспечение критической холодильной нагрузки.

Обзор литературы. Современная литература по солнечному холодноснабжению показывает, что применение фотоэлектрических систем для обеспечения холодильных нагрузок имеет существенный потенциал в аграрном секторе, особенно в регионах с высокой солнечной радиацией [5-10]. В работе [11] обобщены современные солнечные системы охлаждения и показана их актуальность для хранения плодоовощной продукции в условиях Узбекистана. При этом отмечается, что солнечное охлаждение позволяет снижать энергопотребление и экологическую нагрузку, но требует согласования энергетической и технологической частей.

Для сетевых СФЭС важным методическим основанием является мониторинг показателей производительности PV-систем. Стандарт IEC 61724-1 описывает оборудование, методы и терминологию мониторинга фотоэлектрических систем, включая сбор данных, контроль качества, расчетные параметры и эксплуатационные метрики [12]. Для присоединения распределенных энергетических ресурсов к сети применимы положения IEEE 1547-2018, в которых регламентируются присоединение к электрической сети,



функциональная совместимость, качество электрической энергии, островной режим работы и требования к испытаниям [13].

В исследованиях по управлению холодильными нагрузками все большее внимание уделяется термической инерции камер и продукции [14]. Прогнозное управление позволяет смещать часть потребления во времени без нарушения температурных ограничений. В отличие от традиционного подхода, где холодильное оборудование рассматривается как жестко заданная нагрузка, современная постановка допускает использование холодильной камеры как управляемого энергетического ресурса.

В связи с этим в настоящей работе предложена интегрированная режимно-параметрическая модель энергоснабжения промышленного холодильного предприятия, объединяющая электрический баланс СФЭС, динамику накопителя энергии LiFePO_4 , термическую инерцию холодильных камер и технологические ограничения хранения яблок. В отличие от схемной оценки Части 1, в настоящей статье СФЭС рассматривается не только как источник снижения сетевого потребления, а как элемент управляемой энергетико-технологической системы.

Методы и материалы

Рассматриваемый объект расположен в Ферганской области и относится к промышленным холодильным предприятиям агропромышленного назначения. В Часть 1 была рассмотрена общая схема энергоснабжения предприятия, включающая СФЭС 297 кВт, три сетевых инвертора по 100 кВт, трансформатор 0,4/10 кВ мощностью 1000 кВА и систему SCADA/АСУ ТП (см. Рис.1-4.). В настоящей работе расчетный контур ограничивается промышленным холодильным комплексом, поскольку именно он является критическим потребителем, от устойчивости которого зависит сохранность продукции.

Расчетная нагрузка моделируется с учетом установленной мощности промышленного холодильника до 240 кВт и воздухоохладителей до 145,6 кВт, однако в режимной модели используется не простая сумма паспортных мощностей, а почасовой профиль потребления, зависящий от наружной температуры, состояния камер, пусков компрессоров, вентиляционных нагрузок и режима хранения. Такой подход позволяет избежать завышения нагрузки и одновременно сохраняет инженерную связь с фактическими параметрами объекта.

В качестве базового продукта хранения выбрано яблоко, что обосновано как с точки зрения аграрной специализации региона, так и с точки зрения наличия стандартных технологических требований к температуре и относительной влажности. В расчётной постановке допустимый диапазон температуры камеры принят $1...5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а рекомендуемый диапазон относительной влажности - 90–95 % [4]. Управление нагрузкой энергосистемы не допускает выхода за эти пределы.



Рис.1 Общий вид холодильного комплекса и поле СФЭС.



Рис.2. Камера хранения овощехранилище.



Рис.3 Камера хранения с яблоками.



Рис.4 Холодильная установка.

На табл.2 представлены основные расчетные параметры объекта исследования и энергетической модели энергоснабжения промышленного холодильного предприятия с сетевой СФЭС мощностью 297 кВт.

Таблица 2.

Основные расчетные параметры объекта исследования и энергетической модели

Параметр	Значение	Комментарий
Установленная мощность СФЭС	297 кВт DC	по Часть 1
Расчётная доступная АС-энергия СФЭС в имитационной модели	около 445 МВт·ч/год	опорная балансовая величина для сценариев S1–S4; локальное использование PV и экспорт/избыток учитываются отдельно
КИУМ СФЭС	17,1 %	по расчетам Часть 1
КПД энергетического тракта	около 93 %	инверторы, DC/AC-цепи, трансформатор
Максимальная установленная мощность холодильника	до 240 кВт	паспортный/проектный максимум
Воздухоохладители	до 145,6 кВт	сезонная и технологически связанная нагрузка
Расчетная годовая нагрузка холодильного комплекса	1383,4 МВт·ч/год	имитационная оценка для расчета
Тариф покупки электроэнергии	1000 сум/кВт·ч	сценарное значение
Цена экспорта	0 сум/кВт·ч	консервативная постановка без монетизации экспорта

Из Табл. 2 следует, что модель не подменяет исходные параметры Части 1, а использует их как верификационную рамку. При этом годовое электропотребление в данной статье относится только к холодильному комплексу, вследствие чего оно меньше общего электропотребления предприятия, ранее принятого на уровне около 1,9 ГВт·ч/год. В расчётах сценариев S1–S4 различаются доступная АС-энергия СФЭС, локально использованная PV-энергия, экспорт/избыток и сетевой импорт.

Результаты расчётной оценки и обсуждение

Для проверки гипотезы рассмотрены пять сценариев. Сценарий S0 является базовым и отражает питание холодильного комплекса только от внешней сети. Сценарий S1 соответствует действующей логике «СФЭС + сеть» без накопителя и без активного управления холодильной нагрузкой. Сценарий S2 включает накопитель LiFePO₄, но не использует термическую инерцию камер. Сценарий S3 использует MPC-управление холодильной нагрузкой без накопителя. Сценарий S4 объединяет СФЭС, накопитель энергии и управляемую холодильную нагрузку.



Таблица 3.

