ISSN 2410-5031

Научно-практический журнал

# АГРОТЕХНИКА И ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ

ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.В. ПАРАХИНА

№ 2 (51), 2026 г.

ОРЕЛ 2026

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – **А.В. Виноградов,** доктор технических наук, доцент, профессор кафедры "Электроснабжение" ФГБОУ ВО Орловского ГАУ, профессор кафедры "Электроснабжение и теплоэнергетика имени академика И.А. Будзко" ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

**Буяров Виктор Сергеевич**, доктор сельскохозяйственных наук, профессор ФГБОУ ВО Орловский ГАУ.

**Лештаев Олег Валерьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры "Электроснабжение и теплоэнергетика имени академика И.А. Будзко" ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

**Букреев Алексей Валерьевич,** кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБНУ "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ".

**Виноградова Алина Васильевна**, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории электроснабжения и теплообеспечения ФГБНУ "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ", доцент кафедры «Электроснабжение» ФГБОУ ВО Орловского ГАУ.

**Шарупич Вадим Павлович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение» ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, академик МАЭН, директор НИПИ «Градоагроэкопром».

**Ковалев Михаил Михайлович**, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Федеральный научный центр лубяных культур (ФГБНУ ФНЦ ЛК).

**Коломейченко Александр Викторович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО Орловский ГАУ; заведующий отделом Управления перспективных технологий Центра сельскохозяйственного машиностроения ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ».

**Кузнецов Юрий Алексеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Надежность и ремонт машин» ФГБОУ ВО Орловский ГАУ.

**Лавров Александр Владимирович,** кандидат технических наук, доцент кафедры механизации сельского хозяйства ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева.

**Олин Дмитрий Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и эксплуатация электрооборудования» ФГБОУ ВО «Костромская государственная сельскохозяйственная академия».

**Осокин Владимир Леонидович,** доктор технических наук, доцент, доцент кафедры «Электрификация и автоматизация» ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет».

**Соловьёв Сергей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры "Электроснабжение и теплоэнергетика имени академика И.А. Будзко" ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

**Цедяков Андрей Александрович,** кандидат технических наук, доцент кафедры "Электроснабжение и теплоэнергетика имени академика И.А. Будзко" ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева**.**

**Савенко Алексей Валентинович,** кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры "Электроснабжение и теплоэнергетика имени академика И.А. Будзко" ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

**Загинайлов Владимир Ильич,** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры "Электроснабжение и теплоэнергетика имени академика И.А. Будзко" ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

**Шабаев Евгений Адимович,** кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина, ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева.

**Шпиганович Александр Николаевич**, доктор технических наук, профессор кафедры электрооборудования ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», член-корреспондент Российской Академии Естествознания.

ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕДАКТОР – ассистент кафедры "Электроснабжение и теплоэнергетика имени академика И.А. Будзко" ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева **Т.С. Кукушкина**

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение»ФГБОУ ВО Орловского ГАУ **Р.П. Беликов**

Зарегистрировано в федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), номер свидетельства ПИ № ФС 77-78888, дата регистрации 28.08.2020.

**Договор с РИНЦ №410-07/2014 от 15.07.2014г.** **ISSN 2410-5031**

**Учредитель и издатель: ФГБОУ ВО Орловский ГАУ**

**Адрес издателя:** 302019, Россия, г. Орел, ул. Генерала Родина, д. 69, тел.: +7(4862) 76-14-51; факс: +7(4862) 76-06-64.

**Адрес редакции:** 302019, Орловская обл., г. Орел, ул. Генерала Родина, д. 69, ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, институт инженерных систем и технологий, ауд. 2-211.

**Тел.:** 8(4862) 76-11-07

**Адрес типографии**: 302028, г. Орел, бульвар Победы, 19. ФГБОУ ВО Орловский ГАУ.

**Тел.:** 8(4862) 43-25-53 **E-mail: winaleksandr@yandex.ru**

Дата выхода журнала: 16.07.2026г.

**© ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 2026** **Тираж 100 экз.** Распространяется бесплатно

16+

ОГЛАВЛЕНИЕ

**ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА**

РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ ПРОГРАММЫ ВЫБОРА ИСТОЧНИКОВ ВИЭ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКИХ ОБЪЕКТОВ 10

**Белов С. И., Лештаев О.В., Цедяков А.А., Потапов И. С.**

ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОДНОКАСКАДНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ-КОРРЕКТОРА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ДЛЯ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ СВЕТОДИОДОВ УЛИЧНОГО ОСВЕЩЕНИЯ 20

**Е.С. Подшивалов[1], О.В. Крюков[1], И.В. Гуляев[2], А.В. Саушев[3]**

[1]ООО «ТСН-электро», Нижний Новгород,

[2]НОЦ «Энергоэффективные двигатели двойного питания» Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева, Саранск,

[3]Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова,Санкт-Петербург

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ И СТАТИЧЕСКИХ КОМПЕНСАТОРОВ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ЗАТРАТ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ 32

**А.Б. Васенин[1], С.Е. Степанов[1], Е.С. Подшивалов[2], О.В. Крюков[2], И.В. Гуляев[3]**

[1]МГ ООО “Газпром проектирование”, г. Нижний Новгород

[2]ООО «ТСН-электро»

[3]Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева

АСПЕКТЫ ЭНЕРГОВЕДЕНИЯ И ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В ТУРКМЕНИСТАНЕ 43

**Пенджиев Ахмет Мырадович**

Туркменский государственный архитектурно-строительный институт

ПРИМЕНЕНИЕ ИОНИСТОРОВ В УСТРОЙСТВАХ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ У СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ 55

**Г.Д. Черкасов**

ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

МЕТОДЫ И СПОСОБЫ ОЧИСТКИ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ ОТ СНЕГА 70

**В.Д. Агафонов, В.И. Загинайлов**

ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ОБОГРЕВА ПОЛА В СВИНАРНИКАХ-МАТОЧНИКАХ НА БАЗЕ САМОРЕГУЛИРУЮЩЕГОСЯ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО КАБЕЛЯ 80
**Никитин П.С.**
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОБОГРЕВА ГРУНТА ТЕПЛИЦ НА ОСНОВЕ САМОРЕГУЛИРУЮЩЕГОСЯ КАБЕЛЯ 88
**Тепсаев С.С.**
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И СПОСОБОВ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ИХ ПЕРЕГРУЗКИ 97
И.С. Фролов[1], А.В. Виноградов[1,2]
[1]ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева
[2]ФГБОУ ВО Орловский ГАУ

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА**

БЛОК-СХЕМА КОМБИНИРОВАННОГО СОШНИКА В СИСТЕМЕ СЕМЕНА-СОШНИК -ПОЧВА 108
**Клюева К.Ю., Храмцова Е.Ю.**
ФГБОУ ВО Тверская ГСХА

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРОЕКТЫ**

РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ МЕТОДОМ ЦЕПНЫХ ДРОБЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И ЯЗЫКА Python 117
**В.В. Фриск[1], А.В. Виноградов[2,3]**
[1]ФГБОУ ВО Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ)
[2]ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А, Тимирязева
[3]ФГБОУ ВО Орловский ГАУ

ЮРИДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕДАЧИ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО ХОЗЯЙСТВА САДОВОДЧЕСКИХ НЕКОММЕРЧЕСКИХ ТОВАРИЩЕСТВ В ТЕРРИТОРИАЛЬНЫЕ СЕТЕВЫЕ ОРГАНИЗАЦИИ 131
**Алимов Р.Р.**
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А, Тимирязева, г. Москва, Россия

**Памяти доктора технических наук, профессора Лещинской Т.Б.**



14 мая 2026 года ушла из жизни ЛЕЩИНСКАЯ ТАМАРА БОРИСОВНА, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, лауреат премии правительства РФ в области образования.

Тамара Борисовна родилась 24 июня 1942 года в Москве и большую часть жизни посвятила науке и образованию в сфере электрификации сельского хозяйства. Окончила в 1964 году Московский институт инженеров сельскохозяйственного производства, (МИИСП, после переименованный в МГАУ им. В.П. Горячкина, а ныне РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева), факультет электрификации и автоматизации сельского хозяйства. Работала техником, затем инженером в научно-исследовательском и проектном институте «Сельэнергопроект» (1963-1968), затем поступила в аспирантуру МИИСП, начала работать там же старшим преподавателем. Кандидатскую диссертацию «Электрификация районов орошаемого хлопководства на повышенной частоте» защитила в 1972 году в диссертационном совете при МИИСП. Получила звание доцента и работала доцентом (1972-1990).

Докторскую диссертацию «Методы выбора стратегий развития систем электроснабжения сельских районов» защитила в 1990 году под руководством доктора технических наук, профессора М.С. Левина в диссертационном совете на базе Всесоюзного научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ). В 1992 году получила звание профессора. С 1991 (по другим данным с 1988 г.) по 2014 г. – заведующая кафедрой «Электроснабжение и электрические машины» МГАУ им. В.П. Горячкина, а с 2014 по 2025 годы – профессор кафедры.

Под руководством Лещинской Т.Б. разработано программное обеспечение для расчета технико-экономических параметров систем электроснабжения напряжением 10-110 кВ. Это программно-вычислительный комплекс сетевого имитационного моделирования и анализа (ПРОКСИМА); экспертная система оценки качества функционирования системы электроснабжения (ЭСОК), экспертная система оценки надежности (ЭСОН) сельскохозяйственных потребителей по многокритериальной модели, которые внедрены в проектной организации ОАО «РОСЭП», в 35 энергосистемах страны. ПВК «РАПН» - для расчета показателей надежности потребителей и выбора средств надежности, а также имитации действия оперативно-выездной бригады. Перечисленные программные комплексы широко используются в учебном процессе РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Орловском ГАУ, Рязанской ГСХА, Марийском государственном университете (энергетический факультет) при разработке курсовых и дипломных проектов.

Обосновала и развила новое научное направление многокритериальной оптимизации параметров систем электроснабжения с учетом неопределенности исходной информации в электроснабжений сельского хозяйства.

Тамара Борисовна подготовила более 30 кандидатов и двух докторов технических наук. Опубликовала более 35 учебников, учебных и методических пособий, монографий по тематикам, связанным с электроснабжением сельского хозяйства. Является соавтором учебника «Электроснабжение сельского хозяйства», выдержавшего целый ряд переизданий.

Первая часть новой редакции учебника с участием Тамары Борисовны увидела свет в 2025 году, вторая часть выйдет в 2026 году. Лещинская Т.Б. являлась действительным членом международной академии аграрного образования (1997 г.) и международной энергетической академии (1995 г.).

Работая в МГАУ имени В.П. Горячкина и в МЭИ разработала авторские лекционные курсы по различным дисциплинам. Неоднократно была председателем государственных экзаменационных и аттестационных комиссий в разных вузах нашей страны, в том числе в Орловском ГАУ. Сотрудничала с вузами, в частности, Иркутским ГАУ в рамках подготовки научных и образовательных проектов. В 1995 году Тамаре Борисовне было присвоено звание

Заслуженного деятеля науки и техники РФ, а в 2008 году она стала Лауреатом премии правительства РФ в области образования. Награждена (2015 год) золотой медалью имени академика И.А. Будзко, присуждаемой сельскохозяйственным отделением Российской академии наук (ранее Российской академией сельскохозяйственных наук) за выдающиеся работы в области энергетики, электрификации, автоматизации.

Коллективы кафедры электроснабжения и теплоэнергетики имени академика И.А. Будзко и всего института механики и энергетики имени В.П. Горячкина РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, кафедры «Электроснабжение» Орловского ГАУ, кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского ГАУ им. А.А. Ежевского приносят искренние глубокие соболезнования родным и близким Тамары Борисовны!

СВЕТЛАЯ ПАМЯТЬ ТАМАРЕ БОРИСОВНЕ, СВЕТЛОМУ И ИСКРЕННЕМУ ЧЕЛОВЕКУ, БОЛЬШОМУ УЧЁНОМУ В СФЕРЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА!

*От коллективов кафедр электроснабжения*
*РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Орловского ГАУ и*
*Иркутского ГАУ д.т.н., доцент Виноградов А.В., д.т.н.*
*профессор Наумов И.В. и к.т.н., доцент Белов С.И.*



2 июня 2026 года ушёл из жизни **ВАЛЕРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ФРИСК**, кандидат технических наук, доцент *Московского технического университета связи и информатики*

Валерий Владимирович родился 18 ноября 1953 года. В 1976 году окончил Московский ордена Трудового Красного Знамени электротехнический институт связи. В 1992 году защитил кандидатскую диссертацию, а в 1996 году ему присвоено учёное звание доцента. В 2013 году ему присвоено Звание «Мастер связи».

Фриск В.В. посвятил преподавательской и научно-исследовательской работе более 43 лет. За это время им подготовлено более 75 научных и научно-методических трудов, в том числе монография, учебник, учебные пособия, практикумы и методические указания, задания по курсовому проектированию.

Ко всем своим работам Валерий Владимирович относился творчески и ответственно! Он имел широкий кругозор и научную интуицию. В последние годы Валерий Владимирович увлечённо занимался вопросами применения искусственного интеллекта, программирования, новых методов решения уравнений в прикладных задачах математики и программирования. Неоднократно публиковался в журнале «Агротехника и энергообеспечение»! И в текущем выпуске журнала выходит последняя его работа, посвящённая применению цепных дробей для решения квадратных уравнений.

Валерий Владимирович всегда был отзывчивым, чутким, внимательным и доброжелательным человеком! Как преподаватель он старался преподать студентам знания так, чтобы они запомнились ярко и живо, на практических примерах и наглядных иллюстрациях.

Коллектив редакции журнала «Агротехника и энергообеспечение», коллектив кафедры электроснабжения и теплоэнергетики имени академика И.А. Будзко, кафедра теории электрических цепей, коллеги из Московского технического университета связи и информатики приносят искренние соболезнования родным и близким Валерия Владимировича! Вечная память!



