

*На правах рукописи*

ЛЕШТАЕВ ОЛЕГ ВАЛЕРЬЕВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ С  
СЕТЕВОЙ СОЛНЕЧНОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ

4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение  
агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва, 2023 г.

Работа выполнена на кафедре электроснабжения и электротехники имени академика И. А. Будзко ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

<b>Научный руководитель</b>	<b>Стушкина Наталья Алексеевна,</b> кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники имени академика И. А. Будзко ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева.
<b>Официальные оппоненты</b>	<b>Григораш Олег Владимирович,</b> доктор технических наук, доктор педагогических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина».
	<b>Шеповалова Ольга Вячеславовна,</b> кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ».
<b>Ведущая организация</b>	ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет»

Защита состоится «18» мая 2023 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» по адресу: 127434, Москва, ул. Прянишникова, д. 19.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета [www.timacad.ru](http://www.timacad.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н., доцент

Н. Н. Пуляев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** В последнее время все более очевидными становятся преимущества электроснабжения сельскохозяйственных потребителей от систем распределенной генерации. Такие системы могут обеспечить надежность и качество электроснабжения сельскохозяйственных потребителей в соответствии с нормативами, при этом возможно уменьшить длину линий электропередач и потери электроэнергии в них, снизить стоимость их строительства и обслуживания, уменьшить стоимость и потребление электроэнергии из централизованной сети. Несоответствие показателей качества электроэнергии в подобных системах может привести к росту ущербов из-за устранения несоответствия качества электроэнергии, компенсаций потребителям за нарушение качества электроэнергии, ускоренному износу оборудования у сельскохозяйственных потребителей.

При использовании систем распределенной генерации особое внимание уделяется возобновляемым источникам энергии, которые по сравнению с традиционными обеспечивают экологичность производства электроэнергии при возобновляемости используемых энергетических ресурсов.

Одними из наиболее перспективных вариантов систем распределенной генерации, использующих возобновляемые источники энергии, являются системы, включающие генерирующее оборудование на основе прямого преобразования солнечной энергии в электрическую – солнечные фотоэлектрические установки (далее – СФУ). Применение СФУ, работающих параллельно с сетью, для электроснабжения сельских зданий и предприятий агропромышленного комплекса, их внедрение, а также исследование влияния СФУ на качество электроэнергии на шинах сельскохозяйственного потребителя – актуальные вопросы в современных системах электроснабжения.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблемы, связанные с оценкой потенциала солнечной энергии и разработкой СФУ, изучались многими российскими и зарубежными учеными. Большой вклад в эту работу внесли Д.С. Стребков, М.Г. Тягунов, В.В. Харченко, П.П. Безруких, Р.А. Амерханов, А.В. Серебрянников, В.И. Виссарионов, В.М. Евдокимов, О.С. Попель, А.А. Соловьев, С.Е. Фрид, В.А. Бутузов, О.В. Григораш, В.В. Елистратов, Б.В. Лукутин, В.Т. Тайсаева, Б.В. Тарнижевский, И.И. Тюхов, О.В. Шеповалова, К.Я. Кондратьев, З.И. Пивоварова и др., в работах которых представлены методики оценки инсоляции территорий страны, исследования по разработке и повышению эффективности СФУ, рекомендации по их проектированию, монтажу, наладке, эксплуатации.

Вопросам надежного электроснабжения сельскохозяйственных объектов и качеству поставляемой потребителю электроэнергии посвящены работы И.А. Будзко, В.Ю. Гессена, Н.М. Зуля, Т.Б. Лещинской, П.Я. Пирхавка, Н.А. Стушкиной, В.И. Виссарионова, В.И. Сукманова, Д.Л. Файбисовича и др. В трудах ученых рассматривались вопросы согласованной работы источников электроэнергии с потребителем с позиций организации системного обеспечения электроэнергией объектов и территорий, но не всегда учитывались вопросы согласования и обоснования работы электростанций малой мощности, в том

числе и работы фотоэлектрических установок с системами централизованного электроснабжения, а так же вопросы качества электроэнергии потребителей, питающихся от солнечных фотоэлектрических установок в нормальном, аварийном и послеаварийном режимах работы.

Вопросами параллельной работы СФУ с централизованной сетью занимались Ф.Р. Исмагилов, Н.Л. Бабкина, Н.М. Илюшин и другие.

Однако анализ вышеуказанных работ показал, что еще недостаточно изучены такие проблемы как:

- параметры и режимы параллельной работы СФУ с системами электроснабжения;
- влияние солнечной фотоэлектрической установки, работающей параллельно с сетью, на качество электроэнергии на шинах сельскохозяйственного потребителя при различных режимах работы сети.

Вышеуказанное позволяет сделать вывод, что необходимо проводить исследования в области параллельной работы СФУ с электрической сетью и ее влияния на показатели качества электроэнергии на шинах потребителя.

**Цель работы.** Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения сельскохозяйственных потребителей с использованием сетевой солнечной фотоэлектрической установки.

**Объект исследования.** Сетевая солнечная фотоэлектрическая установка малой мощности в системе электроснабжения сельскохозяйственных потребителей.

**Предмет исследования.** Показатели качества электроэнергии (далее – ПКЭ) в системах электроснабжения сельскохозяйственных потребителей с сетевой солнечной фотоэлектрической установкой малой мощности.

**Задачи исследования:**

- выполнить анализ нормативных документов и существующих технических решений по подключению и работе солнечных фотоэлектрических установок параллельно с распределительной электрической сетью;
- разработать математическую и имитационную модель параллельной работы сетевой СФУ с централизованной сетью с возможностью оценки ПКЭ у сельскохозяйственного потребителя;
- выполнить экспериментальное исследование влияния сетевой СФУ на ПКЭ у сельскохозяйственного потребителя в нормальном и аварийном режимах работы сети на базе смонтированной сетевой СФУ малой мощности и разработанной имитационной модели;
- определить допустимые пределы отклонения ПКЭ от нормативных для обеспечения эффективной работы смонтированной сетевой СФУ малой мощности;
- провести технико-экономическую оценку применения сетевой СФУ в системах электроснабжения сельскохозяйственных потребителей.

**Методика исследования:** Научные исследования проводились с использованием математического аппарата теории электротехники и методов инженерного эксперимента, в вычислениях применялись как аналитические, так и численные методы.

**Научная новизна работы состоит в:**

- разработанной математической модели фотоэлектрической батареи, преобразованной относительно тока на выходе фотоэлектрической батареи;
- полученных аналитических зависимостях, подтверждающих снижение отклонения напряжения и коэффициента гармонических искажений по напряжению в системе электроснабжения сельскохозяйственного потребителя с сетевой солнечной фотоэлектрической установкой

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Разработанные математическая и имитационная модели позволяют оценить влияние сетевой СФУ на ПКЭ потребителя электроэнергии.

2. Полученные математическая и имитационная модели сетевой солнечной фотоэлектрической установки приняты и используются в учебном процессе для профессиональной переподготовки и повышения квалификации слушателей Московского института энергобезопасности и энергосбережения и в научных исследованиях института.

3. На основе разработанной программы и положений компания ООО «Авеста +» провела оценку показателей качества электроэнергии на объекте АО «Мерседес-Бенц РУС» и предложила мероприятия по повышению энергоэффективности работы данного объекта. Предложенные мероприятия вошли в перспективный план реконструкции электрической части зданий и сооружений Дворца боевых искусств ЦСКА, в состав которого входит станция технического обслуживания АО «Мерседес-Бенц РУС»;

4. На основе разработанной программы был проведен анализ показателей качества электроэнергии в системе электроснабжения фермерского хозяйства ООО «Тумский двор», который показал отклонение напряжения в пределах 18 % от нормативных показателей. Для повышения энергоэффективности работы предприятия и повышения показателей качества электроэнергии согласован монтаж солнечной фотоэлектрической установки мощностью 5 кВт, которая позволит поддерживать отклонение напряжения в нормативных пределах ( $\pm 5$  %). Монтаж данной установки внесен в программу реконструкции сети электроснабжения фермерского хозяйства и начата закупка оборудования.