Сценарии моделирования системы энергоснабжения холодильного комплекса

Сценарий	Конфигурация	Назначение в исследовании
S0	Сеть + холодильный комплекс	нулевой базовый вариант
S1	Сеть + СФЭС 297 кВт	контрольное продолжение Часть 1
S2	Сеть + СФЭС + BESS	оценка эффекта накопителя без управления нагрузкой
S3	Сеть + СФЭС + MPC	оценка термической инерции без накопителя
S4	Сеть + СФЭС + BESS + MPC	проверка интегральной гипотезы исследования

Климатические и технологические входные данные. Так как архивные почасовые данные SCADA по СФЭС и холодильной нагрузке отсутствуют, в работе используется имитационное моделирование. Почасовой профиль солнечной генерации согласуется с расчётно-нормированной доступной АС-энергией СФЭС порядка 445 МВт·ч/год, принятой по Части 1, а профиль холодильной нагрузки формируется с учётом наружной температуры, холодильных градус-часов, периодов повышенной тепловой нагрузки и технологических ограничений хранения яблок. Для формирования климатических входных данных использованы NASA POWER Hourly API и локальные метеоданные Ферганской области [15, 16]. В расчётных исследованиях использованы не только классические градус-сутки охлаждения, но и холодильные градус-часы относительно уставки камеры [23, 24]:

$$ГЧ_{хол,j} = \sum_{t=1}^N \max(0, T_{нар}(t) - T_{уст,j}) \Delta t \quad (1)$$

где $ГЧ_{хол,j}$ - холодильные градус-часы для камеры j ; $T_{нар}(t)$ - наружная температура; $T_{уст,j}$ - уставка температуры хранения; Δt - расчетный шаг.

Применение холодильных градус-часов позволяет количественно связать климат Ферганской долины с режимом работы холодильного комплекса. При прочих равных условиях увеличение наружной температуры повышает теплопритоки через ограждения и, соответственно, увеличивает потребность в работе компрессорного оборудования.

Структура SCADA/MPC-управления. На Рис. 2 представлена концептуальная схема конфигурации «СФЭС + BESS $LiFePO_4$ + управляемая холодильная нагрузка + SCADA/MPC» для объекта исследования.

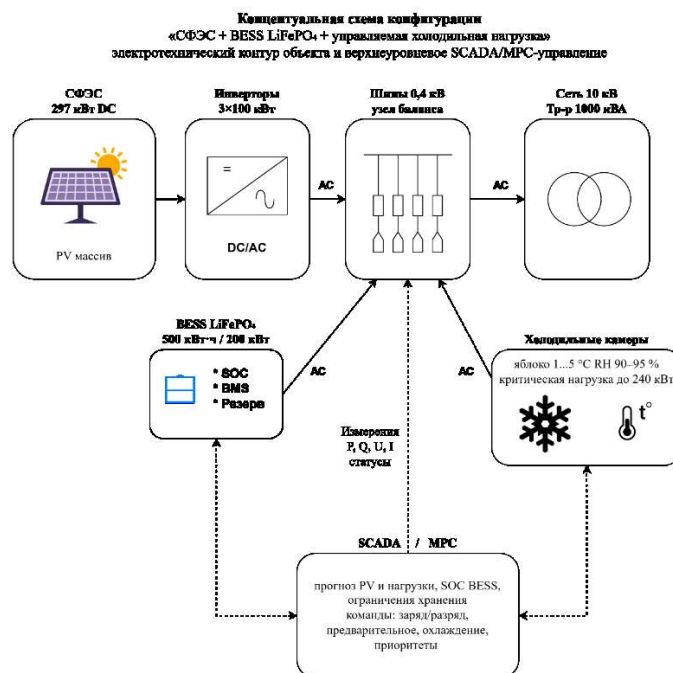


Рис.5. Концептуальная схема конфигурации «СФЭС + BESS LiFePO₄ + управляемая холодильная нагрузка + SCADA/MPC».

Как видно из Рис. 5, энергетический контур объединяет на шинах 0,4 кВ СФЭС с сетевыми инверторами, BESS LiFePO₄, холодильные камеры и внешний сетевой ввод. В SCADA/MPC передаются измерения P, Q, U, I, состояния оборудования, SOC накопителя и температурно-влажностные параметры камер; на их основе формируются согласованные задания по заряду/разряду BESS, предварительному охлаждению и приоритетам холодильной нагрузки [17].

Принципиальной особенностью является совместное использование электрохимического запаса BESS и тепловой инерции продукции, воздуха и ограждений камер. При избытке PV-генерации управляющий контур распределяет мощность между текущим холодоснабжением, зарядом накопителя и допустимым предварительным охлаждением; при снижении генерации электрический и «холодовой» резервы используются для уменьшения вечернего сетевого отбора без нарушения условий хранения [18, 25, 35]. Тем самым холодильная камера приобретает функцию управляемого теплового аккумулятора.

В отличие от традиционной SCADA-логики, реагирующей преимущественно на текущее состояние, предложенный верхнеуровневый контур реализует Model Predictive Control с горизонтом 24 ч. На каждом 15-минутном шаге прогнозируются PV-генерация, наружная температура, холодильная нагрузка и SOC BESS, рассчитывается последовательность допустимых воздействий, а исполняется только ближайшая команда. При оптимизации учитываются температурный коридор, ограничения трансформатора, минимальные интервалы включения компрессоров и требуемый резерв; затем задача повторно решается по обновлённым данным. При этом MPC не заменяет локальные ПЛК, BMS и электрические защиты узла 0,4 кВ, а формирует над ними координирующий уровень. В результате электрический контур, холодильное оборудование и термическая инерция продукции оптимизируются совместно, тогда как штатные устройства сохраняют приоритет по безопасности и блокируют недопустимые команды.

Рис. 5а раскрывает алгоритмическую реализацию этого принципа: предобработку и прогнозирование данных, оценку состояния, формирование ограничений и стратегии, MPC-оптимизацию, диспетчеризацию команд, локальное исполнение и контроль KPI. Блок обратной связи возвращает фактические отклонения и результаты исполнения, замыкая прогнозно-корректирующий цикл управления.