10 июня 2026 года ушёл из жизни **АЛЕКСЕЙ ИОСИФОВИЧ НЕКРАСОВ**
доктор технических наук, старший научный сотрудник, член Международной энергетической академии

Алексей Иосифович родился 30 октября 1945 г. в ст. Матай, Талды- Курганской области Казахской ССР в семье рабочего- железнодорожника. В 1964 - 1967 годах служил в армии. В 1973 г. окончил факультет электрификации Казахского государственного сельскохозяйственного института в г. Алма-Ате. Работал старшим инженером-электриком совхоза «Канонерский» Семипалатинской области, главным инженером по электрификации и связи Семипалатинского областного управления сельского хозяйства. После окончания очной аспирантуры Московского института инженеров сельскохозяйственного производства (МИИСП) им. В.П. Горячкина в 1983 г. защитил кандидатскую диссертацию.

С 1981 г. по 2023г Некрасов А.И. работал в ГНУ ВИЭСХ (затем в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) в должности инженера, старшего научного сотрудника, учёного секретаря института, заведующего лабораторией, заведующего отделом.

Алексей Иосифович стал доктором технических наук, защитив диссертацию «Совершенствование системы технического сервиса и повышение эффективности работы сельских электроустановок» по научной специальности 05.20.02 – электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве, старшим научным сотрудником, членом Международной энергетической академии, много лет был ученым секретарём докторского диссертационного Совета при ВИЭСХ, членом экспертного совета ВАК при Минобрнауки РФ по инженерным агропромышленным специальностям. Он является автором более 280 опубликованных научных трудов, в том числе 53 патентов РФ, 15 монографий, книг, брошюр. В своих трудах Алексей Иосифович занимался эксплуатацией электрооборудования, технологиями передачи электроэнергии по однопроводным линиям, другими вопросами. Ко всем своим делам он подходил ответственно и основательно, а в памяти коллег остался добрым человеком и отзывчивым коллегой, хорошим охотником!

Коллектив редакции журнала «Агротехника и энергообеспечение», коллектив кафедры электроснабжения и теплоэнергетики имени академика И.А. Будзко, коллеги по ВИЭСХ и ФГБНУ ФНАЦ ВИМ приносят искренние соболезнования родным и близким Алексея Иосифовича! Вечная память!

**УДК 621.311.24:004.9**

# РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ ПРОГРАММЫ ВЫБОРА ИСТОЧНИКОВ ВИЭ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКИХ ОБЪЕКТОВ

Белов С. И., Лештаев О.В., Цедяков А.А., Потапов И. С.

ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева

***Аннотация.*** *Статья посвящена разработанной компьютерной программе, которая помогает выбирать конфигурацию автономной или резервной системы электроснабжения для удаленных сельских объектов с учетом требований к надежности электроснабжения. В основу алгоритма программного продукта положено сравнение нескольких вариантов по техническим и экономическим параметрам с учетом природных условий, состава электрооборудования и режима работы электрической системы. Программа позволяет быстро удалить из рассмотрения заведомо неудачные решения и перейти к детальной проработке наиболее подходящих конфигураций при проектировании систем электроснабжения сельскохозяйственных объектов. Апробация на 28 населённых пунктах РФ показала, что в режиме без резервирования оптимальными оказались солнечные (46 %), ветровые (18 %) и гибридные (36 %) конфигурации с приведёнными затратами 14,8–33,4 млн руб.; при резервировании в 96 % случаев минимум обеспечила гибридная конфигурация с резервом (34,1–45,8 млн руб.).*

***Ключевые слова:*** *автономное электроснабжение, возобновляемые источники энергии, гибридная система, программный расчет, резервное электроснабжение.*

## Введение

Электроснабжение удаленных сельскохозяйственных объектов, малых населенных пунктов в России традиционно осуществляется за счет дизельной генерации или протяжки воздушных линий электропередачи. Оба подхода характеризуются высокими капитальными и эксплуатационными затратами, зависимостью от логистики завоза топлива и значительным экологическим следом. В таких условиях гибридные системы с несколькими источниками энергии на основе возобновляемых источников энергии становятся технически и экономически обоснованной альтернативой [1, 4, 11].

При проектировании автономного электроснабжения сельскохозяйственных объектов выбор конфигурации обычно сводится к нескольким вариантам: дизельная генерация, солнечная установка, ветровая установка или их совместное применение [4, 11]. На практике одного сравнения по мощности недостаточно. Необходимо учитывать, как система будет работать в конкретной географической точке, сколько будет стоить ее эксплуатация, нужен ли резервный источник питания, и какая будет достигнута надежность электроснабжения [2, 5, 7]. Ручной расчет в таких задачах быстро становится трудоемким: вариантов много, исходные условия меняются от объекта к объекту, а итог зависит от климатических условий местности, электрической нагрузки и состава генерирующего оборудования [2, 6, 10].

На рынке существуют специализированные зарубежные программные комплексы, такие как HOMER Pro, RETScreen, PVsyst. Данные программы имеют ограничения для российских условий: закрытый исходный код, высокая стоимость лицензий, отсутствие встроенных баз тарифов по субъектам РФ и сложность адаптации под отечественные каталоги оборудования [8, 10]. Кроме того, большинство зарубежных инструментов не учитывают специфику российских климатических поясов и нормативные особенности расчета окупаемости для сельских сетей [2, 10].

В связи с этим была разработана компьютерная программа, ориентированная на быстрый и воспроизводимый подбор энергоэффективных решений для автономного и резервного электроснабжения сельских потребителей [9, 10]. Программа решает следующие задачи:

1. автоматический сбор климатических параметров по координатам объекта;
2. подбор мощностей солнечных и ветровых установок, аккумуляторных накопителей, преобразователей и резервного источника генерации из встроенного каталога российского оборудования;
3. почасовое моделирование диспетчеризации энергии с учетом приоритета возобновляемых источников, ограничений аккумуляторов и топливной модели дизель-генератора;
4. расчет приведенных затрат за двадцать лет, удельных приведенных затрат на электроэнергию, чистой приведенной стоимости и срока окупаемости относительно базовых сценариев (сеть или дизель-генератор);
5. сравнение нескольких конфигураций и выбор оптимальной при соблюдении заданного уровня надежности [2, 5].

Цель работы - представить архитектуру и алгоритм программы, продемонстрировать результаты её апробации на выборке из двадцати восьми населённых пунктов различных регионов Российской Федерации и обосновать практическую значимость инструмента для ускорения предпроектного анализа сельскохозяйственных объектов.

**Материалы и методы исследования**

Программа реализована на языке программирования Python с использованием специализированных библиотек обработки данных, визуализации и картографии [9]. Все исходные данные, такие как: тарифы по регионам, цены на оборудование, климатические справочники, встроены в код, что позволяет использовать программу автономно, без подключения к интернету [9].

В рамках данной работы под конфигурацией системы электроснабжения понимается ее технический состав: тип генерирующих установок, их установленная мощность, емкость системы накопления и параметры преобразовательного оборудования.

Для заданных координат определяется ближайший опорный пункт из встроенной базы. Солнечная инсоляция задается как среднегодовое значение среднесуточной инсоляции. Помесячный профиль формируется синусоидальной аппроксимацией с учетом широты. Выработка солнечных установок корректируется на температурный коэффициент мощности через модель номинальной рабочей температуры элемента [4, 11]:

$$\mathrm{T}_{\text{эл}} = \mathrm{T}_{\text{возд}} + \frac{\text{НРТЭ}-20}{800} \cdot G, \quad (1)$$

где $G$ - средняя освещенность, Вт/м$^2$. Учитываются зимние потери (снег, обледенение) через помесячные множители коэффициента эффективности системы, нормированные к среднегодовому значению 0,88.

Ветровой ресурс моделируется распределением вероятностей с параметром формы, равным двум. Скорость на высоте мачты пересчитывается по степенному закону (показатель 0,14). Коэффициент использования установленной мощности вычисляется интегрированием рабочей характеристики по плотности вероятности [4, 11]:

$$\text{КИУМ} = \int_{v_{\text{вкл}}}^{v_{\text{откл}}} \frac{P(v)}{P_{\text{ном}}} f(v)dv, \quad (2)$$

где $v_{\text{вкл}}, v_{\text{откл}}$-скорости включения и отключения, $f(v)$-функция плотности вероятности.

Расчет выполняется на горизонт двадцати лет. Капитальные затраты формируются путем подбора реальных моделей из каталога отечественных производителей с минимизацией стоимости комплекта [2, 10]. Ежегодные эксплуатационные расходы включают: техническое обслуживание возобновляемых установок, накопителей и преобразователей (1,5% от их капитальной стоимости), топливо дизель-генератора, обслуживание по фактическим моточасам, покупку или продажу электроэнергии по региональным тарифам. В программе учтена плановая замена аккумуляторов на десятом году эксплуатации, преобразователя на двенадцатом году. Дисконтирование выполняется по ставке 10%, инфляция 5%. Основные показатели рассчитываются по стандартной методике оценки инвестиционных проектов в распределенной энергетике [2, 6, 11]:

Удельные приведенные затраты на электроэнергию (УПЗ), руб/кВт·ч:

$$\text{УПЗ} = \frac{\sum_{t=0}^{N} \frac{З_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{N} \frac{Э_t}{(1+r)^t}}, \quad (3)$$

Чистая приведенная стоимость проекта (ЧПС), руб:

$$\text{ЧПС} = \sum_{t=0}^{N} \frac{\text{ДП}_t}{(1+r)^t}, \quad (4)$$

где $З_t$- суммарные затраты в году $t$ (капитальные вложения, эксплуатационные расходы, стоимость замен, топливо, покупка энергии из сети), руб; $Э_t$-полезная электроэнергия, фактически отпущенная потребителю в году $t$, кВт·ч; $\text{ДП}_t$-чистый денежный поток в году $t$, определяем как разница между экономией относительно базового сценария и суммарными затратами года, руб; $r$-ставка дисконтирования; $N$-расчетный горизонт.

Показатель УПЗ отражает среднюю стоимость одного киловатт-часа электроэнергии с учётом всех капитальных и эксплуатационных расходов за весь срок службы системы. Показатель ЧПС характеризует суммарный дисконтированный экономический эффект от внедрения системы по сравнению с базовым сценарием (покупка всей энергии из сети или автономная работа только на дизель-генераторе) [2, 6].

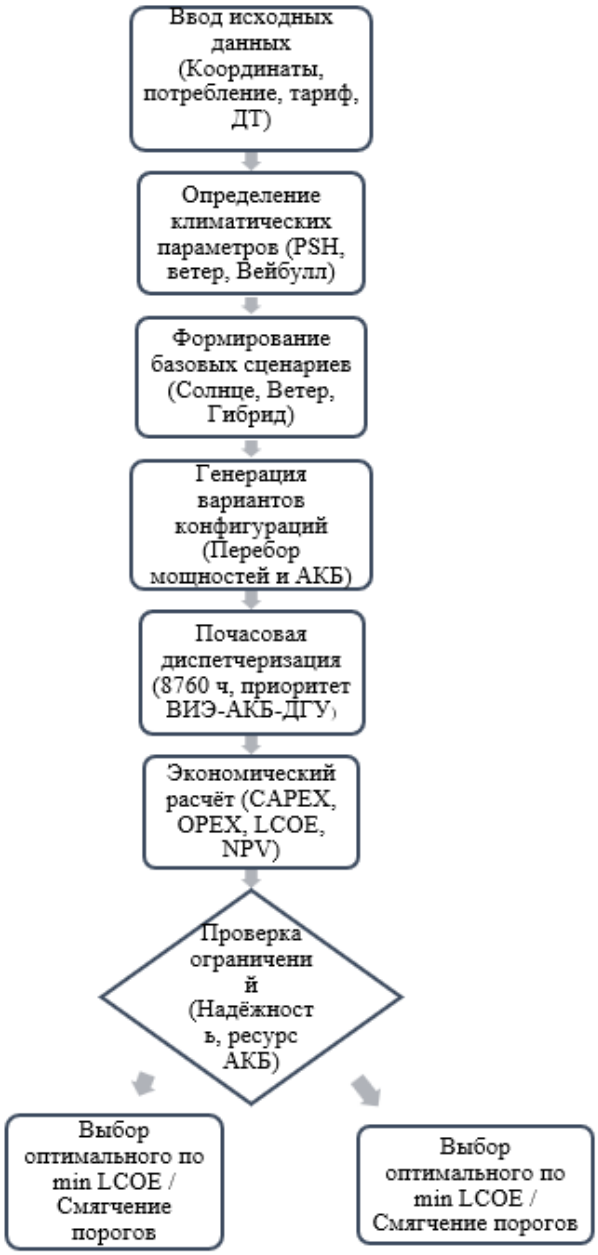



Рисунок 1- Блок-схема алгоритма подбора конфигурации

Алгоритм работы программы представлен на рисунке 1. Программа последовательно перебирает три базовые конфигурации (солнечная, ветровая, гибридная), для каждой генерирует набор вариантов с множителями генерации и ёмкости аккумуляторов, выполняет диспетчеризацию, рассчитывает экономику, отсеивает нереалистичные решения (низкий ресурс аккумуляторов, завышенная мощность, недостаточный климатический ресурс) и выбирает оптимальный вариант по минимальным удельным приведённым затратам при соблюдении ограничения на дефицит энергии [2, 5].