**Положения, выносимые на защиту:**

- математическая модель сетевой СФУ малой мощности с распределительной электрической сетью низкого напряжения;
- имитационная модель электроснабжения сельскохозяйственного потребителя от сетевой солнечной фотоэлектрической установки;
- результаты аналитического и экспериментального исследования повышения ПКЭ на шинах потребителя при электроснабжении от сетевой СФУ малой мощности;
- сформированные допустимые пределы отклонения ПКЭ от нормативных по подключению и работе сетевой солнечной фотоэлектрической установки.

**Апробация работы.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на международных и российских научных конференциях, научных семинарах, круглых столах и конкурсах:

- Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 150-летию А.В. Леонтовича, г. Москва, Россия, 03-06 июня 2019 года;
- Международной научно-практической конференции «Приоритеты мировой науки: эксперимент и научная дискуссия», г. Кемерово, Россия, 13 сентября 2019 год (Диплом I степени);
- XXXVI-XXXVII международной научно-практической конференции «Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке», г. Новосибирск, Россия, 10 апреля 2019 год;
- 2nd 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russia, March 12-14, 2020;
- International Conference «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration», Haidian, Beijing, PRC, May 14, 2020;
- Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 150-летию со дня рождения В.П. Горячкина г. Москва, Россия, 06-07 июня 2018 года;
- Международной научно-практической конференции «Обеспечение устойчивого развития в контексте сельского хозяйства, зеленой энергетики, экологии и науки о Земле» (ESDCA 2021);
- Всероссийский конкурс на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых высших учебных заведений Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, Ставрополь, Россия, май 2022 года (Диплом I степени).

**Публикации научных работ.** По теме опубликовано 21 печатная научная работа, в том числе 2 работы в рецензируемых изданиях из перечня ВАК Российской Федерации, 5 работ включены в научную базу Scopus, 13 работ в прочих изданиях, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (№ 2022667930) (7,66 авторских печатных листов).

**Личный вклад соискателя.** Личный вклад соискателя заключается в формулировании задач исследования, адаптации математической модели для проведения экспериментального исследования, разработке имитационной модели, строительстве экспериментальной установки, разработке допустимых пределов ПКЭ эффективной работы солнечной фотоэлектрической установки параллельно с распределительной сетью, в проведении экспериментального исследования на базе смонтированной экспериментальной установки.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, определена степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, получена научная новизна, выведены теоретическая и практическая значимость, выбраны методология и методы исследования, выявлены положения, выносимые на защиту, проведена апробация результатов.

**В первой главе** диссертационной работы проведен анализ современного состояния систем электроснабжения сельскохозяйственных потребителей и актуальности применения в них солнечных фотоэлектрических установок (СФУ) малой мощности, а также анализ нормативных документов и предложений по работе СФУ параллельно с распределительной сетью. Тем самым обоснованы выбор максимальной мощности СФУ (до 15 кВт согласно поправкам в законе «Об электроэнергетике») и выбор потребителя на снабжение которого будут работать подобные установки (крестьянские (фермерские) хозяйства, личные подсобные хозяйства с поголовьем до 40 голов КРС (крупный рогатый скот) и частные теплицы малой площади).

В результате аналитического обзора выявлены основные причины отклонения показателей качества электроэнергии на шинах сельскохозяйственных потребителей (удаление потребителей от распределительной сети, перепады напряжения; пониженное напряжение, аварийное состояние электрических сетей) от указанных в ГОСТ 32144-2013 и возможность влиять на ПКЭ с помощью солнечных фотоэлектрических установок.

Для устранения перечисленных отклонений ПКЭ без использования корректирующих устройств необходимо значительно сократить количество электроприемников и протяженность системы. С учетом постоянного роста потребности в электроэнергии сокращение количества электроприемников не представляется возможным. Сократить протяженность линий электропередачи возможно с помощью подключения к централизованной сети дополнительных генерирующих установок (создание системы распределенной генерации). С учетом подобной схемы электроснабжения сельскохозяйственных потребителей возможны варианты со значительным повышением показателей качества у близкорасположенных потребителей электроэнергии.

Кроме описанных выше характеристик электроэнергии, СФУ может влиять на ПКЭ не только в нормальных режимах работы централизованной сети, но и в аварийных и временно допустимых режимах работы централизованной сети.

**Во второй главе** представлены разработанные математическая и имитационная модель параллельной работы СФУ с распределительной электрической сетью. Аналитически показано влияние СФУ на показатели качества электроэнергии у сельскохозяйственных потребителей.

Модель фотоэлектрического модуля (далее – ФМ) разрабатывалась на основе традиционной однодиодной схемы замещения. Так как ко входу инвертора подключается фотоэлектрическая батарея (далее – ФБ), то необходимо учесть количество фотоэлектрических модулей и схему их соединения в ФБ. В известной формуле вольт-амперной характеристики ФБ ток на выходе батареи присутствует в обеих частях уравнения, что усложняет дальнейшее применение данной формулы. Для более точного описания зависимости тока на выходе ФБ от напряжения преобразуем известную формулу относительно тока  $I$ . Тогда доработанная математическая модель ФБ будет иметь вид:

$$I_B = \left( \frac{I_\Phi + I_0}{I_0} - \frac{U}{N_{\text{пар}}^2 R_{\text{пар}} I_0} \right) e^{\left( -\frac{q}{AkTN_{\text{пос}}} \right) U}, \quad (1)$$

где  $I_B$  – ток на выходе ФБ (А),  $I_B = I + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{a^{n-1} I^n}{(n-1)!}$ ;  $I_\Phi$  – фототок (А),  $I_0$  – ток насыщения диода (А),  $q$  – заряд электрона (Кл),  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;  $R_{\text{пос}}$  – последовательное сопротивление (Ом),  $A$  – фактор неидеальности диода;  $k$  – постоянная Больцмана (Дж/К),  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К,  $R_{\text{пар}}$  – шунтирующее сопротивление (Ом);  $N_{\text{пос}}$  – количество фотоэлектрических модулей в цепочке, соединенных последовательно (шт),  $N_{\text{пар}}$  – количество цепочек фотоэлектрических модулей, соединенных параллельно (шт),  $a$  – параметрический коэффициент,  $a = \frac{R_{\text{пос}}}{N_{\text{пар}} AkT}$ .

Далее повышающий преобразователь поднимает низкое напряжение, поступившее от ФБ, до уровня, соответствующего максимальной (оптимальной) мощности СФУ. Уравнение, описывающее работу преобразователя, можно представить как:

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{мин}} \eta}{1 - D}, \quad (2)$$

где  $D$  – коэффициент заполнения,  $U_{\text{мин}}$  – минимальное значение напряжения на выходе ФБ (В),  $\eta$  – коэффициент полезного действия повышающего преобразователя.

ФБ через инвертор с повышающим преобразователем постоянного тока подключается к сети переменного тока. Инвертор используется для преобразования постоянного тока и напряжения от СФУ в переменные, выравнивания и модуляции выходного напряжения в соответствии с напряжением сети. Использованная схема трехфазного инвертора, преобразующего напряжение от СФУ, показана на рисунке 1.