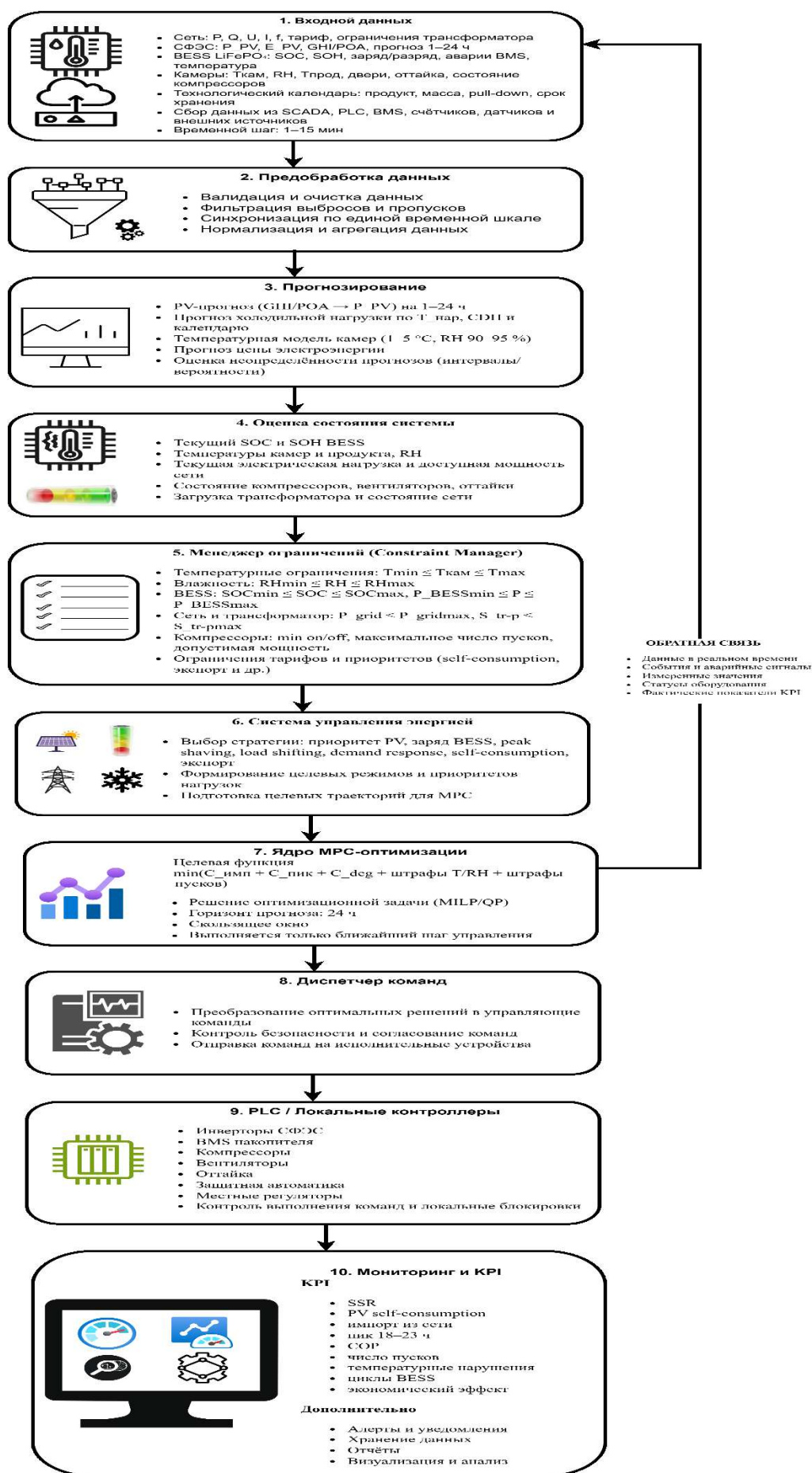


Рис. 5а. Структурно-алгоритмическая схема предложенного SCADA/MPC-управления конфигурацией «СФЭС + BESS LiFePO₄ + управляемая холодильная нагрузка».



Предложенный алгоритм SCADA/MPC-управления. Алгоритм реализуется как замкнутый прогнозно-корректирующий цикл со скользящим горизонтом 24 ч и шагом 15 мин. В блоках 1–2 Рис. 5а объединяются и валидируются данные сети, СФЭС, BESS, камер, компрессоров и метеоусловий; выполняются фильтрация выбросов и временная синхронизация. Блоки 3–4 формируют прогнозы PV-генерации, наружной температуры и холодильной нагрузки, затем оценивают SOC/SOH BESS, температурно-влажностное состояние камер и доступную мощность оборудования.

Менеджер ограничений (блок 5) задаёт допустимую область: коридоры T/RH, пределы SOC и мощности BESS, загрузку сети и трансформатора, минимальные интервалы работы и число пусков компрессоров. Система управления энергией (блок 6) выбирает стратегию — self-consumption, peak shaving, load shifting или резервирование. Ядро MPC (блок 7) минимизирует стоимость сетевого импорта и пика, деградацию BESS и штрафы за технологические отклонения.

Диспетчер команд (блок 8) выбирает из оптимальной траектории только ближайшее воздействие и формирует согласованные задания: заряд/разряд BESS, предварительное охлаждение, смещение температурной уставки, расписание компрессоров, вентиляторов и оттайки, приоритет критической нагрузки. Блок 9 передаёт команды инверторам, BMS, ПЛК и местным регуляторам, при этом локальные защиты сохраняют высший приоритет. При аварии BESS, потере связи, отклонении сетевых параметров или угрозе нарушения хранения выполняется переход к безопасному режиму.

Блок 10 рассчитывает SSR, PV self-consumption, сетевой импорт и пик, COP, число пусков, нарушения T/RH, циклы BESS и экономический эффект, после чего фактические показатели возвращаются в начало цикла. В этом контексте научная значимость алгоритма заключается в представлении термической инерции камер как управляемого ресурса гибкости, совместно оптимизируемого с BESS при жёстком приоритете сохранности продукции.