**Результаты исследования и их обсуждение**

Объектами исследования выступают 28 сельских населенных пунктов, охватывающие самые разные регионы Российской федерации – от Европейской части (Московская, Тверская, Архангельская области) и Поволжья (Татарстан, Башкортостан, Чувашия) до Урала и Сибири (Челябинская, Новосибирская, Томская области, Хакасия). Население этих деревень от 183 человек (д. Огарово, Вологодская область) до 283 человек (д. Артемьевская,

Архангельская область), в среднем проживает 210-230 жителей. Электрическая нагрузка данных объектов носит коммунально-бытовой характер, без энергоемких производств. Суточное электропотребление для каждого населенного пунка определялось расчетным путем, исходя из численности жителей. Потребление было выбрано 1,1 кВт·ч в сутки на одного человека. Благодаря такому подходу был получен размер суточной нагрузки, который на прямую связан с размером деревни и находится в диапазоне от 201,3 до 311,3 кВт·ч/сут

Программный расчёт позволил получить сопоставимые технико-экономические показатели для всех двадцати восьми точек. В режиме без резервирования программа в большинстве случаев выбирает моногенерацию: солнечные установки доминируют в южных и центральных регионах (инсоляция 3,4–4,3 кВт·ч/м²·сут), ветровые – в северо-западных и прибрежных зонах (скорость ветра 4,0–6,2 м/с). Гибридные конфигурации без резерва выбираются в десяти случаях, где сезонная взаимодополняемость ресурсов позволяет снизить требуемую ёмкость аккумуляторов [4, 11]. Диапазон минимальных приведённых затрат за двадцать лет составил 14,8–33,4 млн руб.

Необходимость резервирования для повышения надёжности электроснабжения показывает, что гибридная конфигурация с резервным источником питания будет оптимальной в двадцати семи из двадцати восьми точек. Показатели надёжности электроснабжения значительно повышаются за счет совместной работы солнечных и ветровых установок и, в свою очередь, сглаживанию суточных и сезонных провалов генерации при изменении погодных условий, сокращению глубины разряда аккумуляторов и уменьшению наработки дизель-генератора [2, 5, 7]. Для повышения надёжности электроснабжения необходимо увеличение ёмкости накопителя и топливной составляющей для покрытия критической нагрузки, а также гибридного инвертора, что ведет к увеличению стоимости за счет резервного оборудования и, соответственно, росту приведённых затрат, которые в этом режиме возрастают до 34,1–45,8 млн руб.

Приведённые затраты на генерацию в зависимости от солнечной инсоляции и скорости ветра, а также доли ВИЭ в гибридной конфигурации иллюстрируют рисунки 2–4.




Рисунок 2 – Приведённые затраты от солнечной инсоляции




Рисунок 3 – Приведённых затрат от скорости ветра

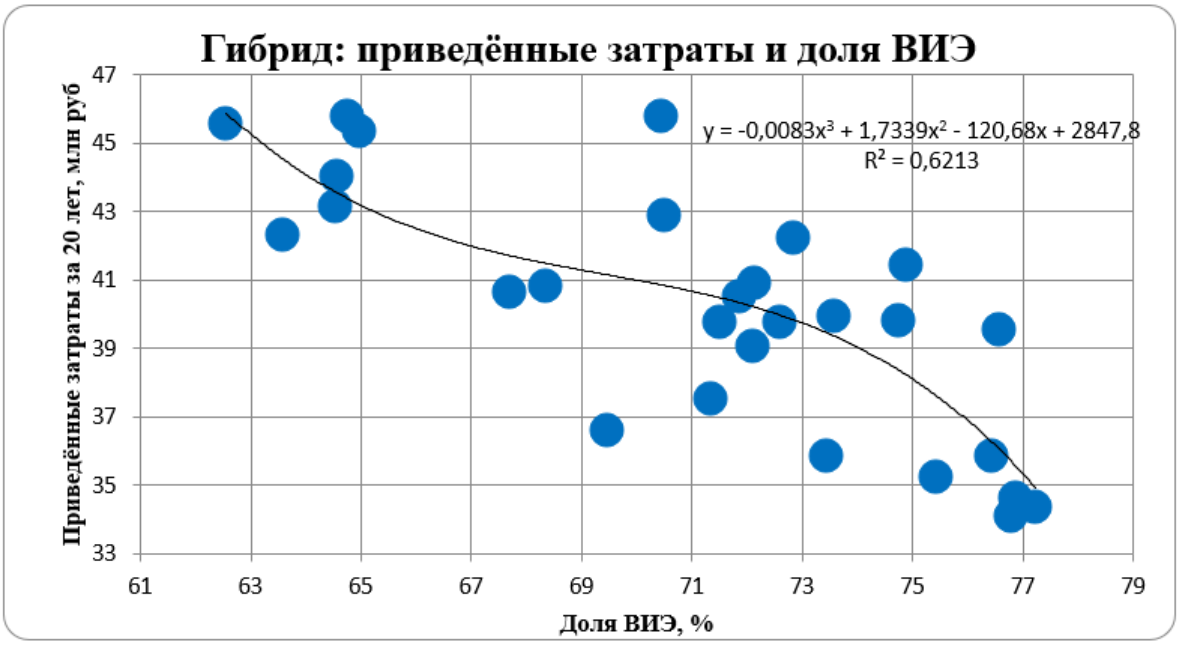



Рисунок 4 – Зависимость приведённых затрат для гибридной конфигурации от доли возобновляемых источников по населённым пунктам

Анализ графиков подтверждает ожидаемые физические закономерности, описанные в базовых курсах по возобновляемой энергетике [3, 4, 11]. Для солнечных систем приведённые затраты снижаются на 18–22 %. при росте среднесуточной инсоляции с 2,7 до 3,9 кВт·ч/м²·сут Ветровые конфигурации более чувствительны к изменениям скорости ветра, что связано с нелинейностью рабочей характеристики и высокой чувствительностью коэффициента использования установленной мощности к средней скорости ветра в диапазоне 2,5–4,0 м/с. Гибридные системы показывают наименьший разброс затрат при изменении доли возобновляемых источников от 60 до 77 %, что свидетельствует о взаимодополняемости солнечной и ветро-генерации к вариациям климата и подтверждает эффективность интеллектуального анализа конфигураций микросетей [2, 7].

На рисунке 5 дано сравнение приведенных затрат для всех населённых пунктов по двум сценариям: ВИЭ и ВИЭ с резервированием.

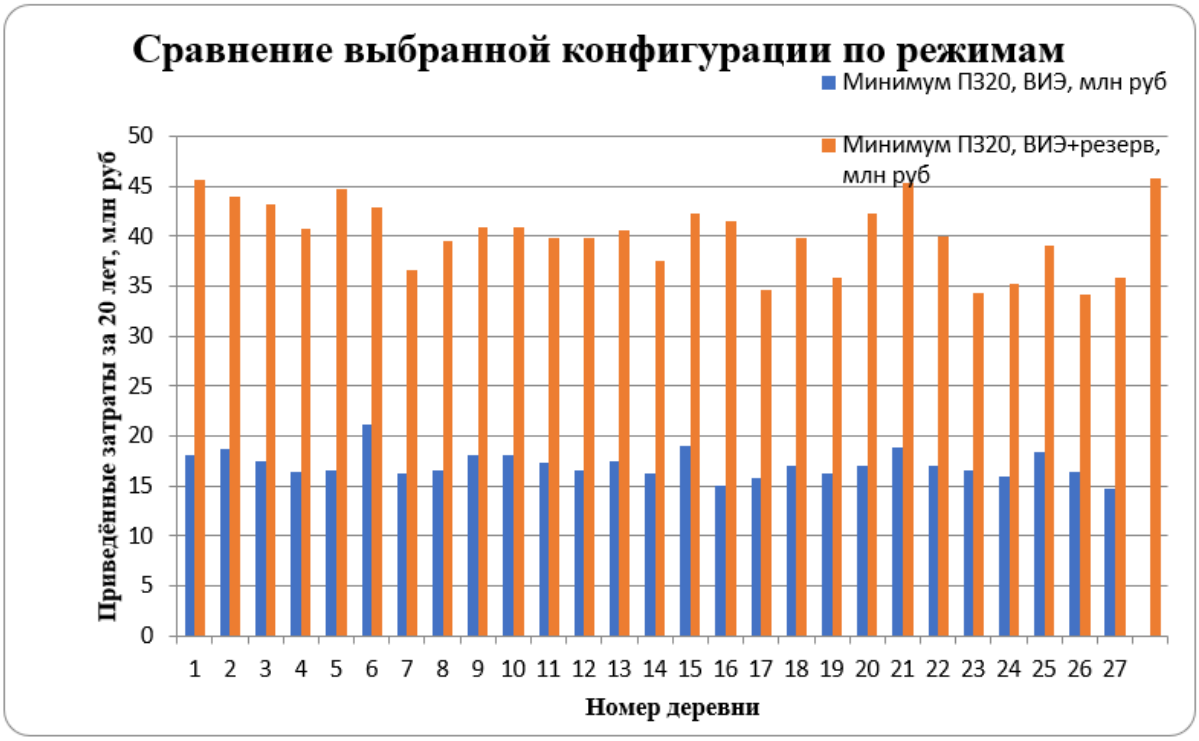



Рисунок 5 – Сравнение приведённых затрат по населённым пунктам для двух сценариям: ВИЭ и ВИЭ с резервированием

Разрыв между затратами на эти сценарии составляет в среднем 1,8–2,1 раза. Это плата за гарантированную надёжность электроснабжения, что полностью согласуется с методиками оценки показателей надёжности распределительных систем [5, 7]. Программа автоматически рассчитывает срок окупаемости установки ВИЭ-генерации. Для большинства точек с резервированием окупаемость составляет 6–9 лет, чистая приведённая стоимость положительна, а доля возобновляемых источников в годовом балансе достигает 65–78 %. В режиме «только возобновляемые источники» окупаемость короче (4–6 лет), однако дефицит энергии в зимние месяцы может достигать 5–12 %, что допустимо только для некритичных нагрузок [2, 11].

Практическое преимущество разработанного инструмента заключается в скорости и прозрачности расчёта. Формирование полного отчёта по одной точке, включая подбор оборудования, почасовую симуляцию, экономический анализ и графики, занимает 8–15 секунд на стандартном персональном компьютере. Для сравнения, настройка аналогичного сценария в коммерческих пакетах требует 20–40 минут ручного ввода параметров и лицензирования. Встроенная база российских тарифов и цен исключает ошибку импорта данных, а открытая структура формул позволяет адаптировать модель под учебные и научно-исследовательские задачи [9, 10].

**Выводы**

Разработанная программная система обеспечивает автоматизированный подбор конфигураций автономного и резервного электроснабжения на основе физической симуляции, каталога отечественного оборудования и многофакторной экономической модели. Алгоритм учитывает климатическую специфику регионов Российской Федерации, ограничения по надёжности и ресурсу накопителей.

Апробация на выборке из двадцати восьми населённых пунктов показала, что в режиме без резервирования оптимальными являются солнечные (46 %), ветровые (18 %) и гибридные (36 %) конфигурации с приведёнными затратами 14,8–33,4 млн руб. При требовании резервирования в 96 % случаев минимум затрат обеспечивает гибридная конфигурация с резервом (34,1–45,8 млн руб.), что подтверждает эффективность взаимодополняющего использования солнечной и ветровой генерации для повышения надёжности сельских микросетей [2, 5, 7, 11].

Перспективы развития комплекса включают внедрение реальных профилей нагрузки сельскохозяйственных потребителей, динамическое моделирование деградации компонентов, учёт сезонной вариативности тарифов и интеграцию с геоинформационными платформами для автоматизированного анализа территорий [2, 10, 11].

**Список использованных источников:**


1. Белов С. И. Развитие распределенной генерации с участием ВИЭ для обеспечения надежного энергоснабжения потребителей в сельской местности. // Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума. Наука и инновации - современные концепции. Москва. - 2024. - С. 93-102.

2. Белов С. И., Лештаев О. В. Интеллектуальный анализ оптимизации работы микроэнергосистем в сельских электросетях. // Сборник: Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике. Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции. Чебоксары - 2024. - С. 254-259.

3. Васильев А. А., Морозов В. В. Возобновляемые источники энергии: учебник. М.: Изд-во МЭИ, 2020.

4. Елистратов В.В., Аронова Е.С. Моделирование работы и оптимизация параметров систем автономного электроснабжения на основе ВИЭ // Известия РАН. Энергетика. – 2011. – № 1. – С. 119–127.

5. Лещинская Т.Б., Белов С.И. Определение показателей надежности электроснабжения сельскохозяйственного производства. М.: Изд-во: Агроконсалт, 2004.

6. Лещинская Т.Б., Семичевский П.И., Белов С.И. Электроснабжение населенного пункта: Методические рекомендации по курсовому и дипломному проектированию. М.: Изд-во ФГОУ ВПО МГАУ, 2010.

7. Русан В.И., Пухальская О.Ю. Метод расчёта надёжности схем распределительных электрических сетей сельскохозяйственного назначения на основе применения функций алгебры логики // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2019. – Т. 62, № 5. – С. 449–458.

8. Lee K.H., Lee D.W., Baek N.C., Kwon H.M., Lee C.J. Preliminary determination of optimal size for renewable energy resources in buildings using RETScreen // Energy. – 2012. – Vol. 47, No. 1. – P. 83–96. – DOI: 10.1016/j.energy.2012.08.040.

9. McKinney W. Python for Data Analysis. 3rd ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2022.

10. Memon M.A., Mekhilef S., Mubin M., Asim M. Hybrid renewable energy systems' optimisation. A review and extended comparison of the most-used software tools // Energies. – 2021. – Vol. 14, No. 24. – Art. 8268. – DOI: 10.3390/en14248268.

11. Twidell J., Weir T. Renewable Energy Resources. London: Routledge, 2021.

**Bibliographic list**

1. Belov S. I. Development of distributed generation with the participation of RES to ensure reliable energy supply to consumers in rural areas. // Collection of scientific articles based on the results of the International Scientific Forum. Science and innovation - modern concepts. Moscow. - 2024. - P. 93-102.

2. Belov S. I., Leshtaev O. V. Intelligent analysis of the optimization of micro-energy systems in rural power grids. // Collection: Information technologies in electrical engineering and power engineering. Materials of the XIV All-Russian Scientific and Technical Conference. Cheboksary - 2024. - P. 254-259.

3. Vasilyev A. A., Morozov V. V. Renewable Energy Sources: Textbook. Moscow: MEI Publishing House, 2020.

4. Elistratov V.V., Aronova E.S. Modeling the Operation and Optimization of Parameters of Autonomous Power Supply Systems Based on Renewable Energy Sources // Izvestiya of the Russian Academy of Sciences. Energetics. – 2011. – No. 1. – Pp. 119–127.