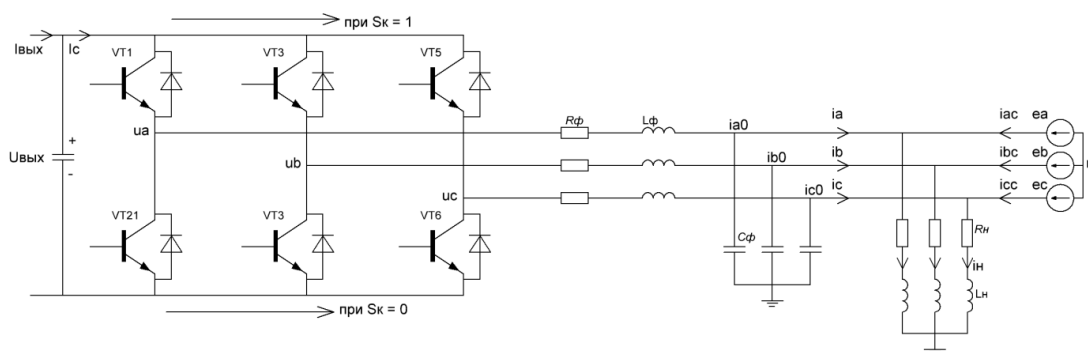


Рисунок 1 – Схема трехфазного сетевого инвертора

Вход инвертора представлен конденсатором, а распределительная сеть представлена трехфазными источниками напряжения, где  $U_{\text{вых}}$  – напряжение на входе инвертора после повышающего преобразователя (В),  $L_\Phi$  – катушка индуктивности фильтра (мГн),  $R_\Phi$  – эквивалентное сопротивление фильтра (Ом),  $L_H$  – индуктивность нагрузки (мГн),  $R_H$  – эквивалентное сопротивление нагрузки (Ом)  $i_a$ ,  $i_b$  и  $i_c$  – выходной фазный ток инвертора (А),  $i_{a0}$ ,  $i_{b0}$  и  $i_{c0}$  – токи фильтра (А),  $e_a$ ,  $e_b$  и  $e_c$  – напряжение распределительной сети (В),  $u_a$ ,  $u_b$  и  $u_c$  – фазные



напряжения на выходе инвертора (В),  $i_{\text{вых}}$  – ток на выходе инвертора (А),  $i_c$  – ток на выходе инвертора (А),  $i_n$  – суммарный ток нагрузки от СФУ и сети (А). Определим функцию переключения транзисторов  $S_k$  ( $k = a, b, c$ ): при  $S_k = 1$  – открыты транзисторы верхнего плеча инвертора, при  $S_k = 0$  – открыты транзисторы нижнего плеча инвертора. Используя рисунок 1, составим схему замещения для фазы А инвертора (рисунок 2).

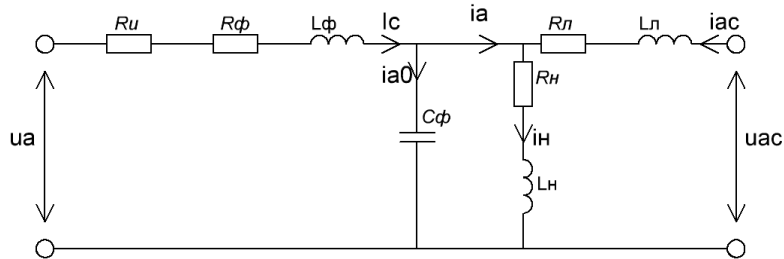


Рисунок 2 – Схема замещения фазы А

В схеме замещения  $u_{ac}$  – напряжение фазы А на шинах трансформатора 10/0,4 кВ (В).

При направлениях напряжения и тока, показанных на рисунке 2, и в соответствии с первым и вторым законами Кирхгофа запишем математическую модель фазы А инвертора, основанную на функции переключения инвертора, подключенного к сети, и входных параметрах инвертора (1,2):

$$\begin{cases} i_n = i_a + i_{ac}; \\ i_a = i_c - i_{a0}; \\ u_a = i_c R_{\text{и}} + i_c R_{\text{ф}} + L_{\text{ф}} \frac{di_c}{dt} + \frac{1}{C} \int i_c(t) dt; \\ \frac{1}{C} \int i_c(t) dt = i_n R_{\text{н}} + L_{\text{н}} \frac{di_n}{dt}; \\ u_{ac} = i_{ac} R_{\text{л}} + L_{\text{л}} \frac{di_{ac}}{dt} + i_n R_{\text{н}} + L_{\text{н}} \frac{di_n}{dt}. \end{cases} \quad (3)$$

Упростим зависимости, описывающие напряжения:

$$\begin{cases} u_a = i_c R_{\text{и}} + i_c R_{\text{ф}} + L_{\text{ф}} \frac{di_c}{dt} + i_n R_{\text{н}} + L_{\text{н}} \frac{di_n}{dt}; \\ u_{ac} = i_{ac} R_{\text{л}} + L_{\text{л}} \frac{di_{ac}}{dt} + i_n R_{\text{н}} + L_{\text{н}} \frac{di_n}{dt}. \end{cases} \quad (4)$$

В системе (4)  $i_n R_{\text{н}} + L_{\text{н}} \frac{di_n}{dt} = u_n$  – напряжение активно-индуктивной нагрузки. Преобразуем систему относительно напряжения нагрузки:

$$\begin{cases} u_n = u_a - \left( i_c R_{\text{и}} + i_c R_{\text{ф}} + L_{\text{ф}} \frac{di_c}{dt} \right); \\ u_n = u_{ac} - \left( i_{ac} R_{\text{л}} + L_{\text{л}} \frac{di_{ac}}{dt} \right). \end{cases} \quad (5)$$

Из системы (5) получим уравнение, описывающее взаимосвязь между постоянным напряжением на входе инвертора, напряжением сети и напряжением потребителя электроэнергии:

$$2u_{\text{н}} = u_{\text{а}} - \left( i_{\text{с}}R_{\text{и}} + i_{\text{с}}R_{\text{ф}} + L_{\text{ф}} \frac{di_{\text{с}}}{dt} \right) + u_{\text{ас}} - \left( i_{\text{ас}}R_{\text{л}} + L_{\text{л}} \frac{di_{\text{ас}}}{dt} \right); \quad (6)$$

$$u_{\text{н}} = \frac{1}{2}(u_{\text{а}} + u_{\text{ас}}) - \frac{1}{2} \left( i_{\text{с}}R_{\text{и}} + i_{\text{с}}R_{\text{ф}} + L_{\text{ф}} \frac{di_{\text{с}}}{dt} + i_{\text{ас}}R_{\text{л}} + L_{\text{л}} \frac{di_{\text{ас}}}{dt} \right), \quad (7)$$

где  $u_{\text{а}} = kU_{\text{ввых}} \sin(\omega t + \varphi_{\text{а}})$  – напряжение на выходе инвертора с учетом функции переключения транзисторов и постоянного напряжения на входе инвертора (В);

$\Delta U_{\text{и}} = i_{\text{с}}R_{\text{и}}$  – потери на внутреннее сопротивление инвертора (В);

$U_{\text{ф}} = i_{\text{с}}R_{\text{ф}} + L_{\text{ф}} \frac{di_{\text{с}}}{dt}$  – напряжение пассивного фильтра гармоник (В);

$\Delta U_{\text{с}} = i_{\text{ас}}R_{\text{л}} + L_{\text{л}} \frac{di_{\text{ас}}}{dt}$  – потери в линии электропередачи (В).