Математическая модель. Баланс мощности узла 0,4 кВ задаётся следующим выражением [25–27]:

$$P_{\text{сеть}}(t) = P_{\text{хол}}(t) + P_{\text{зар}}(t) - P_{\text{разр}}(t) - P_{\text{СФЭС}}(t) \quad (2)$$

где $P_{\text{сеть}}(t)$ - мощность обмена с сетью; $P_{\text{хол}}(t)$ - электрическая мощность холодильного комплекса; $P_{\text{зар}}(t)$ - мощность заряда накопителя; $P_{\text{разр}}(t)$ - мощность разряда накопителя; $P_{\text{СФЭС}}(t)$ - мощность сетевой фотоэлектрической станции.

Если $P_{\text{сеть}}(t) > 0$, холодильный комплекс импортирует электроэнергию из внешней сети. Если $P_{\text{сеть}}(t) < 0$, возникает избыток солнечной генерации, который может быть направлен на заряд BESS, экспортирован в сеть или ограничен в зависимости от условий присоединения.

Модель накопителя LiFePO_4 можно записать в энергетически агрегированном виде [28–30]:

$$SOC_{\text{нак}}(t + \Delta t) = SOC_{\text{нак}}(t) + \frac{\eta_{\text{зар}} P_{\text{зар}}(t) \Delta t}{E_{\text{нак}}} - \frac{P_{\text{разр}}(t) \Delta t}{\eta_{\text{разр}} E_{\text{нак}}} \quad (3)$$

где $SOC_{\text{нак}}$ - состояние заряда накопителя; $\eta_{\text{зар}}$ и $\eta_{\text{разр}}$ - КПД заряда и разряда; $E_{\text{нак}}$ - номинальная энергоемкость BESS.

$$SOC_{\text{мин}} \leq SOC_{\text{нак}}(t) \leq SOC_{\text{макс}} \quad (4)$$

$$0 \leq P_{\text{зар}}(t) \leq 0 \leq P_{\text{разр,макс}} \quad (5)$$

$$0 \leq P_{\text{разр}}(t) \leq 0 \leq P_{\text{разр,макс}} \quad (6)$$



Для обеспечения двухчасового резервирования критической холодильной нагрузки расчётная энергоёмкость накопителя должна удовлетворять условию [28, 29, 31]:

$$E_{\text{нак,мин}} = \frac{P_{\text{кр}} t_{\text{рез}}}{\eta_{\text{разр}} DOD_{\text{доп}}} \quad (7)$$

где $P_{\text{кр}}$ - критическая мощность холодильного контура; $t_{\text{рез}}$ - требуемое время резервирования; $DOD_{\text{доп}}$ - допустимая глубина разряда.

При $P_{\text{кр}}=140$ кВт, $t_{\text{рез}}=2$ ч, $\eta_{\text{разр}}=0,95$ и $DOD_{\text{доп}}=0,80$ минимальная номинальная энергоёмкость составляет около 368 кВт·ч. Следовательно, конфигурация 400 кВт·ч может рассматриваться как минимально допустимая, а 500 кВт·ч - как более устойчивый технический компромисс. Если требуется резервирование полной установленной холодильной мощности 240 кВт, расчётная энергоёмкость должна быть увеличена примерно до 630–650 кВт·ч.

Термическая модель холодильной камеры представляется следующим образом [24, 32-34]:

$$T_{\text{кам},j}(t + \Delta t) = T_{\text{кам},j}(t) + \frac{\Delta t}{C_{\text{кам},j}} \left[UA_{\text{кам},j} (T_{\text{нар}}(t) - T_{\text{кам},j}(t)) + Q_{\text{прод},j}(t) + Q_{\text{инф},j}(t) - Q_{\text{хол},j}(t) \right] \quad (8)$$

где $T_{\text{кам},j}$ - температура камеры j ; $C_{\text{кам},j}$ - эквивалентная тепловая ёмкость камеры и продукции; $UA_{\text{кам},j}$ - коэффициент теплопередачи; $Q_{\text{прод},j}$ - теплопритоки от продукции; $Q_{\text{инф},j}$ - теплопритоки от инфильтрации; $Q_{\text{хол},j}$ - холодопроизводительность.

$$Q_{\text{хол},j}(t) = SOP_j(t) P_{\text{комп},j}(t) \quad (9)$$

где $SOP_j(t)$ - коэффициент холодильной эффективности; $P_{\text{комп},j}(t)$ - электрическая мощность компрессорного оборудования камеры j .

$$T_{\text{мин},j} \leq T_{\text{кам},j}(t) \leq T_{\text{макс},j} \quad (10)$$

Для камеры хранения яблок в расчётной постановке принято $T_{\text{мин}}=0$ °С и $T_{\text{макс}}=2$ °С.

$$T_{\text{мин},j} \leq T_{\text{кам},j}(t) \leq T_{\text{макс},j} \quad (10)$$

Управление холодильной нагрузкой допускает предварительное охлаждение только в пределах технологического диапазона. Температурное нарушение получает в целевой функции высокий штраф, поскольку экономия электроэнергии не может быть достигнута ценой ухудшения качества продукции.

В связи с чем Целевая функция оптимизации холодильной нагрузкой промышленного объекта формируется как многокритериальный критерий SCADA/MPC-управления [25, 35–38]:

$$J = \sum_{t=1}^N [c_{\text{имп}}(t) P_{\text{имп}}(t) - c_{\text{эксп}}(t) P_{\text{эксп}}(t) + c_{\text{пик}} P_{\text{пик}}(t) + c_{\text{дег}} E_{\text{нак,цикл}}(t) + c_{\text{нар}} \Delta T_{\text{нар}}(t) + c_{\text{пуск}} N_{\text{пуск}}(t)] \Delta t \quad (11)$$

где J - интегральный критерий; $c_{\text{имп}}$ - тариф покупки электроэнергии; $c_{\text{эксп}}$ - цена экспорта; $c_{\text{пик}}$ - стоимость пиковой мощности; $c_{\text{дег}}$ - стоимость деградации накопителя; $c_{\text{нар}}$ - штраф за нарушение температуры; $c_{\text{пуск}}$ - штраф за частые пуски компрессоров.