5. Leshchinskaya T.B., Belov S.I. Determination of indicators of reliability of power supply to agricultural production. Moscow: Publishing house: Agroconsult, 2004.

6. Leshchinskaya T.B., Semichevsky P.I., Belov S.I. Power supply to a locality: Methodological recommendations for course and diploma design. Moscow: Publishing house of FGOU VPO MGAU, 2010.

7. Rusan V.I., Pukhalskaya O.Yu. A method for calculating the reliability of agricultural distribution electric grid circuits based on the application of logic algebra functions // Energetika. Izvestiya of Higher Educational Institutions and Energy Associations of the CIS. – 2019. – Vol. 62, No. 5. – Pp. 449–458.

8. Lee K.H., Lee D.W., Baek N.C., Kwon H.M., Lee C.J. Preliminary determination of optimal size for renewable energy resources in buildings using RETScreen // Energy. – 2012. – Vol. 47, No. 1. – P. 83–96. – DOI: 10.1016/j.energy.2012.08.040.

9. McKinney W. Python for Data Analysis. 3rd ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2022.

10. Memon M.A., Mekhilef S., Mubin M., Asim M. Hybrid renewable energy systems' optimisation. A review and extended comparison of the most-used software tools // Energies. – 2021. – Vol. 14, No. 24. – Art. 8268. – DOI: 10.3390/en14248268.

11. Twidell J., Weir T. Renewable Energy Resources. London: Routledge, 2021.

*Белов Сергей Иванович, кандидат технических наук, доцент, sbelov_@mail.ru, Россия, Москва, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, Институт механики и энергетики им. В. П. Горячкина*

*Лештаев Олег Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, oleg-leshtaev@yandex.ru, Россия, Москва, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, Институт механики и энергетики им. В. П. Горячкина*

*Цедяков Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент, andrey.tsedyakov@mail.ru, Россия, Москва, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, институт механики и энергетики им. В. П. Горячкина*

*Потапов Иван Сергеевич, студент 4 курса бакалавриата ivanpotapov04@mail.ru, Россия, Москва, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, Институт механики и энергетики им. В. П. Горячкина*

# CHOOSING THE OPTIMAL CONFIGURATION OF AUTONOMOUS AND BACK-UP POWER SUPPLY FOR AGRICULTURAL CONSUMERS

Belov S. I., Leshtaev O.V., Tsedyakov A.A. , Potapov I. S.
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy" (Moscow)

Abstract. The article is devoted to a computer program developed to assist in selecting the configuration of an autonomous or backup power supply system for remote facilities, taking into account power supply reliability requirements. The algorithm of the software product is based on comparing several alternatives according to technical and economic parameters, with due regard for natural conditions, the composition of electrical equipment, and the operating mode of the electrical system. The program makes it possible to quickly exclude obviously inefficient options from consideration and proceed to a detailed analysis of the most suitable configurations when designing power supply systems for agricultural facilities. Testing in 28 settlements of the Russian Federation showed that, in the mode without backup, solar (46%), wind (18%), and hybrid (36%) schemes were optimal, with discounted costs of 14.8–33.4 million rubles; under backup conditions, in 96% of cases the minimum cost was provided by a hybrid configuration with backup (34.1–45.8 million rubles).

Keywords: autonomous power supply, renewable energy sources, hybrid system, software-assisted calculation, backup power supply.

*Belov Sergey Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, sbelov_@mail.ru, Russia, Moscow, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy", V.P. Goryachkin Institute of Mechanics and Energy*

*Leshtaev Oleg Valerievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,* oleg-leshtaev@yandex.ru*, Russia, Moscow, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy", V.P. Goryachkin Institute of Mechanics and Energy*

*Tsedyakov Andrey Alexandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,* andrey.tsedyakov@mail.ru*, Russia, Moscow, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy", V.P. Goryachkin Institute of Mechanics and Energy*

*Potapov Ivan Sergeevich, 4th-year Bachelor's student, ivanpotapov04@mail.ru, Russia, Moscow, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy", V.P. Goryachkin Institute of Mechanics and Energy*

**УДК 628.971.6**

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОДНОКАСКАДНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ-КОРРЕКТОРА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ДЛЯ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ СВЕТОДИОДОВ УЛИЧНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Е.С. Подшивалов[1], О.В. Крюков[1], И.В. Гуляев[2], А.В. Саушев[3]

[1]ООО «ТСН-электро», Нижний Новгород,
[2]НОЦ «Энергоэффективные двигатели двойного питания» Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева, Саранск,
[3]Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова,Санкт-Петербург

***Аннотация.*** *Рассмотрены особенности схемотехники и расчета источников питания для светодиодных светильников с учетом их стойкости к высоковольтным импульсным помехам из сети. Проведен анализ и представлены осциллограммы реальных процессов, происходящих в схеме преобразователя в момент воздействия помехи. Показано, что значительное улучшение показателей энергоэффективности и надежности светодиодного освещения промышленных и социальных объектов, включая агропромышленный комплекс, связано с более стабильной и устойчивой работой источников питания на базе однокаскадного обратноходового преобразователя-корректора коэффициента мощности с электропитанием от цифровых подстанций и устойчивого к воздействию импульсных помех большой энергии. Проанализирована физика процессов в системе преобразователя-корректора и основные характеристики его работы в различных режимах с учетом стохастических возмущений различной природы. При практической реализации достаточная помехоустойчивость обеспечивается при задержке в схеме преобразователя порядка микросекунд, что соответствует одному рабочему такту корректора во время воздействия перенапряжения. Даны рекомендации по расчету режимов работы и выбору основных приборов преобразователя-корректора коэффициента мощности для светодиодного освещения уличных и площадных объектов. Предложена реализованная на практике схема защиты источников питания светодиодов от повышенных входных напряжений.*

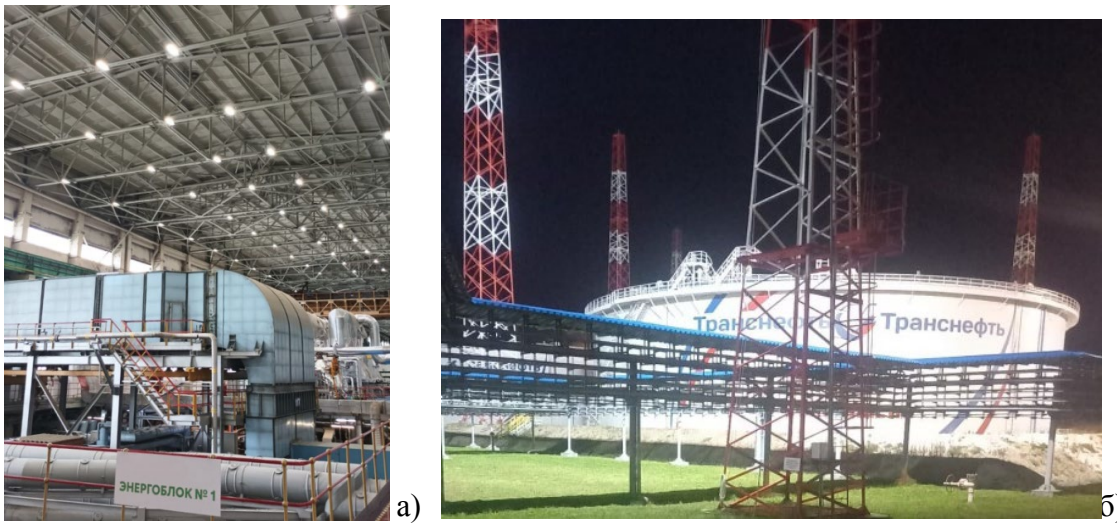
***Ключевые слова:*** *электротехническая система, трансформаторная подстанция, помеха, светоизлучающий диод, светодиодный драйвер, импульсный источник питания.*

## Введение.

Совершенствование техники и приборов освещения в настоящее время во многом связано с появлением и бурным развитием источников света принципиально нового типа – светодиодов (СД) [1-4]. Главное преимущество СД перед традиционными источниками света состоит в том, что у последних потенциал эффективного преобразования электроэнергии в свет исчерпан, тогда как у СД прирост световой отдачи значителен (рис. 1). В то же время, такие отличительные особенности СД как миниатюрность и сильная зависимость излучательной способности от температуры *p-n* перехода диктуют новые подходы к разработке осветительных приборов [5-8].

В настоящее время широкое распространение получили две концепции проектирования оптических систем для светодиодных светильников: использование вторичной оптики со сложной геометрией поверхности и подход, когда световое распределение светового прибора формируется посредством задания определённой ориентации излучателей [9-12].

Однако кардинальное улучшение показателей энергоэффективности светодиодного освещения промышленных объектов ТЭК, безусловно, связано с более эффективными и надежными источниками питания на базе однокаскадного обратноходового преобразователя-корректора коэффициента мощности (ОПКМ), питающегося от цифровых подстанций и устойчивого к воздействию импульсных помех большой энергии [13-16].




а) б)

Рисунок 1 - Освещение энергоблока ТЭЦ (а) и резервуара ПАО «Транснефть» (б)

**Особенности ОПКМ**

Импульсные источники питания (ИИП) на базе однокаскадных обратноходовых преобразователей, совмещенных с корректором коэффициента мощности (ОПКМ, англ. – *Single Stage High PF Flyback Converter*) нашли широкое применение в светодиодной осветительной технике благодаря ряду достоинств [17-20]:

- малое число элементов в схеме и низкая стоимость;

- отсутствие пусковых токов, многократно превышающих номинальный потребляемый ток, что упрощает выбор и значительно продлевает срок службы выключателей и реле, коммутирующих цепи питания светильников. Этот параметр особенно важен при освещении больших помещений с десятками светодиодных светильников (цеха, депо, торговые центры);

- простота реализации изделий, устойчивых к аварийному повышению напряжения в однофазных сетях до линейных значений (например, обрыв нейтрали, при котором на однофазные потребители начинает поступать напряжение до ~380В).

В этой связи именно топология ОПКМ по совокупности технико-экономических показателей оказывается наиболее подходящей (а иногда и единственно возможной) для реализации источников питания для светодиодов малой и средней мощности. При эффективной реализации входного фильтра электромагнитных помех (ЭМП), дополнительных цепей защиты и правильном выборе полупроводниковых приборов и их режимов работы вполне возможно создать качественное серийно пригодное изделие, не уступающее по надежности другим топологиям источников импульсного питания (ИИП) для светодиодов.

**Процессы в цепях преобразователя**

На рис. 2 показаны осциллограммы сигналов в ОПКМ при воздействии на его вход стандартного импульса помехи 1/50 мкс по ГОСТ IEC 61000-4-5 амплитудой 1 кВ, приложенного по цепи «провод – провод» при фазовом угле сетевого напряжения 90°. Осциллограммы приведены в разных масштабах по временно́й оси. ОПКМ при испытаниях работал на номинальную нагрузку при номинальном напряжении сети.

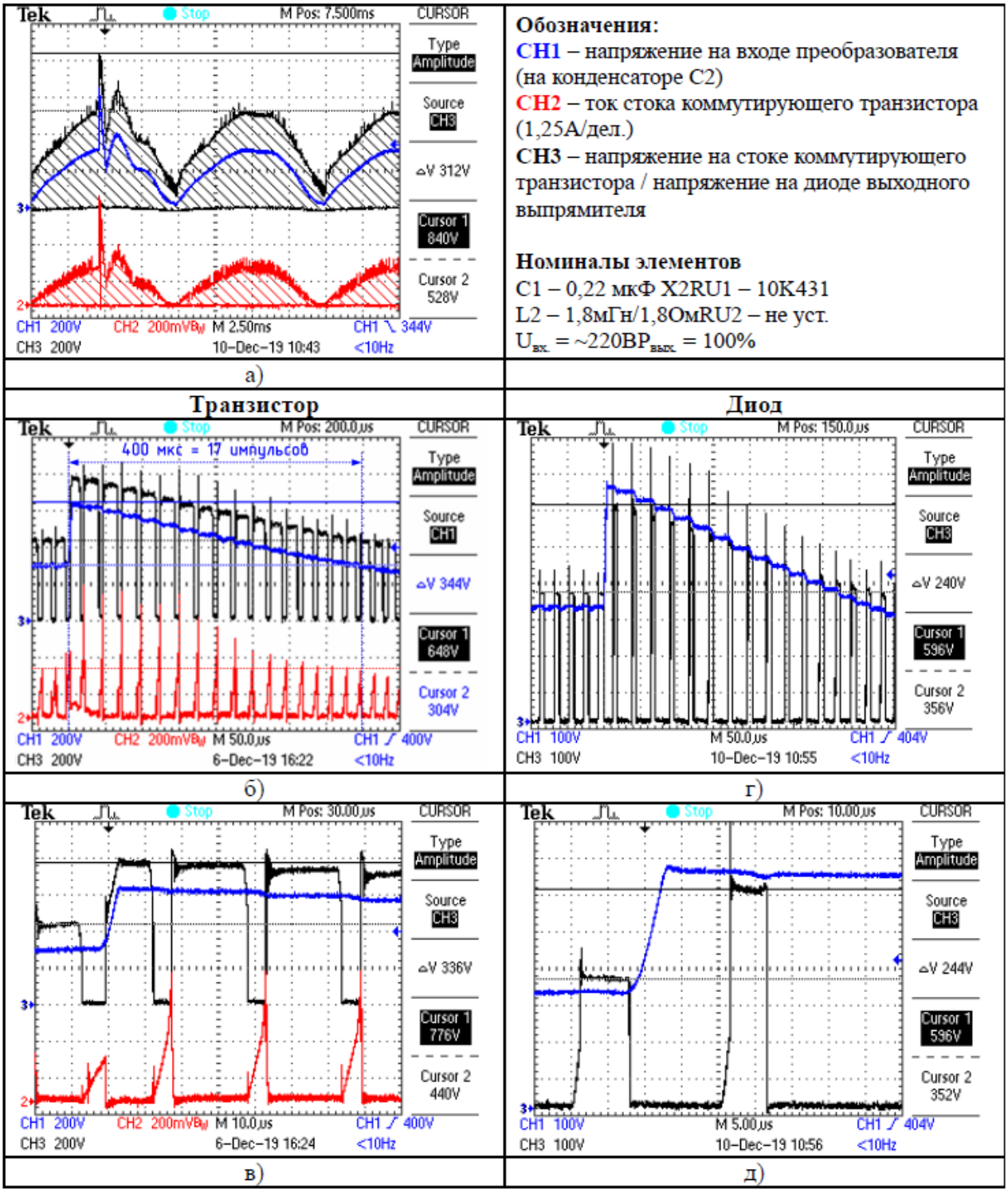



Рисунок 2 - Осциллограммы токов и напряжений в цепях преобразователя: а) – момент воздействия импульсной помехи; б), в) – входное напряжение, напряжение «сток-исток» и ток стока транзистора; г), д) – входное напряжение и напряжение на диоде выходного выпрямителя

В данном примере схема управления преобразователем не имеет функции выключения

при повышенном входном напряжении и ОПКМ продолжает работать. Напряжение на его входе (конденсатор С2), ограниченное варистором, в первый момент времени после воздействия помехи достигает значения +648 В. Соответствующие перенапряжения при этом испытывают коммутирующий транзистор и выходной диод. В данном примере максимальное напряжение на стоке достигает +776 В (+880 В с учетом выброса от индуктивности рассеяния), а обратное напряжение на диоде +596В (+808В с учетом выброса от индуктивности рассеяния).