Запишем уравнение (7) с учетом введенных переменных:

$$u_{\text{н}} = \frac{1}{2}(u_{\text{а}} + u_{\text{ас}}) - \frac{1}{2}(\Delta U_{\text{и}} + U_{\text{ф}} + \Delta U_{\text{с}}). \quad (8)$$

Для фаз В и С получим аналогичные уравнения, тогда уравнение трехфазной системы для напряжения нагрузки у потребителя будет записано так:

$$\begin{cases} u_{\text{нА}} = \frac{1}{2}(u_{\text{А}} + u_{\text{Ас}}) - \frac{1}{2}(\Delta U_{\text{и}} + U_{\text{ф}} + \Delta U_{\text{с}}); \\ u_{\text{нВ}} = \frac{1}{2}(u_{\text{В}} + u_{\text{Вс}}) - \frac{1}{2}(\Delta U_{\text{и}} + U_{\text{ф}} + \Delta U_{\text{с}}); \\ u_{\text{нС}} = \frac{1}{2}(u_{\text{С}} + u_{\text{Сс}}) - \frac{1}{2}(\Delta U_{\text{и}} + U_{\text{ф}} + \Delta U_{\text{с}}). \end{cases} \quad (9)$$

Данная система уравнений описывает взаимосвязь между постоянными током и напряжением, приходящими на инвертор от ФБ после повышающего преобразователя, и переменными током и напряжением на выходе инвертора, с учетом параметров централизованной сети.

Рассмотрим влияние СФУ на отклонение напряжения у потребителя электроэнергии и на гармонические искажения напряжения. Заменим напряжение фазы А инвертора и напряжение сети на соответствующие синусоидальные зависимости. Тогда аналитическая зависимость влияния СФУ малой мощности на отклонение напряжения на шинах сельскохозяйственного потребителя имеет вид:

$$u_{\text{н}} = \frac{(kU_{\text{ввых}} + U_{\text{с1}}) \sin(\omega t + \varphi_{\text{а}}) + U_{\text{с0}} + \sum_{n=1}^{\infty} U_{\text{сn}} \sin(n\omega t + \varphi_{\text{н}})}{2} - \frac{(\Delta U_{\text{и}} + U_{\text{ф}} + \Delta U_{\text{с}})}{2}. \quad (10)$$

На основании уравнения (10) можно составить аналитическую зависимость влияния СФУ на гармоническую составляющую напряжения на шинах потребителя:

$$TDH_{\text{v}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_{\text{с2}}}{2\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_{\text{с3}}}{2\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_{\text{с4}}}{2\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_{\text{с5}}}{2\sqrt{2}}\right)^2 + \dots}}{\frac{kU_{\text{ввых}} + U_{\text{с1}}}{2\sqrt{2}}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_{\text{сn}}^2}}{kU_{\text{ввых}} + U_{\text{с1}}}. \quad (11)$$

На основании системы уравнений (10) можно сделать вывод о снижении влияния потерь напряжения в линии электропередачи на напряжение у потребителя электрической энергии и снижении отклонения напряжения у потребителя за счет СФУ. Из уравнения (11) видно снижение коэффициента гармонических искажений за счет дополнительного напряжения в первой гармонике.

На основе разработанной математической модели СФУ малой мощности, работающей параллельно с распределительной сетью, в программном комплексе Simulink разработана имитационная модель работы СФУ, параллельно с сельскими сетями (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022667930). Структурная схема имитационной модели представлена на рисунке 3.

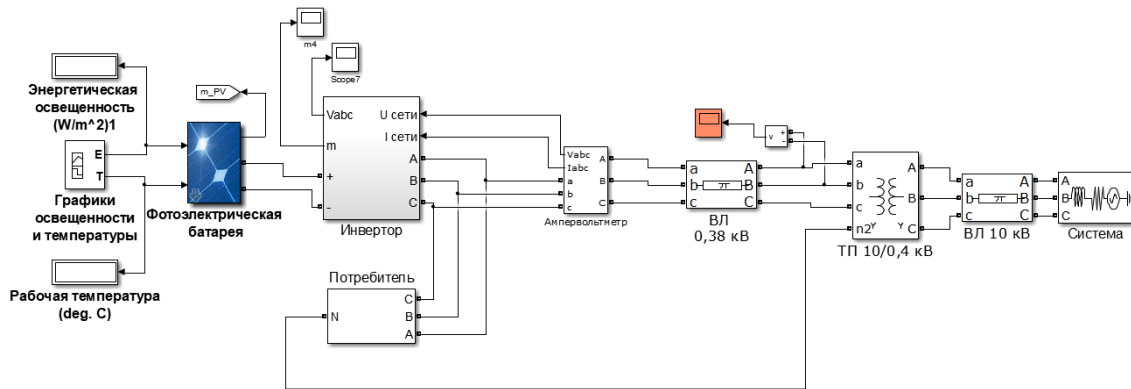


Рисунок 3 – Структурная схема имитационной модели СФУ, работающей параллельно с распределительной сетью

Модель состоит из следующих блоков: ФБ; инвертора, включающего повышающий преобразователь постоянного тока, устройство слежения за точкой максимальной мощности (MPPT-контроллера) и управление инвертором; потребителя электрической энергии; линии 0,38 кВ; трансформатора 10/0,4 кВ; линии 10 кВ и генерирующей системы.

Особенности модели:

Энергетическая освещенность и рабочая температура фотоэлектрических модулей задается вручную графиком. Такой способ установки данных выбран для получения возможности оценить эффективность работы СФУ при различных критических и промежуточных значений входных сигналов. Модель позволяет выбирать типы фотоэлектрических модулей из предложенного списка. При выборе фотоэлектрических модулей происходит автоматическая смена рабочих характеристик. Рабочие характеристики фотоэлектрических модулей взяты из паспортных данных. Также модель позволяет учесть количество фотоэлектрических модулей и конфигурацию их соединения в ФБ: какое количество фотоэлектрических модулей в цепочке соединено последовательно и сколько таких цепочек соединено параллельно. На сегодня модель учитывает возможность соединения модулей последовательно, параллельно и последовательно-параллельно.

Модель определяет влияние энергетической освещенности на эффективность работы фотоэлектрических модулей и ФБ на основе заданного семейства ВАХ данного типа фотоэлектрических модулей, собранных в ФБ. Аналогично учитывается влияние рабочей температуры ФБ.

В модели приняты следующие допущения:

- характеристики и свойства ФМ соответствуют заявленным в технической документации;

- СФУ спроектирована таким образом, что отсутствует затенение от соседних объектов;
- небольшая общая площадь рабочей поверхности всех модулей ФБ, их размещение и особенности монтажных конструкций позволяют считать, что рабочая температура в любой точке фотоэлектрических модулей равна задаваемому значению;
- отклонение рабочей температуры модулей от заданного значения находится в допустимых пределах и их можно не учитывать при моделировании;
- по мере необходимости проводятся процедуры по очистке рабочих поверхностей ФМ и других поверхностей ФМ, загрязнение которых может повлиять на выходные характеристики (например, на температуру ФМ), а также проводится контроль состояния ФМ (повреждение птицами, градом и т. п.).

**В третье главе** представлена экспериментальная СФУ и выходные параметры ее работы. Установка спроектирована и смонтирована в Саратовской области (51.750065 с.ш, 42.758712 в.д). Согласно данным NASA количество солнечных дней в данной местности – 86, количество солнечных часов в год – 2054, на 4 мая 2021 года по указанным координатам максимальная величина энергетической освещенности составила  $670,75 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ , минимальная величина –  $11,06 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ ; максимальное значение температуры в дневное время –  $13^\circ\text{C}$ , минимальное значение –  $7^\circ\text{C}$ ; среднесуточная скорость ветра на высоте 2 метра – 5,26 м/с.

Схема экспериментальной СФУ представлена на рисунке 4. СФУ включает 4 солнечных монокристаллические кремниевых модуля марки TWSolar TW310MWP-60-N мощностью 310 Вт каждый (рисунок 5а). Один модуль содержит в себе 60 солнечных элементов. Коэффициент полезного действия модуля составляет 18,94 %. Для каждого ФМ собран собственный твердый неподвижный каркас, обеспечивающий угол наклона панели в  $30^\circ$ .