Отметим, что в настоящем исследовании базовый тариф принят равным 1000 сум/кВт·ч, а цена экспорта в сеть в консервативной постановке принимается равной нулю. Такая постановка делает модель более строгой: избыток солнечной генерации не создаёт искусственного экономического эффекта, если он не используется внутри объекта.

Результаты моделирования

Сравнение сценариев S0–S4. На Табл.4 представлены результаты сравнения расчётных сценариев энергоснабжения холодильного комплекса



Таблица 4.

Сравнение расчетных сценариев энергоснабжения холодильного комплекса

Показатель	S0	S1	S2	S3	S4
Конфигурация	сеть	PV	PV+BES S	PV+MP C	PV+BESS+ MPC
Нагрузка, МВт·ч/год	1383,4	1383,4	1383,4	1381,7	1381,7
Доступная АС-энергия СФЭС, МВт·ч/год	0,0	445,0	445,0	445,0	445,0
Локально использовано PV, МВт·ч/год	0,0	320,8	411,6	337,2	419,9
Импорт из сети, МВт·ч/год	1383,4	1062,6	978,8	1044,5	968,2
Экспорт/избыток, МВт·ч/год	0,0	124,2	33,4	107,8	25,1
Покрытие нагрузки PV, %	0,0	23,2	29,8	24,4	30,4
Средневечерний импорт 18– 23 ч, кВт	169,3	169,2	138,2	158,5	128,6
Условные пуски компрессоров, ед./год	1289	1289	1289	398	398

Как видно из Табл. 4, переход от сценария S1 к сценарию S4 снижает годовой импорт из сети с 1062,6 до 968,2 МВт·ч, то есть на 94,4 МВт·ч/год. При тарифе 1000 сум/кВт·ч это соответствует прямому снижению затрат на покупку электроэнергии примерно на 94,4 млн сум/год. Одновременно локальное использование солнечной генерации возрастает с 320,8 до 419,9 МВт·ч/год, а избыток/экспорт уменьшается с 124,2 до 25,1 МВт·ч/год.

Следует отметить, что сценарий S2 дает основной энергетический эффект за счет аккумуляторного накопителя, а сценарий S3 - эксплуатационный эффект за счет уменьшения количества пусков компрессоров. Интегрированный сценарий S4 объединяет оба механизма: накопитель снижает вечерний сетевой отбор, а MPC использует термическую инерцию камер для перераспределения холодильной нагрузки без выхода за технологические границы.

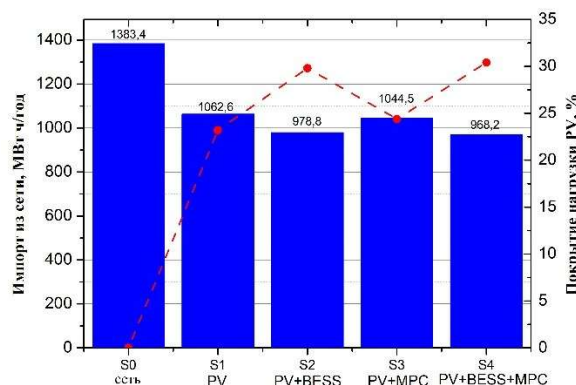


Рис. 6. Сравнение сценариев S0–S4 по годовому импорту из сети и покрытию холодильной нагрузки солнечной энергией.

Из Рис. 6 видно, что наибольшее снижение сетевого импорта достигается в сценарии S4. При прочих равных условиях это подтверждает гипотезу исследования: изолированное применение только накопителя или только управления нагрузкой уступает интегрированной конфигурации, в которой электрический и тепловой контуры оптимизируются совместно.

Характерный суточный режим. Как видно из Рис. 7, в дневной период солнечная генерация используется для покрытия текущей холодильной нагрузки, заряда накопителя и допустимого предварительного охлаждения камер. В вечерние часы, когда генерация СФЭС снижается до нуля, BESS разряжается, а холодильная нагрузка частично уменьшается за счет заранее накопленного «холода» в продукте и ограждающих конструкциях. Таким образом,



сетевой импорт в вечернее окно снижается без нарушения технологического режима хранения.

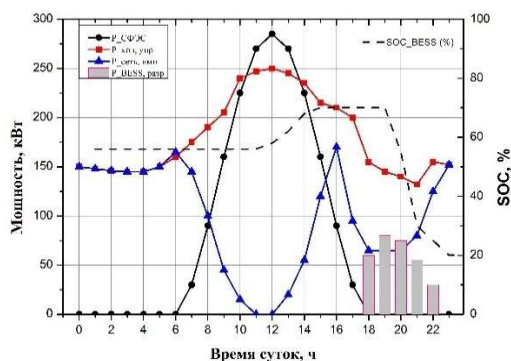


Рис. 7. Характерный летний суточный режим работы конфигурации S4: генерация СФЭС, управляемая холодильная нагрузка, импорт из сети, разряд BESS и SOC накопителя.

Температурные ограничения хранения. Из Рис. 8 следует, что прогнозное управление не выводит температуру камеры за допустимые границы $0...2^{\circ}\text{C}$. При этом в период высокой генерации СФЭС температура смещается ближе к нижней границе допустимого диапазона, что позволяет снизить электрическую мощность компрессорного оборудования в вечернее время. Констатируя вышеизложенное, можно отметить, что холодильная камера в данном случае выполняет функцию технологического теплового буфера.

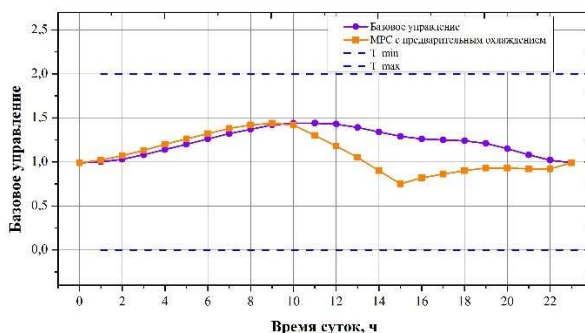


Рис. 8. Температурный режим холодильной камеры при базовом управлении и MPC с предварительным охлаждением.