Интересен тот факт, что сразу после воздействия помехи первые импульсы обратного напряжения на диоде (рис. 2 г и рис. 2 д) имеют амплитуду, гораздо меньшую теоретически возможной. Это следствие насыщения сердечника трансформатора, которое в данном случае облегчает режим выходного диода. Поскольку во время действия импульса помехи преобразователь продолжает работать, энергия этого импульса довольно быстро расходуется нагрузкой и уже через 17 тактов уровни напряжений на входе и на силовых элементах возвращаются к первоначальному значению.

Рассмотрим, в каких режимах при этом оказываются полупроводниковые приборы ОПККМ. На рис. 3 показаны осциллограммы сигналов при воздействии на вход ИИП по схеме «провод – провод» МИП положительной полярности амплитудой 2 кВ при фазовом угле сетевого напряжения 180°. На входе ИИП установлены два варистора, а схема управления преобразователем содержит узел защиты от перенапряжения (ЗПН), останавливающий работу преобразователя при превышении входным напряжением заданного порога. Преобразователь рассчитан на работу с отраженным напряжением $U_{отр.}$=172В.

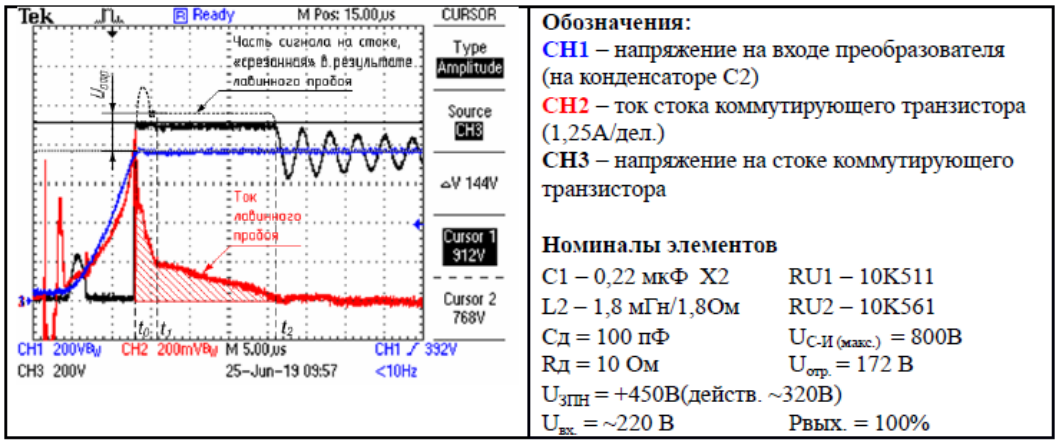



Рисунок 3 - Поглощение импульсной помехи в режиме лавинного пробоя коммутирующего транзистора

Варисторы ограничивают напряжение питания преобразователя на уровне 768В, что ниже максимально допустимого напряжения «сток-исток» МОП-транзистора. При обнаружении превышения напряжения на входе ИИП схема ЗПН выключает МОП-транзистор в момент времени $t_0$. Напряжение на его стоке скачком повышается и на уровне примерно 912В (обусловленном технологическим запасом транзистора и довольно высокой температурой его кристалла на момент начала воздействия перенапряжения) начинается его лавинный пробой.

После этого открылся бы диод *VD*, и началась бы передача запасенной в магнитном поле сердечника энергии в нагрузку. Однако в результате лавинного пробоя транзистора

напряжение на его стоке ограничивается +912В, а через цепь «сток-исток» протекает ток лавинного пробоя. Напряжение на первичной обмотке оказывается меньше и составляет 144В. Напряжение на вторичной обмотке также ограничено. Диод *VD* открыться не может, т.к. напряжение на вторичной обмотке трансформатора ниже напряжения на нагрузке, зафиксированного в рассматриваемый временной период подключенным параллельно ей электролитическим конденсатором $C_{вых.}$ большой емкости. Поэтому почти вся энергия, запасенная в сердечнике трансформатора, поглощается транзистором при лавинном пробое. В данном примере энергия лавинного пробоя составила 17,7 мДж.

В момент времени $t_2$ энергия, накопленная в магнитном поле сердечника, заканчивается, и напряжение на стоке начинает уменьшаться. Ток стока становится близким к току утечки – транзистор выходит из режима лавинного пробоя.

Для того чтобы транзистор выдержал подобный режим работы, тепло, выделяющееся в его кристалле за период времени $t_2 - t_0$ не должно вызывать перегрев кристалла выше максимально допустимой температуры перехода. Понятно, что таким образом транзистор может безопасно поглотить лишь ограниченное число импульсов и далее ему необходимо время для рассеяния тепла. Поэтому схема ЗПН должна срабатывать как можно быстрее и иметь задержку отпускания после того, как входное напряжение придет в норму. На практике достаточная помехоустойчивость обеспечивается при задержке порядка микросекунд, что соответствует одному рабочему такту преобразователя во время воздействия перенапряжения.

**Воздействие синфазной помехи («провод-корпус»)**

Для устройств в металлическом корпусе, предназначенных для подключения к сети по трехпроводной схеме с проводником защитного заземления/ зануления, ГОСТ IEC 61000-4-5 предусматривает испытание на устойчивость к импульсным помехам, воздействующим по цепям «провод – земля». Причем, амплитуда испытательных импульсов гораздо выше, чем при испытаниях по схеме «провод – провод».

Поскольку сетевой фильтр ИИП в таком исполнении обычно содержит Y-конденсаторы $CY_2$, $CY_3$ фильтра синфазной помехи, на входные цепи преобразователя через эти конденсаторы наводятся значительные перенапряжения, не уступающие перенапряжениям при воздействии помехи по схеме «провод – провод». На рис. 4*а* приведена осциллограмма сигналов при воздействии многократных импульсных помех (МИП) амплитудой 2кВ по цепи «провод-корпус», соответствующей испытательному уровню 3 по ГОСТ IEC 61000-4-5. Импульс положительной полярности подается при фазовом угле сетевого напряжения 90°. В схеме установлены конденсаторы $CY_2$, $CY_3$ емкостью 2200 пФ.

Синфазная МИП, приложенная между корпусом устройства и его входными цепями, создает электростатическое поле, которое может выводить из строя некоторые чувствительные компоненты на печатной плате, расположенной близко к корпусу. Поэтому для защиты от мощной синфазной МИП между корпусом и входными цепями включают ограничительные элементы. Разрядник $FV_1$ ограничивает амплитуду МИП, а варисторы $RU_2$ *и* $RU_3$ облегчают гашение возникшей в нём дуги по окончании импульса помехи. Если быстродействия такой защиты окажется недостаточно, можно использовать только варисторную защиту на соответствующее напряжение (вместо разрядника $FV_1$ – перемычка). Возможны два режима:

1) Преобразователь рассчитан таким образом, что напряжения на коммутирующем транзисторе и диоде выходного выпрямителя в момент воздействия помехи не превышают допустимых.

2) Транзистор и диод выбраны таким образом, что при воздействии импульсной помехи они работают в режиме лавинного пробоя и рассеивают на себе часть энергии помехи. Данная энергия должна быть правильно рассчитана, иначе лавинный пробой может перейти в тепловой нагрев с выходом из строя этих элементов.

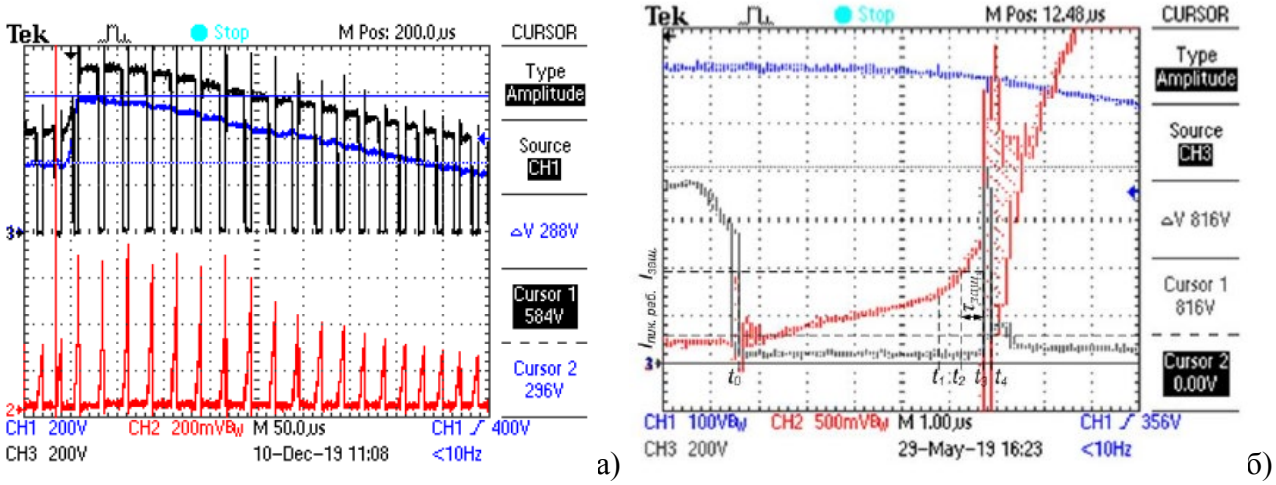



Рисунок 4 - Воздействие МИП по цепи «фаза-корпус» амплитудой 2 кВ (а) и выход из строя коммутирующего транзистора в момент выключения (б)

**Динамические потери и лавинные процессы в элементах схемы при МИП**

Перенапряжения на коммутирующих элементах в момент воздействия импульсной помехи – не единственная опасность. Большую опасность представляют резко возрастающие динамические потери при переключении. На рис. 5 в крупном масштабе приведены осциллограммы выключения коммутирующего транзистора ОПКМ при повышенном вследствие воздействия МИП входном напряжении.

В этом примере схема управления работает в режиме переключения при нулевом токе трансформатора ОПКМ с фиксированным временем открытого состояния ключа и с большой постоянной времени обратной связи, необходимой для коррекции коэффициента мощности (время открытого состояния ключа не успевает измениться за время воздействия МИП) Использован транзистор с максимально допустимым напряжением «сток-исток» 800В.

Как видно из осциллограммы, входное напряжение преобразователя (канал CH1) повышено до +632В (вместо штатных максимально допустимых +395В), поэтому ток в первичной обмотке трансформатора нарастает быстрее, чем при нормальной работе. На участке №1 (рис. 5 а) ток нарастает линейно, а на участке №2 сердечник трансформатора начинает насыщаться и скорость нарастания тока увеличивается. В момент выключения транзистора ток стока в 2 раза превышает ток насыщения трансформатора. На рис. 5 б) в крупном масштабе показан участок №3. Сначала происходит жесткое выключение транзистора. Для перезаряда паразитных емкостей транзистора требуется некоторое время и в это время транзистор находится в активном режиме. В технической документации на транзистор это время обозначается как длительность спадающего фронта (FallTime). В это время на кристалле выделяется большая импульсная мощность. Происходит адиабатический нагрев кристалла.