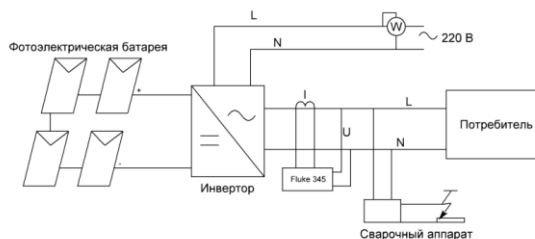


Рисунок 4 – Солнечная фотоэлектрическая установка

Модули соединены последовательно. Соединение модулей выполнено с помощью стандартных коннекторов MC4. Данные коннекторы обеспечивают герметичность соединения панелей, а также его надежность, скорость и простоту выполнения. Для преобразования постоянного тока в переменный выбран инвертор марки Sofar 1100TL-G3 производства компании Sofar Solar (рисунок 5б). Установленная мощность инвертора – 1,1 кВт.



а) солнечные фотоэлектрические модули



б) инвертор

Рисунок 5 – Оборудование СФУ малой мощности

Инвертор включен непосредственно в электрическую сеть дома после счетчика электрической энергии. Передача данных с инвертора о выработанной энергии, параметрах на выходе инвертора (напряжении, частоте, токе, мгновенной мощности), ошибках в работе, а также о входных параметрах энергии с батареи передаются с помощью Wi-Fi в интернет на сайт [solarmanpv.com](http://solarmanpv.com), где автоматически строятся графики выработки электроэнергии (дневные, месячные, годовые) и формируется ежедневный отчет о рабочих параметрах установки на входе и выходе инвертора.

В таблице 1 представлены результаты сравнения параметров качества электроэнергии на выходе экспериментальной СФУ и разработанной имитационной модели.

Таблица 1 – Сравнительный анализ показателей качества электроэнергии

$t, \text{ч}$	СФУ			Модель			$\delta, \%$		
	$U, \text{В}$	$TDHu, \%$	$\cos\varphi$	$U, \text{В}$	$TDHu, \%$	$\cos\varphi$	$\delta u, \%$	$\delta tdh, \%$	$\delta \cos, \%$
11.00	227,1	2,7	0,989	230,2	2,8	0,981	1,365	3,703	0,808
12.00	227,7	2,9	0,994	231,3	3	0,993	1,581	3,448	0,101
13.00	223,1	3,4	0,973	227,5	3,6	0,985	1,972	5,882	1,233
14.00	232,4	2,5	0,997	229,6	2,6	0,989	1,204	4	0,802
15.00	233	3,1	0,997	231,8	2,9	0,993	0,515	6,451	0,401
16.00	227,6	3	0,996	224,6	3,2	0,999	1,318	6,666	0,301

Графические данные по расчету погрешности измерения показателей качества электроэнергии в разработанной модели представлены на рисунке 6.

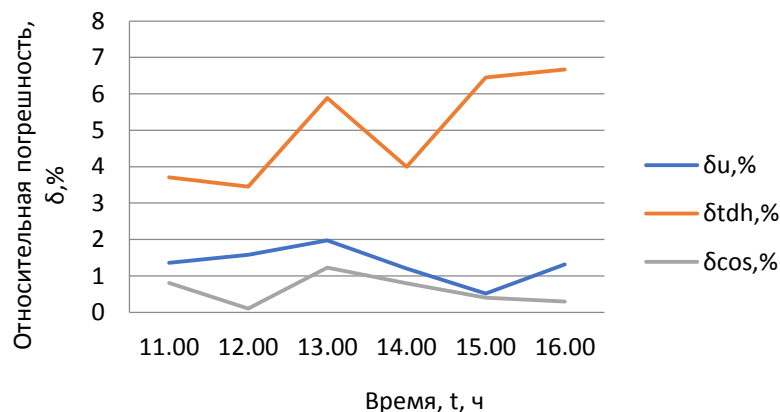


Рисунок 6 – Погрешность определения показателей качества электроэнергии

Относительная погрешность в данном случае не превышает 2 % при измерении напряжения и коэффициента мощности на модели и не превышает 7 % при измерении коэффициента гармонических искажений.

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментального исследования влияния СФУ на параметры качества электроэнергии у сельскохозяйственного потребителя в различных режимах работы распределительной электрической сети.

Кроме СФУ в схему были подключены электронный осциллограф OWON и анализатор качества электрической энергии Fluke 345 (подключен на шинах инвертора) для анализа качества электроэнергии в нормальном режиме работы централизованной сети и сварочный аппарат, для анализа влияния СЭС на качество электроэнергии в ненормальных режимах работы централизованной сети. Эксперимент проводился в несколько этапов. На первом этапе с помощью прибора были записаны изменения тока, напряжения, мощности (активной, реактивной и полной) и гармонические искажения (напряжения и тока) при работающей параллельно с сетью солнечной в фотоэлектрической установке и сняты осциллограммы напряжения при работающей и отключенной СФУ. В данном эксперименте изучалось несколько режимов работы СФУ:

- 1) СФУ выдает энергию только потребителю;
- 2) СФУ выдает энергию потребителю и в сеть.

На основе графиков, полученных с помощью Fluke 345, составлены таблицы с основными показателями качества электроэнергии. По графикам видно, что при работе СЭС происходит сглаживание пиковых значений напряжения. В таблице 2 представлены максимальные и минимальные значения напряжения.

Таблица 2 – Отклонения напряжений у потребителя

СФУ работает на потребителя		СФУ работает на потребителя и сеть		СФУ отключена	
$U_{\min}$ , В	$U_{\max}$ , В	$U_{\min}$ , В	$U_{\max}$ , В	$U_{\min}$ , В	$U_{\max}$ , В
214,9	234,3	216,6	235,4	212,1	240,3
$f_{\min}$ , Гц	$f_{\max}$ , Гц	$f_{\min}$ , Гц	$f_{\max}$ , Гц	$f_{\min}$ , Гц	$f_{\max}$ , Гц
49,9	50	49,9	50	49,9	50

Согласно данным таблицы 3 при работающей СФУ заметно значительное снижение коэффициента гармонических искажений  $TDH_U$  на 1,6 % как четных, так и нечетных гармоник.

Таблица 3 – Гармонические искажения напряжения у потребителя

	Станция работает		Станция отключена	
	min	max	min	max
$I$	2	3	4	5
$TDH_U$	0,1%	4%	1,2%	4,5%
2 гармоника	0%	4%	0%	1,6%
3 гармоника	0,5%	3%	0%	4,4%
4 гармоника	0%	0,7%	0%	0,8%
5 гармоника	1,4%	3,6%	0,9%	2,9%
6 гармоника	0%	0,2%	0%	0,5%

7 гармоника	0%	1,7%	0%	1,5%
8 гармоника	0%	0,4%	0%	0,4%
9 гармоника	0%	1,2%	0%	0,9%
10 гармоника	0%	0%	0%	0%
11 гармоника	0%	0,6%	0%	0,5%

Для оценки влияния станции на качество электроэнергии исследовалась работа установки при ненормальных режимах работы централизованной сети.

Результаты опыта по изменению напряжения при работающей и отключенной СФУ, представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Отклонения напряжения при ненормальных режимах работы в сети.