Подбор мощности и энергоемкости BESS

Таблица 5.

Рекомендуемые варианты конфигурации накопителя LiFePO_4

Вариант BESS	Назначение	Инженерная интерпретация
400 кВт·ч / 150 кВт	минимальный вариант	достаточен для 2 ч резервирования критического контура около 140 кВт при ограничениях SOC/DOD
500 кВт·ч / 200 кВт	рекомендуемый технический компромисс	обеспечивает резерв, сглаживание вечернего импорта и повышение самопотребления PV
650 кВт·ч / 250 кВт	усиленный вариант	целесообразен при требовании резервирования полной холодильной мощности до 240 кВт

На Рис.9 представлена диаграмма по результатам расчета сеточного подбора BESS по мощности и энергоемкости для поддержки работы холодильного комплекса с учетом экономически оправданной конфигурации резервированию по режимному эффекту.

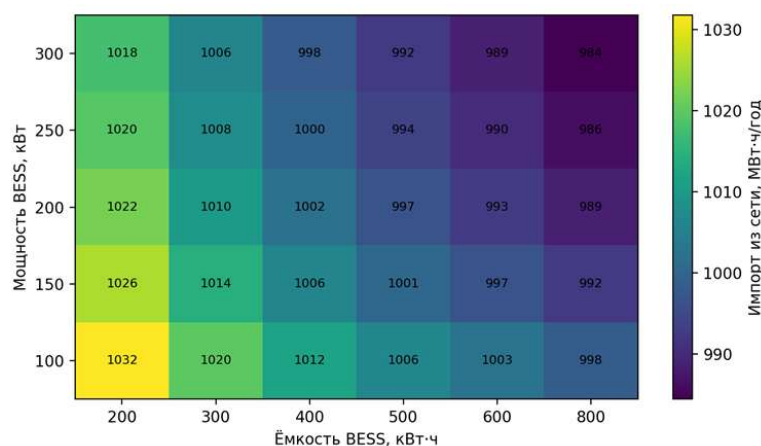


Рис. 6. Результаты сеточного подбора BESS по мощности и энергоемкости: расчетный импорт из сети, МВт·ч/год.

Как видно из Рис. 6, увеличение энергоемкости накопителя после 500–600 кВт·ч дает уменьшающийся предельный эффект по снижению годового импорта. Это типичная зона насыщения: дополнительная емкость становится все менее загруженной, тогда как капитальные затраты продолжают увеличиваться. Поэтому для рассматриваемого объекта рационально разделять минимально допустимую конфигурацию по резервированию и экономически оправданную конфигурацию по режимному эффекту.

Технико-экономическая оценка. Технико-экономическая оценка выполнена для тарифа 1000 сум/кВт·ч. В консервативной постановке цена экспорта избытка солнечной генерации принята равной нулю, вследствие чего экономический эффект формируется только за счет снижения импорта из сети и повышения локального использования PV-энергии.

Таблица 6.

Экономическая интерпретация сценариев при тарифе 1000 сум/кВт·ч

Показатель	S1	S2	S3	S4
Импорт из сети, МВт·ч/год	1062,6	978,8	1044,5	968,2
Расход на электроэнергию, млн сум/год	1062,6	978,8	1044,5	968,2
Экономия относительно S1, млн сум/год	0,0	83,8	18,1	94,4
Основной эффект	базовый	самопотребление PV и резерв	снижение пусков и смещение нагрузки	суммарный энергетико-технологический эффект

Из Табл. 6 видно, что прямой денежный эффект сценария S4 относительно S1 составляет около 94,4 млн сум/год. Однако для накопителя LiFePO₄ такой эффект не должен интерпретироваться только как окупаемость по кВт·ч. Аккумулятор выполняет также функцию двухчасового резервирования, ограничения вечернего сетевого отбора и повышения устойчивости критической нагрузки [19]. Если в расчет включать только плоский тариф без платы за пиковую мощность, без стоимости аварийного простоя и без стоимости предотвращенной порчи продукции, то накопитель выглядит экономически тяжелым. Но с точки зрения надежности и технологического риска он становится элементом повышения устойчивости овощехранилища.



В практической реализации целесообразна поэтапная стратегия. На первом этапе внедряется SCADA/MPC-контур управления холодильной нагрузкой, поскольку он требует меньших капитальных затрат и быстро дает управленческий эффект. На втором этапе устанавливается BESS минимальной или рекомендуемой конфигурации в зависимости от требований к резервированию. Такой подход снижает инвестиционный риск и позволяет калибровать накопитель на основе реальных данных эксплуатации.

Обсуждение результатов

Полученные результаты показывают, что управляемая холодильная нагрузка должна рассматриваться как самостоятельный ресурс гибкости энергосистемы предприятия. В отличие от административных и вспомогательных нагрузок, холодильный комплекс имеет выраженную технологическую инерцию, формируемую массой продукции, воздухом, ограждающими конструкциями и режимом хранения. Эта инерция позволяет временно смещать часть электрического потребления без нарушения температурно-влажностных ограничений.

В то же время использование холодильной нагрузки как ресурса гибкости возможно только при наличии технологически безопасного алгоритма управления. В предлагаемом подходе SCADA/MPC-контур выполняет три функции: энергетическую, технологическую и эксплуатационную. Энергетическая функция заключается в снижении импорта из сети, повышении локального использования PV-энергии и сглаживании вечернего максимума. Технологическая функция обеспечивает соблюдение уставок температуры и относительной влажности для конкретной продукции. Эксплуатационная функция ограничивает частые пуски компрессоров, учитывает оттайку, открывание дверей, аварии BMS и состояние внешней сети.

Практическое значение предложенного решения состоит в том, что управление не сводится к простому включению или отключению компрессоров по температурному реле. На верхнем уровне формируется прогнозный режим работы холодильного комплекса: в часы высокой PV-генерации допускается предварительное охлаждение камер в пределах технологического коридора, а в вечерние часы нагрузка частично снижается за счёт ранее накопленного «холода» и разряда BESS. При этом приоритетом остаётся сохранность продукции, поэтому любое нарушение температурно-влажностных ограничений имеет более высокий штраф, чем стоимость сетевой электроэнергии.