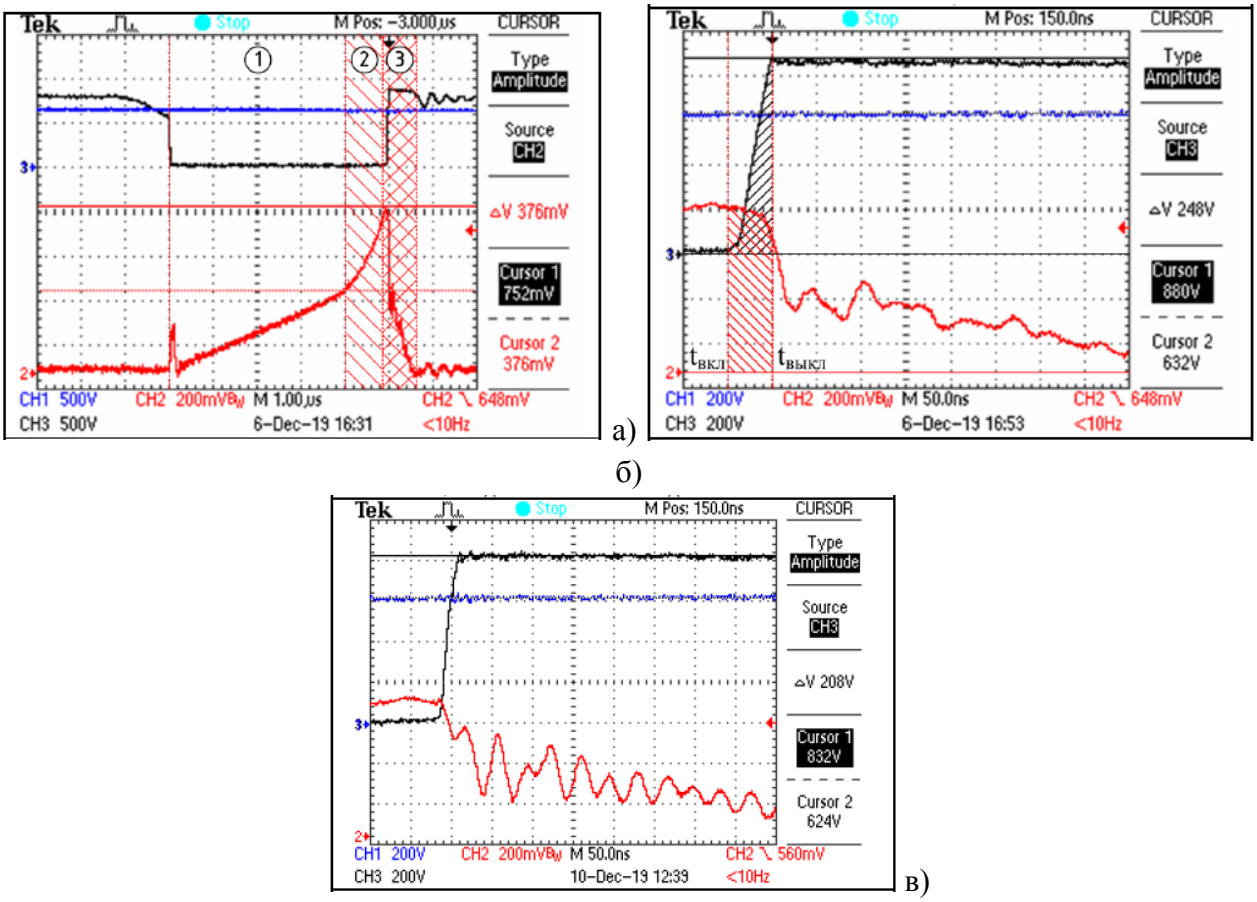



Рисунок 5 - Выключение коммутирующего транзистора ОПКМ при повышенном входном напряжении: а) – импульс повышенного тока стока и насыщение трансформатора (1,25А/дел.); б), в) – жесткое выключение транзистора и последующий лавинный пробой, вызванный выбросом напряжения от индуктивности рассеяния

После выключения транзистора на его стоке наблюдается импульс напряжения, вызванный индуктивностью рассеяния первичной обмотки трансформатора. В данном примере он повышает напряжение на стоке транзистора до 880В и вызывает его лавинный пробой. В данном примере энергия лавинного пробоя может быть вычислена аналитически на основе информации об индуктивности рассеяния трансформатора и пиковом токе первичной обмотки в момент выключения транзистора. На рис. 4 *б* приведена осциллограмма сигналов в момент выхода из строя коммутирующего транзистора, из которой видно, что напряжение на стоке не превышало пробивного с учетом технологического запаса, и режима лавинного пробоя не было.

**Защита от повышенных входных напряжений**

Защита от повышенных входных напряжений подразумевает способность ИИП без повреждения выдерживать длительное (минуты, часы) воздействие на вход ИИП напряжений, значительно превышающих верхний предел диапазона входных рабочих напряжений.

Для реализации защиты необходимо устанавливать варисторы с бóльшим классификационным напряжением, чтобы они выдерживали длительное воздействие аварийного напряжения без повреждений. Однако напряжение ограничения таких варисторов тоже существенно возрастает, что требует применения более высоковольтных транзисторов и диодов, а это, в свою очередь, увеличивает стоимость и ухудшает эксплуатационные характеристики в штатном режиме работы изделия. Альтернативным

вариантом может быть реализация схемы выключения преобразователя на время воздействия перенапряжения или МИП. Пример реализации схемы ЗПН приведен на рис. 6.

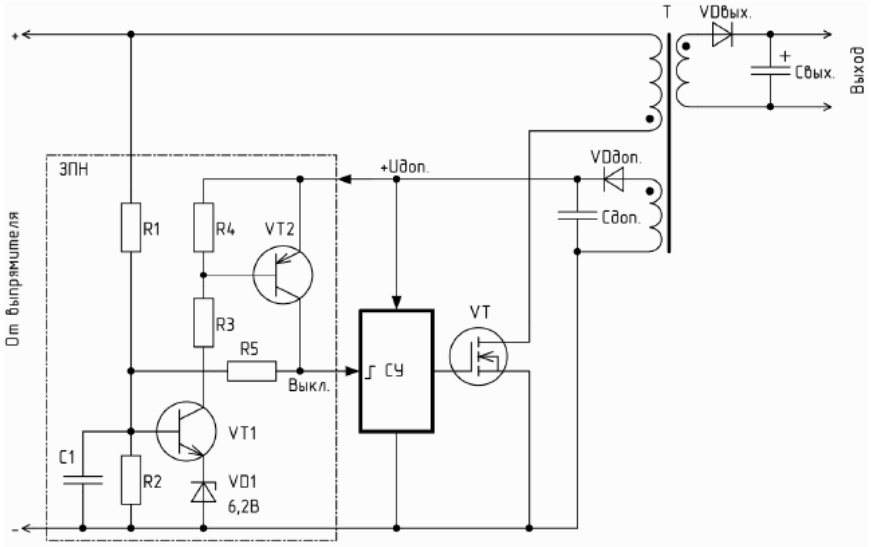



Рисунок 6 - Вариант реализации схемы ЗПН

Схема собрана на недорогих дискретных элементах, но в то же время надежно выключает преобразователь при превышении установленного делителем $R_1$, $R_2$ порога и имеет гистерезис включения. Температурная нестабильность порога срабатывания – не хуже 3,5% в диапазоне температур от минус 40 до +50 °С. Схема успешно используется в составе источников питания для светодиодов.

**Выводы.**

Таким образом, можно констатировать, что главными особенностями при проектировании принципиальных схем и расчетов источников питания на базе однокаскадного обратноходового преобразователя-корректора коэффициента мощности для светодиодов являются требования их стойкости к высоковольтным импульсным помехам из сети. Проведенный анализ и соответствующие различным режимам работы осциллограммы реальных процессов, происходящих в схеме преобразователя в момент воздействия высоковольтной импульсной помехи показал, что предложенная система ОПКМ в полной мере является оптимальной по критериям энергоэффективности и надежности работы для для светодиодных светильников уличного освещения. Предложенные рекомендации по расчету режимов работы и выбору основных полупроводниковых приборов могут быть полезны при проектировании аналогичных источников питания.

**Список использованных источников**

1. Kryukov O.V., Serebryakov A.V. Modern systems of outdoor illumination for compressor stations // Light & Engineering. 2016. Т. 24. № 2. С. 128-131.

2. Юсупов А.А., Александрова Е.М. Ресурсы энергосбережения в осветительных сетях производственных предприятий ТЭК // Автоматизация и IT в энергетике. 2021. № 5. С. 58-62.

3. Васенин А.Б., Степанов С.Е., Гуляев И.В., Крюков О.В. Энергетический менеджмент мониторинга энергоэффективности объектов ТЭК // Автоматизация и IT в энергетике. 2022. № 4 (153). С. 32-43.

4. Степанов С.Е. Повышение искробезопасности электрооборудования в промышленности // Охрана труда и техника безопасности на промышленных предприятиях.

2014. № 8. С. 18-21.

5. Саушев А.В., Романов Л.Р., Крюков О.В. Интеллектуальное управление системой электроэнергетики // Автоматизация и IT в нефтегазовой области. 2023. № 4 (54). С. 30-40.

6. Степанов С.Е. Энергосберегающие технические решения для регулируемых электроприводов мегаваттного класса // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2016. Т. 3. № 3. С. 55-67.

7. Крюков О.В., Туганов Р.Б. Применение методов искусственного интеллекта для управления и мониторинга электромеханических систем // Автоматизация и IT в энергетике. 2020. № 3 (128). С. 10-16.

8. Саушев А.В., Бова Е.В., Тырва В.О. Показатели качества при структурно-параметрическом синтезе электромеханических систем // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2022. Т. 2. С. 156-161.

9. Гуляев И.В., Степанов С.Е., Васенин А.Б., Крюков О.В. Управление ветроэнергетической установкой на базе МДП // Автоматизация и IT в энергетике. 2022. № 10 (159). С. 26-37.

10. Kopylov I.P., Sonin Yu.P., Gulyaev I.V., Vostrukhin A.A. Asynchronized switched motor with orthogonal control // Russian Electrical Engineering. 2002. Т. 73. № 9. С. 1-5.

11. Васенин А.Б., Степанов С.Е., Крюков О.В. Автоматизированный электропривод подводных КС // В сборнике: Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения). Мат. МНТК. Иваново: ИГЭУ, 2023. С. 75-78.

12. Саушев А.В., Туганов Р.Б. Новый этап использования ЭГПА на объектах добычи и транспорта углеводородов // Автоматизация и IT в нефтегазовой области. 2022. № 4. С. 38-44.

13. Степанов С.Е., Васенин А.Б., Крюков О.В. Интеллектуальные функции системы управления и мониторинга распределительных устройств КТП "Каскад" // Автоматизация и IT в энергетике. 2022. № 5 (154). С. 4-13.

14. Васенин А.Б., Степанов С.Е., Гуляев И.В., Подшивалов Е.С. Автономные системы электроснабжения постоянного тока с возобновляемыми источниками энергии // Автоматизация и IT в энергетике. 2023. № 7 (168). С. 16-25.

15. Крюков О.В., Степанов С.Е. Организация диспетчерского управления подстанциями с экспертной оценкой проектных решений // Промышленная энергетика. 2021. № 1. С. 27-34.

16. Гуляев И.В., Погодина С.А., Кузьменко Р.И. Принципы реализации ESG-технологий на отечественных электротехнических предприятиях ТЭК // Автоматизация и IT в энергетике. 2022. № 5 (154). С. 42-47.

17. Крюков О.В., Гуляев И.В., Теплухов Д.Ю. Байесовские модели принятия решений при техническом обслуживании АЭП // Известия ВУЗов. Электромеханика. 2022. № 3. С. 49-55.

18. Васенин А.Б., Хлынин А.С. Новая система поддержки диспетчерских решений предприятий ТЭК по результатам оценки их энергоэффективности // Автоматизация и IT в энергетике. 2019. № 12 (125). С. 16-24.

19. Крюков О.В., Степанов С.Е. Новые конструкции электроприводных ГПА // В сборнике: Труды XVII Международной конференции "Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические Материалы и Компоненты". 2018. С. 177-180.

20. Косоротов А.А., Крюков О.В., Саушев А.В. Функциональные возможности мониторинга распределительных устройств цифровых подстанций // В сборнике:

Фёдоровские чтения — 2021. LI международная научно-практическая конференция. 2021. С. 143-151.

**Bibliography:**

1. Kryukov O.V., Serebryakov A.V. Modern systems of outdoor illumination for compressor stations // Light & Engineering. 2016. V. 24. No. 2. Pp. 128-131.

2. Yusupov A.A., Aleksandrova E.M. Energy Saving Resources in Lighting Networks of Production Enterprises in the Fuel and Energy Complex // Automation and IT in Power Engineering. 2021. No. 5 (142). Pp. 58-62.

3. Vasenin A.B., Stepanov S.E., Gulyaev I.V., Kryukov O.V. Energy Management of Energy Efficiency Monitoring of Fuel and Energy Complex Facilities // Automation and IT in Power Engineering. 2022. No. 4 (153). Pp. 32-43.

4. Stepanov S.E. Improving the Spark Safety of Electrical Equipment in Industry // Labor Protection and Safety at Industrial Enterprises. 2014. No. 8. Pp. 18-21.

5. Saushev A.V., Romanov L.R., Kryukov O.V. Intelligent Management of the Electric Power System // Automation and IT in the Oil and Gas Industry. 2023. No. 4 (54). Pp. 30-40.

6. Stepanov S.E. Energy-saving technical solutions for adjustable electric drives of the megawatt class // Electrotechnics: Network Electronic Scientific Journal. 2016. Vol. 3. No. 3. Pp. 55-67.

7. Kryukov O.V., Tuganov R.B. Application of artificial intelligence methods for control and monitoring of electromechanical systems // Automation and IT in Power Engineering. 2020. No. 3 (128). Pp. 10-16.

8. Saushev A.V., Bova E.V., Tyrva V.O. Quality indicators in the structural and parametric synthesis of electromechanical systems // Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality". 2022. Vol. 2. Pp. 156-161.

9. Gulyaev I.V., Stepanov S.E., Vasenin A.B., Kryukov O.V. Management of a Wind Power Plant Based on TIR // Automation and IT in Energy. 2022. No. 10 (159). Pp. 26-37.

10. Kopylov I.P., Sonin Yu.P., Gulyaev I.V., Vostrukhin A.A. Asynchronized switched motor with orthogonal control // Russian Electrical Engineering. 2002. Vol. 73. No. 9. Pp. 1-5.

11. Vasenin A.B., Stepanov S.E., Kryukov O.V. Automated Electric Drive for Underwater Pumps // In the collection: State and Prospects of Development of Electrical and Thermal Engineering (XXII Benardosov Readings). Mat. of the International Scientific and Technical Conference. Ivanovo: ISEU, 2023. Pp. 75-78.

12. Saushev A.V., Tuganov R.B. A New Stage of Using Electric Gas-Pressure Aggregates at Hydrocarbon Production and Transportation Facilities // Automation and IT in the Oil and Gas Industry. 2022. No. 4 (50). Pp. 38-44.

13. Stepanov S.E., Vasenin A.B., Kryukov O.V. Intelligent Functions of the Control and Monitoring System for Kaskad Distribution Units // Automation and IT in the Power Industry. 2022. No. 5 (154). Pp. 4-13.