Станция работает на потребителя		Станция отключена	
$U_{\min}$ , В	$U_{\max}$ , В	$U_{\min}$ , В	$U_{\max}$ , В
191,3	234,5	158,7	225,4
$f_{\min}$ , Гц	$f_{\max}$ , Гц	$f_{\min}$ , Гц	$f_{\max}$ , Гц
49,9	50	49,9	50,1

Согласно данным таблицы 4 при работающей солнечной электростанции отклонение напряжение у потребителя заметно ниже (порядка 33 В), при работающем сварочном аппарате. Сетевая солнечная электростанция при снижении напряжения в централизованной сети не отключается и продолжает вырабатывать электроэнергию.

В таблице 5 представлены гармонические искажения при работающей солнечной электростанции и работающем сварочном аппарате.

Таблица 5 – Гармонические искажения напряжения у потребителя

	Станция работает		Станция отключена	
	min	max	min	max
$TDH_U$	2,2%	3,4%	2,7%	4,5%
2 гармоника	0%	7,2%	0%	8,7%
3 гармоника	1%	5,9%	1,1%	5,3%
4 гармоника	0%	1,4%	0%	3,2%
5 гармоника	1,8%	4,4%	2,3%	4%
6 гармоника	0%	2,1%	0%	1%
7 гармоника	0,4%	1,4%	0,5%	2%
8 гармоника	0%	0,9%	0%	0,4%
9 гармоника	1%	1,4%	0,5%	0,9%
10 гармоника	0%	0%	0%	0%
11 гармоника	0%	0,4%	0,4%	0,7%

Кроме результатов, полученных от анализатора качества электроэнергии, проводился анализ осциллограмм напряжения при электроснабжении потребителя только от электрической сети и от электрической сети и СФУ. При снятии осциллограмм шаг дискретизации составил 5 микросекунд, период – 20 миллисекунд. Для сравнения двух полученных синусоидальных сигналов проведем спектральный анализ сигналов с помощью быстрого преобразования Фурье, доступного в Microsoft Excel. Результат спектрального анализа одного

периода синусоид в полосе пропускания 50 Гц (1 гармоника) – 1250 Гц (25 гармоника) представлен на рисунке 7.

Совмещенный спектр гармоник со 2 по 25

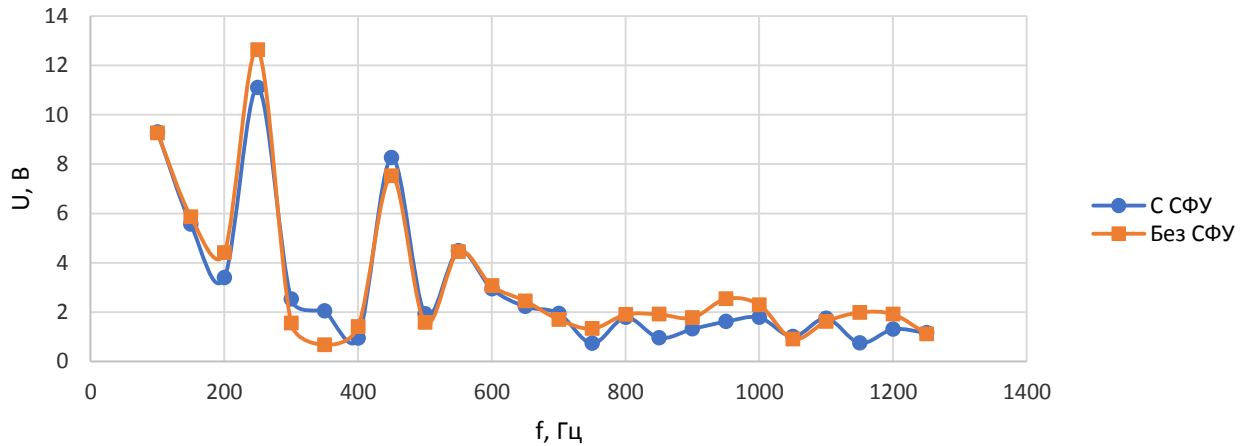
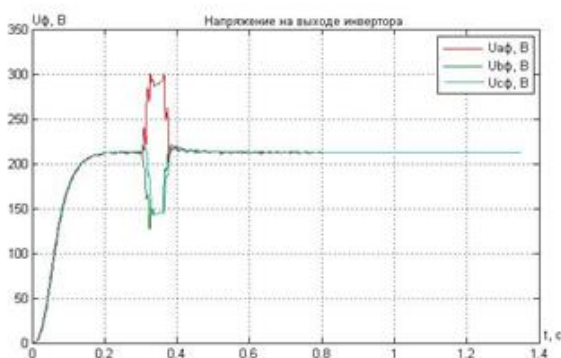


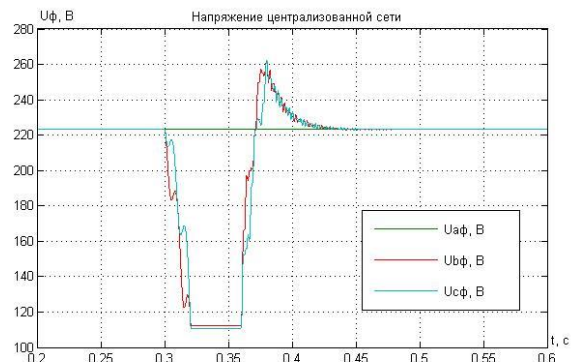
Рисунок 7 – Спектральный анализ напряжения у потребителя электроэнергии

Согласно графику на рисунке 7 при работающей СФУ заметно снижение амплитудных значений гармонических искажений напряжения для 3-5, 12, 13, 15-20 и 23-24 гармоник и рост для 6, 7, 10 гармоник. Однако, снижение коэффициента гармонических искажений аналогично данным, полученным с помощью анализатора качества электроэнергии (1,5 %).

При двухфазном КЗ токи и напряжения разных фаз неодинаковы. Рассмотрим соотношения токов и напряжений, характерные для двухфазного КЗ между фазами  $B$  и  $C$ . При таком замыкании напряжение между поврежденными фазами  $B$  и  $C$  на выходе инвертора снизится до 150 В, а напряжение в неповрежденной фазе  $A$  поднимется до 300 В (рисунок 8а). Напряжение в централизованной сети в поврежденных фазах снизится до 120 В, в неповрежденной фазе напряжение не изменится (рисунок 8б). При снятии короткого замыкания происходит незначительный скачок напряжения (до 260 В) в поврежденных фазах в централизованной сети и кратковременный переходный процесс (приблизительно 0,1 секунды). На выходе инвертора напряжение при снятии КЗ возвращается к номинальному.



а)



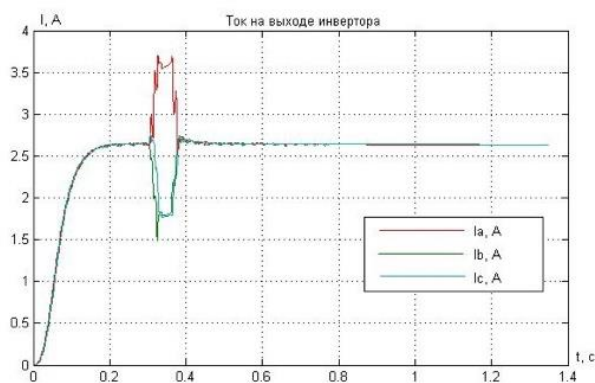
б)

Рисунок 8 – Напряжение при двухфазном КЗ: а) шины инвертора; б) централизованная сеть