Таким образом, главная ценность предложенного подхода заключается не только в снижении импорта из сети, но и в формировании цифрового энерготехнологического контура управления холодильным предприятием. Констатируя вышеизложенное, можно отметить, что рассматриваемая конфигурация «СФЭС + BESS + SCADA/MPC + управляемая холодильная нагрузка» переводит промышленное овощехранилище из режима пассивного потребителя в режим управляемого энергетико-технологического объекта.

Выводы

1. Разработана режимно-параметрическая модель и иерархический SCADA/MPC-контур для совместного управления сетевой СФЭС 297 кВт, BESS LiFePO₄ и холодильной нагрузкой. В отличие от схемного анализа Части 1, электрический баланс, динамика накопителя и тепловое состояние камер объединены в единую прогнозную задачу управления.

2. Научно-методический результат состоит в представлении термической инерции камер и продукции как управляемого ресурса гибкости, эквивалентного ограниченному тепловому накопителю. Предложенная авторами Архитектура Рис. 5 и 5а разделяет прогнозирование, оценку состояния, менеджер ограничений, выбор стратегии, MPC-оптимизацию и локальное исполнение, поэтому энергетические цели достигаются только в области, допустимой по T/RH, SOC, мощности сети и режимам компрессоров.

3. Самостоятельный эффект управления холодильной нагрузкой подтверждён сценарием S3: локальное использование PV-энергии увеличивается с 320,8 до 337,2 МВт·ч/год, сетевой импорт снижается на 18,1 МВт·ч/год, средневечерняя мощность — с



169,2 до 158,5 кВт, а условное число пусков компрессоров — с 1289 до 398, то есть на 69,1 %, без выхода температуры камеры за принятый в модели технологический коридор.

4. В интегрированном сценарии S4 координация BESS и предварительного охлаждения повышает локальное использование PV-энергии до 419,9 МВт·ч/год и покрытие нагрузки до 30,4 %. Относительно S1 годовой импорт уменьшается на 94,4 МВт·ч, а средневечерний отбор — на 40,6 кВт, или 24,0 %; прямой тарифный эффект составляет около 94,4 млн сум/год.

5. Для двухчасового резервирования критической нагрузки около 140 кВт минимально допустима конфигурация 400 кВт·ч / 150 кВт, а рациональным режимно-техническим компромиссом является BESS 500 кВт·ч / 200 кВт. Вариант 630–650 кВт·ч необходим при резервировании полной мощности до 240 кВт, однако после 500–600 кВт·ч проявляется зона снижающегося предельного эффекта.

6. Предложенный контур реализуем как верхнеуровневая надстройка над ПЛК, BMS и штатными защитами и допускает полевую верификацию по KPI: SSR, self-consumption, импорту и пику сети, COP, числу пусков, нарушениям T/RH и циклам BESS. Полученный подход переводит холодильный комплекс из пассивной нагрузки в активный энергетико-технологический ресурс и может адаптироваться к другим продуктам посредством изменения технологических ограничений.

Использованная литература

- [1] 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. DOI: 10.3103/S0003701X22600977.
- [2] 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. Vol. 2(23). P. 101–111.
- [3] International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. A methodology for the analysis of PV self-consumption policies. IEA PVPS, 2016.
- [4] FAO. Small-scale postharvest handling practices: A manual for horticultural crops. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2004.
- [5] Ghafoor A., Munir A. Worldwide overview of solar thermal cooling technologies // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 43. P. 763–774. DOI: 10.1016/j.rser.2014.11.073.
- [6] Otanicar T., Taylor R. A., Phelan P. E. Prospects for solar cooling: An economic and environmental assessment // *Solar Energy*. 2012. Vol. 86(5). P. 1287–1299. DOI: 10.1016/j.solener.2012.01.020.
- [7] Han Y., Li M., Wang Y., Li G., Ma X., Wang R. Impedance matching control strategy for a solar cooling system directly driven by distributed photovoltaics // *Energy*. 2019. Vol. 168. P. 953–965. DOI: 10.1016/j.energy.2018.11.160.
- [8] Seyednezhad M., Najafi H. Solar-powered thermoelectric-based cooling and heating system for building applications: A parametric study // *Energies*. 2021. Vol. 14. DOI: 10.3390/en14175573.
- [9] Bozorgi M., Tasnim S. H., Mahmud S. Enhancing indoor thermal comfort and sustainability: A solar-driven desiccant cooling and adsorption chiller system with environmental impact assessment // *Solar Energy*. 2024. Vol. 271. Article 112440.
- [10] 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(6). Article 062302.
- [11] Mirzabaev A. M., Shodiev B. T., Kulmatov Kh. Kh. Assessment of economic and ecological effectiveness of solar cooling systems under conditions of Uzbekistan // *Informatika va energetika muammolari*. 2025. No. 4. P. 57–70.