14. Vasenin A.B., Stepanov S.E., Gulyaev I.V., Podshivalov E.S. Autonomous DC Power Supply Systems with Renewable Energy Sources // Automation and IT in Power Engineering. 2023. No. 7 (168). Pp. 16-25.

15. Kryukov O.V., Stepanov S.E. Organization of Dispatching Management of Substations with Expert Assessment of Design Solutions // Industrial Power Engineering. 2021. No. 1. Pp. 27-34.

16. Gulyaev I.V., Pogodina S.A., Kuzmenko R.I. Principles of Implementing ESG Technologies at Domestic Electrical Enterprises of the Fuel and Energy Complex // Automation and IT in Power Engineering. 2022. No. 5 (154). Pp. 42-47.

17. Kryukov O.V., Gulyaev I.V., Teplukhov D.Yu. Bayesian Models of Decision-Making in the Maintenance of Power Engineering Systems // Izvestiya VUZov. Electromechanics. 2022. No. 3. Pp. 49-55.

18. Vasenin A.B., Khlynin A.S. New system of support for dispatching decisions of fuel and energy complex enterprises based on the results of assessing their energy efficiency // Automation and IT in the power industry. 2019. No. 12 (125). Pp. 16-24.

19. Kryukov O.V., Stepanov S.E. New Designs of Electric-Driven GPPs // In the collection: Proceedings of the XVII International Conference "Electromechanics, Electrotechnologies, Electrical Materials and Components". 2018. Pp. 177-180.

20. Kosorotov A.A., Kryukov O.V., Saushev A.V. Functional capabilities of monitoring distribution devices of digital substations // In the collection: Fedorov Readings — 2021. LI International Scientific and Practical Conference. 2021. Pp. 143-151.

*Егор Сергеевич Подшивалов, аспирант кафедры «Электрификации и автоматизации» Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, г. Княгинино, Нижегородской области, коммерческий инженер ООО «ТСН-электро». 603108, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Электровозная, 7 А. SPIN-код: 9115-8086, AuthorID (РИНЦ): 1173793, e-mail: e.podshivalov-tcn-nn@yandex.ru*

*Олег Викторович Крюков, доктор технических наук, доцент, заместитель директора по науке ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород. Россия, 603108, г. Нижний Новгород, ул. Электровозная, 7А. SPIN-код: 9406-6475. AuthorID (РИНЦ): 498607. ORCID: 0000-0002-5682-1946. e-mail: o.v.kryukov@mail.ru*

*Игорь Васильевич Гуляев, доктор технических наук, профессор (Россия), руководитель НОЦ «Энергоэффективные двигатели двойного питания» Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева. Россия, 430005, г. Саранск, ул. Б. Хмельницкого, 39. SPIN-код: 7203-6720. AuthorID (РИНЦ): 40902. e-mail: ivgulyaev@mail.ru*

*Александр Васильевич Саушев, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод и электрооборудование береговых установок» Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, г. Санкт-Петербург. Россия,198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7. SPIN-код: 9692-8603. AuthorID (РИНЦ): 634520. e-mail: saushev@bk.ru*

## USE OF A SINGLE-CAMPUS POWER FACTOR CORRECTOR FOR LED STRAND LIGHTING SUPPLY

E.S. Podshivalov, O.V. Kryukov, I.V. Gulyaev, A.V. Saushev

Features of circuit design and calculation of power supply for LED lamps, taking into account their resistance to high-voltage impulse interference from the network. The analysis has been carried out and the oscillograms of the real processes occurring in the converter circuit at the

moment of interference have been presented. It has been shown that a significant improvement in the energy efficiency and reliability of LED lighting in industrial and social facilities, including the agro-industrial complex, is associated with the more stable and reliable operation of power supplies based on a single-stage fly back power factor corrector with power supply from digital substations and resistance to high-energy impulse interference. The article analyzes the physics of processes in the converter-corrector system and the main characteristics of its operation in various modes, taking into account stochastic disturbances of various kinds. In practical implementation, sufficient noise immunity is provided with a delay in the converter circuit of the order of microseconds, which corresponds to one working cycle of the corrector during the impact of overvoltage. Recommendations are given on the calculation of operating modes and the selection of the main devices of the power factor converter-corrector for LED lighting of street and area objects. A practical scheme for protecting LED power supplies from increased input voltages is proposed.

Keywords: electrical system, transformer substation, interference, light-emitting diode, LED driver, switching power supply.

*Egor Sergeevich Podshivalov, postgraduate student in the Electrification and Automation Department of the Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino, Nizhny Novgorod Region; commercial engineer at TSN-Electro LLC. 7A Elektrovoznaya St., Nizhny Novgorod, 603108, Russia. SPIN: 9115-8086, AuthorID (RINTS): 1173793, e-mail: e.podshivalov-tcn-nn@yandex.ru*

*Oleg Viktorovich Kryukov, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Science at TSN-Electro LLC, Nizhny Novgorod. 7A Elektrovoznaya St., Nizhny Novgorod, 603108, Russia. SPIN: 9406-6475. Author ID (RSCI): 498607. ORCID: 0000-0002-5682-1946. E-mail: o.v.kryukov@mail.ru*

*Igor Vasilievich Gulyaev, Doctor of Engineering Sciences, Professor (Russia), Head of the Research and Educational Center "Energy-Efficient Dual-Fed Motors" at the N.P. Ogarev Mordovian State University. Russia, 430005, Saransk, B. Khmelnitsky St., 39. SPIN code: 7203-6720. Author ID (RSCI): 40902. Email: ivgulyaev@mail.ru*

*Alexander Vasilyevich Saushev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Electric Drives and Electrical Equipment of Onshore Installations, Admiral S. O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg. Russia, 198035, St. Petersburg, Dvinskaya St., 5/7. SPIN code: 9692-8603. Author ID (RSCI): 634520. Email: saushev@bk.ru*

**УДК 621.313-83**

# ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ И СТАТИЧЕСКИХ КОМПЕНСАТОРОВ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ЗАТРАТ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

А.Б. Васенин[1], С.Е. Степанов[1], Е.С. Подшивалов[2,3], О.В. Крюков[3], И.В. Гуляев[4]

[1]МГ ООО “Газпром проектирование”, г. Нижний Новгород
[2]Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, г. Княгинино, Нижегородской области,
[3]ООО «ТСН-электро»
[4]Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева

***Аннотация.*** *Рассмотрены проблемы снижения затрат на электроэнергию, которые могут быть решены благодаря новым решениям по совершенствованию учёта потребления электроэнергии при имеющемся спектральном составе параметров сети, а также с применением устройств, подавляющих высшие гармоники и компенсирующие реактивную мощность. Предложен метод определения спектра высших гармоник на интервале периода основной частоты на основе быстрого преобразования Фурье, Уолша и Хаара. Разработан новый алгоритм учета электроэнергии в сети, содержащей высшие гармоники, основой которого является применение вновь введенного интегрального показателя тока, по которому оценивается реактивная мощность. Приведена пошаговая процедура реализации алгоритма учета электроэнергии, согласно которой производится учет активной мощности по всем гармоникам и реактивной энергии по интегральному показателю тока, выбирается счетчик реактивной мощности и в систему управления вводится математический аппарат с быстрым преобразованием Фурье для повышения быстродействия работы фильтров и повышения качества электроэнергии. Проверка работоспособности алгоритма произведена в среде компьютерного моделирования MATLAB/Simulink, для чего на вход алгоритма подавались мгновенные значения системы напряжений, форма которых соответствует кривой вычисленной амплитуды напряжения пространственного вектора. В результате для данного программного комплекса представляется возможным проведение анализа спектрального состава сети, позволяющее увеличить быстродействие фильтро-компенсирующего устройства, что влияет на качество электроэнергии и ее потребление.*

***Ключевые слова:*** *система электроснабжения; распределительное устройство; суммарный коэффициент искажения напряжения; показатель качества электроэнергии; высшие гармоники.*

## Введение.

Задачи снижения затрат на электроэнергию у потребителя могут быть решены только благодаря одновременным превентивным мерам с двух сторон. С одной стороны, предлагаются новые решения по совершенствованию учёта потребления электроэнергии при имеющемся спектральном составе напряжений и токов [1-4]. С другой стороны, применение устройств, подавляющих высшие гармоники и компенсирующие реактивную мощность с использованием распределительных устройств (РУ) в трансформаторных подстанциях (КТП)

(рис. 1), что интегрально приводит к уменьшению энергопотребления [5-8].



Рисунок 1 - Наладка электрооборудования трансформаторной подстанции нового поколения

**Современные возможности ФКУ в РУ**

К устройствам, предназначенным к снижению уровня несинусоидальности, традиционно относят пассивные и активные фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) [9-12], рассчитанные на различные уровни напряжения. В сетях среднего напряжения широкое распространение получили устройства СТАТКОМ (статические компенсаторы), которые могут выполнять несколько функций одновременно:

- снижать уровень искажений;
- регулировать уровень реактивной мощности;
- поддерживать заданный уровень напряжения, компенсируя его провалы.

Независимо выбранного предприятием типа ФКУ (СТАТКОМ или силовой активный фильтр) для его работы необходимо определить:

- спектральный состав искаженного напряжения/тока для выявления гармоник, подлежащих подавлению;
- требуемую реактивную мощность, необходимую для компенсации реактивной мощности.

Для корректной работы силовых ФКУ на предприятиях среднего уровня напряжения (6-10 кВ) необходимо не только определить спектральный состав напряжения, но и обеспечить минимальную инерционность в системе управления фильтром. Это может быть достигнуто с помощью модификаций метода преобразования Фурье, которые позволяют быстрее определить гармонический состав напряжения/тока системы. При определении суммарного коэффициента искажения по напряжению необходимо учитывать модуль полного сопротивления системы, соотношение его составляющих (активной и реактивной) и закладывать математический аппарат расчёта мощности под соответствующие характеристики сети [13-16].

**Метод анализа спектра напряжения и тока**

Для соблюдения условий работы ФКУ в части обеспечения безынерционности и снижения запаздывания при измерении мгновенной активной мощности предлагается новое

решение по определению гармонического состава нагрузки в сетях среднего уровня напряжения 6-10 кВ. Дело в том, что несинусоидальность в таких сетях чаще всего обусловлена наличием в них мощных электроприемников с нелинейной вольтамперной характеристикой (ВАХ) [17-20].

К таким объектам, в первую очередь, следует отнести частотно-регулируемый электропривод (ЧРП) с неуправляемым выпрямителем, выполненным на основе диодного моста. Для спектра потребляемого тока диодного выпрямителя характерны высокие амплитуды 5-ой и 7-ой гармоник, что может приводить к существенному ухудшению формы напряжения участка распределительной сети с относительно низким значением сопротивления короткого замыкания (КЗ) на входе. Кроме того, возникновение установившихся режимов работы сети с искажённой формой напряжений может быть вызвано развитием аварийных ситуаций в передающем и генерирующем электрооборудовании. Типичными аварийными ситуациями в распределительных сетях являются межфазные КЗ в обмотках трансформаторов и линиях электропередач.

Быстрое определение параметров установившегося несинусоидального режима работы сети позволяет эффективно восстанавливать форму напряжения при наличии в сети активных силовых установок, способных брать на себя функции ФКУ, что наиболее актуально для сетей, в которых мощные электроприемники с нелинейной ВАХ имеют резко-переменный характер нагрузки. К таким устройствам можно отнести динамические компенсаторы семейства FACTS, активные выпрямители в составе электропривода, сетевые инверторы напряжения в составе распределённых генерирующих установок (например, ветрогенераторов). Кроме того, быстрое определение параметров высших гармонических составляющих позволяет своевременно реагировать на аварийные ситуации в сети, для которых характерны искажения формы напряжения на определённых частотах, и с помощью устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) изолировать аварийные участки сети.

Традиционно для оценки спектрального состава напряжений применяются алгоритмы на основе преобразования Фурье, которое позволяет разложить несинусоидальный периодический сигнал на отдельные синусоиды – гармоники с определённой частотой и амплитудой. Для точной оценки алгоритмы на основе преобразования Фурье требуют анализа сигнала на его полном периоде, что уменьшает время реакции таких алгоритмов до 20 мс для сетей с частотой напряжения 50 Гц.

Рассмотрим метод оценки спектрального состава системы трёхфазных напряжений, основанный на представлении её в виде пространственного вектора на ортогональной плоскости, координаты которого вычисляются в соответствии с преобразованием Кларка:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot [C] \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $u_a$, $u_b$, $u_c$ – мгновенные значения напряжений, *В*; $u_\alpha$, $u_\beta$ – координаты пространственного вектора напряжения сети на плоскости αβ, *В;* $u_0$ – компонент нулевой последовательности, *В; С* – матрица преобразования Кларка.

Особенность распределительных сетей 6-10 кВ заключается в трёхпроводной схеме, в

которой компонент $u_0$ отсутствует, что упрощает систему (1) до двух уравнений. Выразим пространственный вектор $u$ напряжения сети, что позволит применять операции векторного исчисления:

$$\underline{u} = u_\alpha + ju_\beta = Ue^{j\theta}, \tag{2}$$

где $U$ – модуль (длина) вектора напряжения, $B$; $\theta$ – угол поворота вектора напряжения, рад.

Модуль и угол поворота пространственного вектора вычисляются следующим образом:

$$U = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}; \theta = atan2\left(\frac{u_\beta}{u_\alpha}\right), \tag{3}$$

где *atan2* – функция арктангенса, возвращающая аргумент независимо от знака выражения в скобках (3).

Преобразование системы синусоидальных напряжений в установившемся режиме к пространственному вектору позволяет выделить несколько особенностей:

- годограф пространственного вектора представляет собой окружность, то есть модуль вектора является постоянной величиной, а угол поворота вектора имеет постоянное приращение;

- модуль пространственного вектора напряжения сети численно равен амплитуде фазных напряжений, а угол поворота пространственного вектора в каждый момент времени численно равен фазе (углу поворота сигнала на комплексной плоскости) напряжения в фазе А.