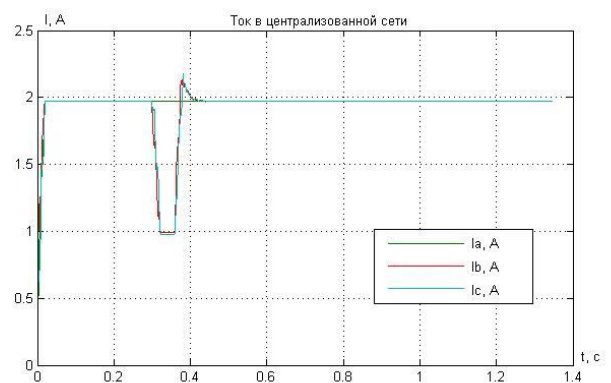


На основании рисунка 8 можно сделать вывод, что суммарное напряжение у потребителя электрической энергии будет выше, чем в централизованной сети, за счет добавочного напряжения от СФУ

Проанализируем, как ведет себя ток в фазе  $A$  на выходе инвертора. Согласно проведенному моделированию, ток в поврежденных фазах незначительно снижается (рисунок 9а), но при этом наблюдается отсутствие ударного тока. Ток в неповрежденной фазе на выходе инвертора незначительно вырастет (приблизительно до 3,5 А). Ток в централизованной сети в неповрежденной фазе остаётся неизменным, а в поврежденных фазах снижается приблизительно в 2 раза (рисунок 9б). При снятии короткого замыкания происходит незначительный скачок тока в поврежденных фазах в централизованной сети и выравнивание тока на инверторе. При этом суммарный ток у потребителя электроэнергии будет выше тока в централизованной сети.



а)



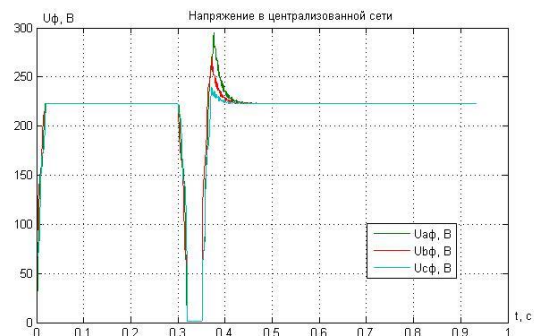
б)

Рисунок 9 – Ток при двухфазном КЗ: а) шины инвертора; б) централизованная сеть

Симметричное трехфазное короткое замыкание – наиболее простой для расчета и анализа вид повреждения. Он характерен тем, что токи и напряжения всех фаз равны по значению как в месте КЗ, так и в любой другой точке сети. В данном случае напряжение на выходе инвертора на замкнутых фазах аналогично значениям при двухфазном коротком замыкании (рисунок 10а). В централизованной сети напряжение снижается до нуля (рисунок 10б) и после снятия короткого замыкания наблюдается повышение напряжения по всем трем фазам в пределах 300 В и переходный процесс приблизительно 0,15 секунды.



а)



б)

Рисунок 10 – Напряжение при трехфазном КЗ: а) шины инвертора; б) централизованная сеть

Токи при трехфазном коротком замыкании в централизованной сети так же снижаются до 0, причем при появлении короткого замыкания в сети отсутствует ударный ток (рисунок 11б). Фазные токи инвертора в момент короткого замыкания незначительно снижаются. В данном случае не отключенная от сети солнечная электростанция выступает в качестве подпитки коротко замыкания.

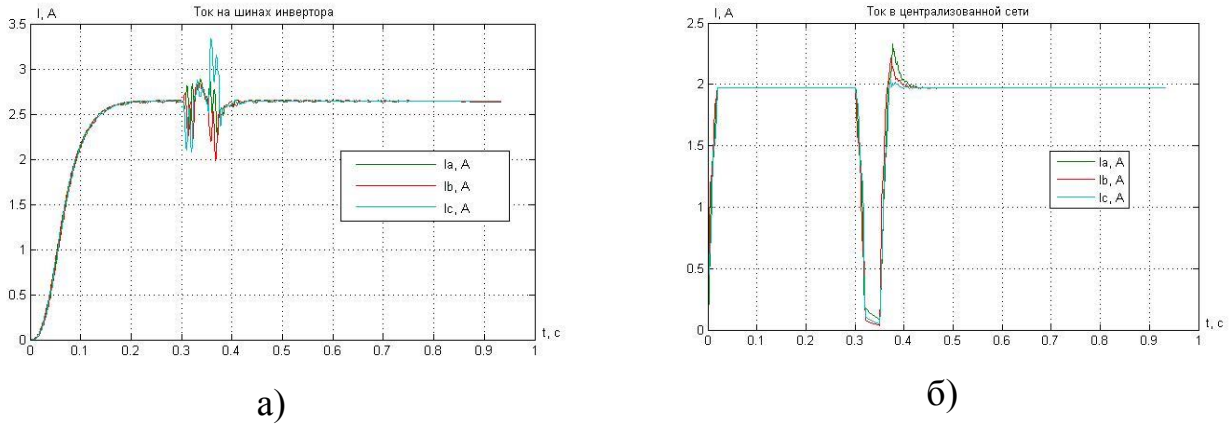


Рисунок 11 – Ток при трехфазном КЗ: а) фаза А инвертора; б) потребитель

Таким образом, даже при трехфазном КЗ мы получаем повышение напряжения у потребителя электрической энергии. На основании этого можно сделать вывод о повышении качества электроэнергии у сельскохозяйственного потребителя при аварийных режимах работы сети.

При параллельной работе с распределительной электрической сетью СФУ снижает потребление электрической энергии из распределительной сети сельскохозяйственным потребителем. Согласно полученным данным от действующей СФУ, построенной в Саратовской области и снабжающей частный дом, установка мощностью 1,1 кВт может сгенерировать 2,04 МВт\*ч электроэнергии за год эксплуатации. Срок окупаемости подобной СФУ будет рассчитывать согласно:

$$CO = \frac{C_{СФУ}}{C_{ЭК}}, \quad (11)$$

где  $C_{ЭК}$  – годовая экономия на оплате электроэнергии, потребленной из сети, руб./год;

$C_{СФУ}$  – стоимость солнечной фотоэлектрической установки, руб.

Стоимость СФУ будет складываться из стоимости генерирующего и коммутационного оборудования:

$$C_{СФУ} = C_{ФМ} + C_{и} + C_{ком.об}, \quad (12)$$

где  $C_{ФМ}$  – стоимость фотоэлектрических модулей, руб.;

$C_{и}$  – стоимость инвертора, руб.;

$C_{ком.об}$  – стоимость коммутационного оборудования, руб.

Данные по стоимости оборудования представлены в таблице 6.

Годовая экономия по оплате за электроэнергию рассчитывается согласно:

$$C_{ЭК} = W \cdot T, \quad (13)$$

где  $W$  – количество электроэнергии, выработанной СФУ за год, кВт\*ч/год;

$T$  – тариф на электроэнергию, руб./кВт\*ч.

$$C_{\text{эк}} = 2040 \cdot 4,2 = 8568 \text{ руб./год}$$

Таблица 6 – Стоимость СФУ

Наименование	Марка	Кол-во, шт.	Стоимость за ед., руб.	Сумма, руб.
Инвертор SofarSolar	Sofar 1100TL – G3	1	30939	30939
Фотоэлектрические модули TW Solar	TW 310 MWP-60-H	4	12500	50000
Кабель	FR-Cable 4 мм <sup>2</sup>	5	83	415
Коннекторы	МС-4	5	90	450
Итого				81804

Тогда срок окупаемости СФУ составит:

$$CO = \frac{81804}{8568} \approx 9 \text{ лет.}$$

При таком сроке окупаемости с 10 года эксплуатации СФУ начнет приносить прибыль с учетом срока службы фотоэлектрических модулей – 25-30 лет и инвертора – 25 лет.