- [12] International Electrotechnical Commission. IEC 61724-1:2017 Photovoltaic system performance — Part 1: Monitoring. IEC, 2017.
- [13] IEEE. IEEE Std 1547-2018: Standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces. IEEE Standards Association, 2018.
- [14] Rybakov I. P., Nikiforov S. A. Energy consumption and management of refrigeration loads at industrial enterprises // *Izvestiya vuzov. Electromechanics*. 2021. Vol. 64(3). P. 42–49.
- [15] NASA Langley Research Center. NASA POWER: Hourly API documentation. 2026.
- [16] UzHydromet. Climatic data summary 2005–2024. Hydrometeorological Service of Uzbekistan, 2024.
- [17] Ahmed N., Patel M. Energy management algorithms for PV integrated industrial microgrids using SCADA systems // *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2021. Vol. 19(1). P. 185–192.
- [18] 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. 556–565. DOI: 10.1016/j.energy.2017.05.123.
- [19] U.S. Department of Energy. Energy storage grand challenge: Energy storage market report. U.S. DOE, 2020.
- [20] National Renewable Energy Laboratory. Understanding solar photovoltaic system performance: An assessment of 75 federal photovoltaic systems. NREL, 2022.
- [21] Hafez F. S., Safa-Gamal M., Taufiq-Yap Y. H., Alrifay M., Seyedmahmoudian M., Stojcevski A., Horan B., Mekhilef S. Energy efficiency in sustainable buildings: A systematic review // *Energy Strategy Reviews*. 2023. Vol. 45. Article 101013. DOI: 10.1016/j.esr.2022.101013.
- [22] Simonetti R., Moretti L., Molinaroli L., Manzolini G. Energetic and economic optimization of the yearly performance of solar-assisted heat pump systems // *Energy Conversion and Management*. 2020. Vol. 206. Article 112446. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.112446.
- [23] Salata F., Falasca S., Ciancio V., Curci G., Grignaffini S., de Wilde P. Estimating building cooling energy demand through the Cooling Degree Hours in a changing climate: A modeling study // *Sustainable Cities and Society*. 2022. Vol. 76. Article 103518. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103518.
- [24] Tian S., Shao S., Liu B. Investigation on transient energy consumption of cold storages: Modeling and a case study // *Energy*. 2019. Vol. 180. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.energy.2019.04.217.
- [25] Parisio A., Rikos E., Glielmo L. A model predictive control approach to microgrid operation optimization // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2014. Vol. 22(5). P. 1813–1827. DOI: 10.1109/TCST.2013.2295737.
- [26] Luthander R., Widén J., Nilsson D., Palm J. Photovoltaic self-consumption in buildings: A review // *Applied Energy*. 2015. Vol. 142. P. 80–94. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.12.028.
- [27] Quoilin S., Kavvadias K., Mercier A., Pappone I., Zucker A. Quantifying self-consumption linked to solar home battery systems: Statistical analysis and economic assessment // *Applied Energy*. 2016. Vol. 182. P. 58–67. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.08.077.
- [28] Hannan M. A., Lipu M. S. H., Hussain A., Mohamed A. A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 78. P. 834–854. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.001.
- [29] Schimpe M., Naumann M., Truong N., Hesse H. C., Santhanagopalan S., Saxon A., Jossen A. Energy efficiency evaluation of a stationary lithium-ion battery container storage system via electro-thermal modeling and detailed component analysis // *Applied Energy*. 2018. Vol. 210. P. 211–229. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.10.129.
- [30] Hu X., Li S., Peng H. A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries // *Journal of Power Sources*. 2012. Vol. 198. P. 359–367. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.10.013.



- [31] Barré A., Deguilhem B., Grolleau S., Gérard M., Suard F., Riu D. A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications // Journal of Power Sources. 2013. Vol. 241. P. 680–689. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.05.040.
- [32] East A. R., Smale N. J., Trujillo F. J. Potential for energy cost savings by utilising alternative temperature control strategies for controlled atmosphere stored apples // International Journal of Refrigeration. 2013. Vol. 36(3). P. 1109–1117. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2012.10.028.
- [33] Leducq D., Vende P. E., Hoang H. M. Demand response in refrigerated warehouses and thermal energy storage // 4th IIR International Conference on Sustainability and the Cold Chain. 2016. DOI: 10.18462/iir.iccc.2016.0038.
- [34] Khorsandnejad E., Malzahn R., Oldenburg A.-K., Mittreiter A., Doetsch C. Analysis of flexibility potential of a cold warehouse with different refrigeration compressors // Energies. 2024. Vol. 17(1). Article 85. DOI: 10.3390/en17010085.
- [35] Hovgaard T. G., Larsen L. F. S., Jørgensen J. B., Boyd S. Fast nonconvex model predictive control for commercial refrigeration // IFAC Proceedings Volumes. 2012. Vol. 45(17). P. 514–521. DOI: 10.3182/20120823-5-NL-3013.00082.
- [36] Oldewurtel F., Parisio A., Jones C. N., Gyalistras D., Gwerder M., Stauch V., Lehmann B., Morari M. Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control // Energy and Buildings. 2012. Vol. 45. P. 15–27. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.09.022.
- [37] Bejarano G., Lemos J. M., Rico-Azagra J., Rubio F. R., Ortega M. G. Energy management of refrigeration systems with thermal energy storage based on non-linear model predictive control // Mathematics. 2022. Vol. 10(17). Article 3167. DOI: 10.3390/math10173167.
- [38] Tang R., Wang S. Model predictive control for thermal energy storage and thermal comfort optimization of building demand response in smart grids // Applied Energy. 2019. Vol. 242. P. 873–882. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.03.038.

Приложение А. Рекомендуемые переменные SCADA для финальной верификации

Таблица А1. Минимальный перечень SCADA-переменных для перевода расчетной модели в эксплуатационную

Appendix A. Recommended SCADA variables for final verification

Table A1. Minimum list of SCADA variables for conversion of the computational model to the operational one

Группа	Переменная	Шаг записи	Назначение
СФЭС	$P_{\text{СФЭС}}$, $E_{\text{СФЭС}}$, U , I , $\cos\varphi$, THD	1–15 мин	верификация генерации и качества электроэнергии
BESS	SOC, $P_{\text{зар}}$, $P_{\text{разр}}$, $E_{\text{цикл}}$, аварии BMS	1–15 мин	оценка режима и деградации
Холодильник	$P_{\text{комп}}$, $P_{\text{вент}}$, $P_{\text{оттайка}}$, число пусков	1–15 мин	модель нагрузки и эксплуатационная надежность
Камеры	$T_{\text{кам}}$, $RH_{\text{кам}}$, $T_{\text{прод}}$ при наличии	1–15 мин	контроль технологических ограничений
Климат	$T_{\text{нар}}$, $RH_{\text{нар}}$, GHI/РОА, ветер	1 ч	модель теплопритоков и PV-генерации
Сеть	$P_{\text{имп}}$, $P_{\text{эксп}}$, U , f , аварии сети	1–15 мин	оценка сетевого отбора и устойчивости