### Заключение

В процессе работы дано решение актуальной задачи повышения качества электроэнергии за счет электроснабжения сельскохозяйственного потребителя от СФУ, параллельно с централизованной сетью и получены следующие результаты:

1. Проведенный анализ существующих технических решений и нормативных документов, связанных с подключением и параллельной работой солнечных фотоэлектрических установок малой мощности и распределительной сети показал, что:

- основные технические и нормативные ограничения распространяются на СФУ, работающих в системах электроснабжения 6 кВ и более;
- в соответствии с поправками в законе «Об электроэнергетике» от 27 декабря 2019 года частные СФУ могут быть подключены только к распределительной сети напряжением 0,38 кВ с ограничением мощности, выдаваемой в сеть до 15 кВт;
- не проводились исследования влияния СФУ малой мощности на ПКЭ на шинах потребителя на реальных объектах.

2. Разработана математическая модель СФУ малой мощности, работающей параллельно с распределительной электрической сетью низкого напряжения, с оценкой влияния СФУ на показатели качества электроэнергии на шинах сельскохозяйственного потребителя. В частности, аналитически доказано снижение отклонения напряжения за счет снижения потерь электроэнергии в питающей линии и напряжения от инвертора и снижение коэффициента гармонических искажений за счет увеличения напряжения первой (основной) гармоники. На базе математической модели разработана имитационная модель параллельной работы СФУ малой мощности с распределительной сетью низкого напряжения, с возможностью проектирования СФУ и оценки ПКЭ на шинах сельскохозяйственного потребителя.

3. Разработана экспериментальная СФУ, на базе которой проведено экспериментальное исследование влияния СФУ на ПКЭ у сельскохозяйственного потребителя в нормальном и аварийном режиме работы сети. Экспериментально

установлено снижение отклонения порядка 4 % от номинального напряжения и снижение коэффициента гармонических искажений по напряжению порядка 1,6 % при нормальном и временно допустимом режимах работы сети и работающей СФУ, кроме того, при временно допустимом режиме работы снизилось отклонение частоты на 0,1 Гц. При аварийном режиме работы сети зафиксировано меньшее снижение напряжения от номинального при работающей солнечной электростанции (184,3 В), чем при отключенной (158,7 В).

4. На основе результатов проведенного теоретического и экспериментального исследований определены допустимые пределы отклонения ПКЭ от номинальных значений для работы СФУ, параллельно с распределительной электрической сетью, при электроснабжении сельскохозяйственного потребителя. Согласно полученным данным для обеспечения эффективной работы СФУ при отклонении напряжения в распределительной сети  $\pm 10$  % от номинального или при отклонении частоты  $\pm 0,2$  Гц солнечная фотоэлектрическая установка может работать без ограничений по времени, при отклонении напряжения в распределительной сети  $\pm 20$  % от номинального или при отклонении частоты  $\pm 0,4$  Гц время отключения солнечной электростанции от сети должно составлять 5 секунд.

5. Проведенная технико-экономическая оценка работы СФУ малой мощности параллельно с распределительной сетью показала, что при эксплуатации СФУ малой в Саратовской области за год данная установка способна сгенерировать 2,04 МВт·ч электроэнергии. Тогда годовая экономия за счет снижения потребления электроэнергии из централизованной сети составит 8568 рублей, а срок окупаемости СФУ составит 9 лет.

#### **Перспективы дальнейшей разработки темы исследования и рекомендации:**

Планируется дальнейшее проведение исследований работы СФУ малой мощности параллельно с централизованной сетью и доработка созданной имитационной модели. В модели предполагается учесть влияние условий окружающей среды (диффузное излучение солнца, влияние ветра на естественно охлаждение модулей).

## Список работ, опубликованных по теме диссертации

### *Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных перечнем ВАК Российской Федерации*

1. Лештаев, О.В. Анализ показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения с сетевыми солнечными электростанциями малой мощности [Текст] / О.В. Лештаев, Н.А. Стушкина, В.И. Загинайлов // Международный технико-экономический журнал. – 2019. – № 5. – С. 48-53. – 0,3 п.л. (авт. 0,2 п.л.).
2. Загинайлов, В.И. Оценка эффективности работы системы электроэнергетической системы с распределенной генерацией [Текст] / В.И. Загинайлов, Т.А. Мамедов, Н.А. Стушкина, О.В. Лештаев // Международный технико-экономический журнал. – 2022. – № 4. – С. 147-159. – 0,7 п.л. (авт. 0,3 п.л.).

### *Публикации в изданиях, индексируемых в международных цитатно-аналитических базах данных*

1. Лештаев, О.В. Solar power station model in Matlab Simulink program / О.В. Лештаев, Н.А. Стушкина, В.И. Загинайлов, Н.А. Сергеева // 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – 2020. – 0,3 п.л. (авт. 0,2 п.л.).
2. Лештаев, О.В. Analysis of energy quality in power supply system with grid-connected solar power plants / О.В. Лештаев, Н.А. Стушкина, В.И. Загинайлов // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science – 2021. – 808(1). – 012004. – 0,3 п.л. (авт. 0,2 п.л.).
3. Лештаев, О.В. Power supply system for electrical installations with electrical converters, grid, generator and solar sources / О.В. Лештаев, В.Г. Ляпин, А.Е. Гафиев, Е.В. Колмурзина, Н.А. Стушкина // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – 808(1). – 012016. – 0,3 п.л. (авт. 0,2 п.л.).
4. Лештаев, О.В. Analysis of power supply options for a stable from solar power plant / О.В. Лештаев, Н.Е. Ртищева, К.П. Ртищев // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – 808(1). – 012013. – 0,3 п.л. (авт. 0,2 п.л.).
5. Лештаев, О.В. Electricity metering in power supply systems with grid-connected solar power plants / О.В. Лештаев, Н.А. Стушкина, В.И. Загинайлов // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – 723 (5). – 052012. – 0,3 п.л. (авт. 0,2 п.л.).

### *Свидетельства*

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022667930 «Программа для проектирования солнечных фотоэлектрических установок».

### *Научные статьи, материалы конференций*

1. Leshtayev, O. Experience the operating a solar power plant in the Saratov region / O. Leshtayev, N. Stushkina, V. Zaginaylov // Process Management and Scientific Developments. Part 1. – Мельбурн. – 2021. – С. 198-203.

2. Лештаев О.В. Исследование влияния короткого замыкания на работу солнечной электростанции / О.В. Лештаев, Н.А. Стушкина // Доклады ТСХА. – 2021. – С. 17-19.
3. Лештаев, О.В. Обеспечение качества электроэнергии у сельскохозяйственных потребителей при электроснабжении от солнечной электростанции параллельно с централизованной сетью / О.В. Лештаев, Н.А. Стушкина // Агротехника и энергообеспечение. – 2021. – С. 64-70.
4. Лештаев, О.В. Модель солнечной электростанции в программе MATLAB SIMULINK / О.В. Лештаев, Н.А. Стушкина // Доклады ТСХА. – 2020. – С. 153-156.
5. Лештаев, О.В. Аспекты проектирования солнечных электростанций. / Лештаев, Н.А. Стушкина // Доклады ТСХА. – 2020. – С. 153-156.
6. Лештаев, О.В. Влияние двунаправленной отражательной способности зеркал на теплообмен излучением. / О.В. Лештаев, Л.В. Навроцкая, Н.А. Стушкина // Международный технико-экономический журнал. – 2019. – № 6. – С. 57-61.
7. Leshtaev, O.V. Increasing efficiency power supply of farm enterprises system using solar power plant // O.V. Leshtaev // Материалы международной научной конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 150-летию со дня рождения В.П. Горячкина. – 2018. – С. 333-336.
8. Лештаев, О.В. Опыт эксплуатации солнечной электростанции в Московской области // О.В. Лештаев, В.И. Загинайлов, Т.А. Мамедов, А.А. Самсонов // Доклады ТСХА. – 2018. – С. 181-183.