Так как преобразование (3) является линейной операцией, то представив несинусоидальную систему напряжений в установившемся режиме в виде суммы основной гармоники и высших гармонических составляющих, мы также можем представить пространственный вектор такой системы в виде суммы пространственных векторов основной гармоники и пространственных векторов высших гармонических составляющих.

Принято допущение о том, что при анализе пространственного вектора напряжения трёхпроводной сети можно пренебречь:

- второй гармоникой, наличие которой обусловлено несимметрией напряжения сети;

- высшими гармониками четных порядков (4, 6, 8…), так как наличие их в спектре распределительных сетей статистически незначительно;

- третьей гармоникой – она взаимно компенсируется между фазами в трёхпроводной сети.

С учётом принятых допущений вектор трёхфазной системы несинусоидальных напряжений в установившемся режиме может быть представлен в следующем виде:

$$\underline{u} = \underline{u}^{(1)} + \sum_{h=5}^{\infty} \underline{u}^{(h)}, \tag{4}$$

где $h$ – порядок высшей гармоники в спектре напряжения сети.

Рассмотрим суперпозицию вектора основной гармоники и высшей гармонической составляющей на примере 5-ой гармоники. На рис. 2 представлено схематичное изображение суперпозиции рассматриваемых векторов. Пусть в начальный момент времени углы поворота обоих векторов совпадают, тогда длина вектора $u$ будет максимальной и равной сумме длин векторов $u^{(1)}$ и $u^{(5)}$. Частота вращения вектора $u^{(5)}$ в 5 раз выше частоты вращения вектора $u^{(1)}$, тогда за четверть оборота вектора $u^{(5)}$ вектор $u^{(1)}$ поворачивается на 18°. На рис. 2 показаны 5 последующих положений векторов $u^{(1)}$ и $u^{(5)}$, а чёрными точками отмечено

положение вектора *u*, обусловленное сложением векторов.

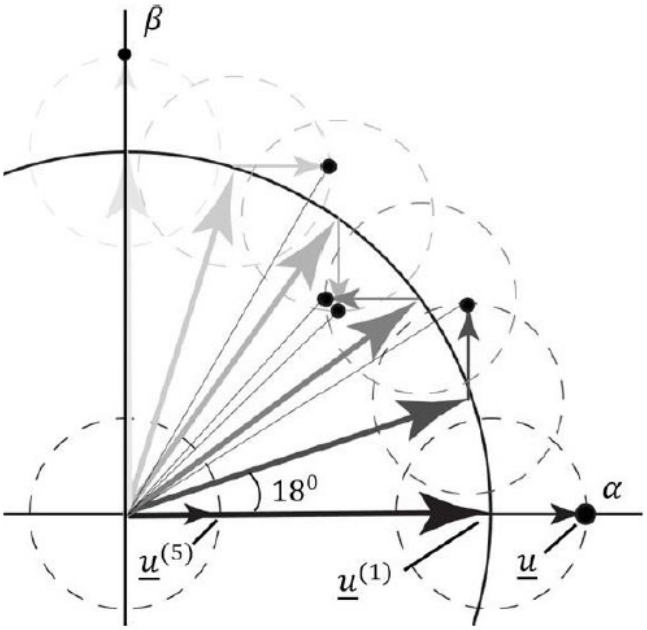



Рисунок 2 - Схематичное изображение суперпозиции пространственных векторов основной и пятой гармоник напряжения сети на плоскости *αβ*

На рис. 2 можно отметить две важные особенности. Во-первых, максимальная (минимальная) длина вектора *u* всегда представляет собой сумму (разность) вектора основной и 5-ой гармоник в моменты времени, когда оба вектора лежат на одном луче, направленном из центра координат. Во-вторых, траектория вектора *u* начинает повторять себя через четверть периода, при этом амплитуда вектора *u* изменяется по синусоидальному закону вокруг сигнала амплитуды основной гармоники. Проведя численное моделирование в среде MATLAB для гармоник других порядков, установлены две основные зависимости:

1) период колебаний амплитуды вектора *u* всегда соответствует периоду гармоники *Th* , порядок которой *h* предшествует порядку гармоники *h*+1, обуславливающей колебание;

2) амплитуда колебаний *u* равна амплитуде гармоники, обуславливающей колебания.

На основе полученных зависимостей разработан быстродействующий алгоритм определения спектра напряжения трёхпроводной сети, идеей которого является преобразование системы трёхфазных напряжений к пространственному вектору и определение спектра амплитуд и фаз высших гармоник с помощью применения оконного преобразования Фурье к сигналу амплитуды пространственного вектора.

Полный период 5-ой гармоники равен 4 мс, таким образом, минимальный период колебания пространственного вектора напряжения сети, на котором можно реализовать оконное преобразование Фурье для полного периода колебания амплитуды, обусловленного высшими гармоническими составляющими будет составлять 5 мс, исходя из этого выбран размер окна *T* для оконного преобразования Фурье.

**Проверка работоспособности алгоритма**

Проверка работоспособности алгоритма произведена в среде компьютерного моделирования MATLAB/Simulink. Для этого на вход алгоритма подавались мгновенные значения напряжений $u_a$, $u_b$, $u_c$, форма которых представлена на рис. 3. Кроме того, на рис. 3 представлена форма кривой вычисленной амплитуды *U* пространственного вектора $u^{(k)}$. До момента времени 0.04 с напряжения имеют синусоидальную форму, амплитуда пространственного вектора соответственно постоянна. На рис. 4 представлены вычисленные

в соответствии с оконным преобразованием Фурье спектры кривой амплитуды пространственного вектора.

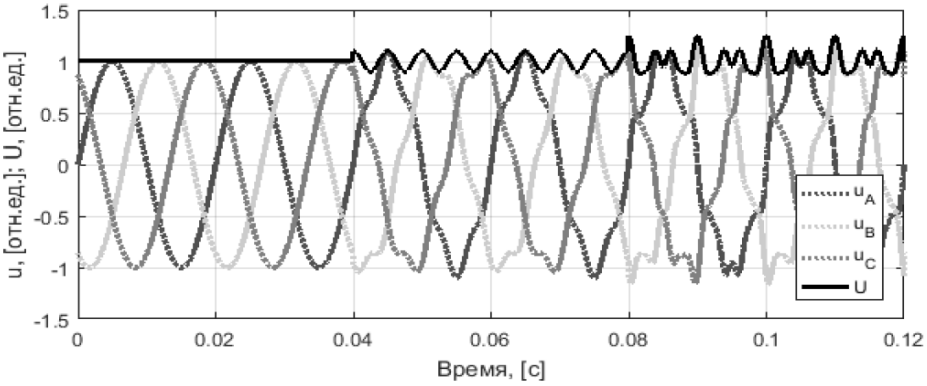



Рисунок 3 - Форма сгенерированных сигналов фазных напряжений и вычисленная амплитуда пространственного вектора напряжения сети

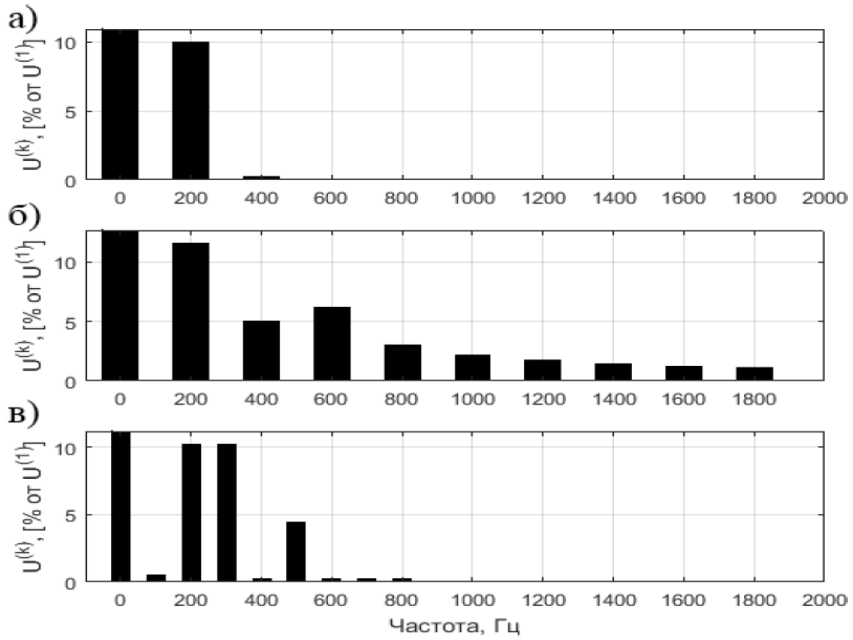



Рисунок 4 - Спектр сигнала амплитуды пространственного вектора напряжения сети, вычисленный с помощью преобразования Фурье на окне размером 5 мс: а) 5-ой, 7-ой и 11-ой, 13-ой и 17-ой гармоник; б)5-ой, 7-ой, 11-ой, 13 и 17-ой гармоник при учете зеркально отраженного сигнала

Из гистограммы рис. 4а видно, что на частоте 200 Гц, соответствующей 4-ой гармонике входных сигналов напряжения, вычисленная амплитуда синусоидальных колебаний составляет 10%. Из гистограммы рис. 4б видно, что вычисленный спектр содержит гармоники, отсутствующие в исходном сигнале. Причиной является тот факт, что на рассматриваемом промежутке в 5 мс наложение нескольких гармонических составляющих приводит к тому, что график амплитуды пространственного вектора оказывается симметричен по полупериодам в 10мс, внутри которых четверти периода оказываются зеркально отражены. Из рис. 4в видно, что гармоникам с частотами 200 и 300 Гц (4 и 6 порядок) соответствует амплитуда 10% от DC-составляющей, а гармонике на частоте 500 Гц - амплитуда 5% от DC-составляющей.

**Алгоритм учета потребления электроэнергии**

По результатам проведенных расчетов представляется возможным сформировать алгоритм учета потребления электроэнергии при наличии искажений в РУ предприятий (рис.

5).




Рисунок 5 - Алгоритм учета электроэнергии в РУ предприятий при наличии искажений

Учет электроэнергии будет вестись тем корректнее, чем ниже уровень искажений в сети, на что направлено применение ФКУ. С этой точки зрения предлагается усовершенствовать работу ФКУ, в системе управления которых закладывается математический аппарат для определения спектрального состава напряжений и токов. При этом ФКУ должны обладать низкой инерционностью, то есть запаздывание должно стремиться к нулю.

Алгоритм учета электроэнергии пошагово заключается в следующем (рис. 5):

1. учет активной мощности ведется по всем гармоникам, с учетом знака активной мощности;

2. учет реактивной энергии:

- ведется по интегральному показателю тока или

- определяется модуль полного сопротивления системы и соотношение его активной и реактивной составляющих;

- согласно полученному соотношению, выбирается счетчик реактивной мощности, работа которого в данных условиях будет проводиться более корректно;

3. в систему управления ФКУ вводится математический аппарат с быстрым преобразованием Фурье для повышения быстродействия работы фильтров и повышения качества электроэнергии.

**Выводы**

В результате проведенных исследований показано, что учет реактивной мощности должен производиться более точно, благодаря снижению уровня несинусоидальности напряжения. Для этого необходимо предварительно проводить предиктивный анализ спектрального состава напряжения и тока предложенным методом быстрого преобразования Фурье, что позволяет снизить инерционность в работе фильтро-компенсирующих устройств. Этот дополнительный фактор повышает качество электроэнергии и расширяет область применения сертифицированных счетчиков, а в случае принятия к учету интегрального показателя тока – данные также будут учтены более корректно.

**Список использованных источников**

1. Васенин А.Б., Степанов С.Е., Подшивалов Е.С., Крюков О.В. Обеспечение устойчивости электроэнергетических систем автоматическим регулированием возбуждения // Автоматизация и IT в энергетике. 2023. № 5 (166). С. 16-25.

2. Саушев А.В., Романов Л.Р., Крюков О.В. Интеллектуальное управление системой

электроэнергетики // Автоматизация и IT в нефтегазовой области. 2023. № 4 (54). С. 30-40

3. Васенин А.Б., Степанов С.Е., Гуляев И.В., Крюков О.В. Энергетический менеджмент мониторинга энергоэффективности объектов ТЭК // Автоматизация и IT в энергетике. 2022. № 4 (153). С. 32-43.

4. Kopylov I.P., Sonin Yu.P., Gulyaev I.V., Nikulin V.V. Contactless asynhronized synchronous motor // Russian Electrical Eng. 1999. Т. 70. № 9. С. 35-41.

5. Степанов С.Е., Васенин А.Б., Крюков О.В. Интеллектуальные функции систем управления и мониторинга распределительных устройств КТП "Каскад" // Автоматизация и IT в энергетике. 2022. № 5 (154). С. 4-13.

6. Васенин А.Б., Степанов С.Е., Крюков О.В. Блочно-модульные КТП-10/0,4 с функциями цифровой подстанции для арктических объектов ПАО "ГАЗПРОМ" // Наука и техника в газовой промышленности. 2023. № 2 (94). С. 9-18.

7. Крюков О.В., Степанов С.Е. Организация диспетчерского управления подстанциями компрессорных цехов с экспертной оценкой проектных решений // Промышленная энергетика. 2021. № 1. С. 27-34.

8. Гуляев И.В., Степанов С.Е., Васенин А.Б., Крюков О.В. Разработка прикладного программного обеспечения для системы геотехнического мониторинга газопроводов // Контроль. Диагностика. 2022. Т. 25. № 6 (288). С. 48-59.

9. Крюков О.В., Гуляев И.В. Стабилизация напряжения в высоковольтных преобразователях частоты при работе электроприводов ГПА // Известия ВУЗов. Электромеханика. 2023. Т. 66. № 3. С. 29-35.

10. Васенин А.Б., Хлынин А.С. Новая система поддержки диспетчерских решений предприятий ТЭК по результатам оценки их энергоэффективности // Автоматизация и IT в энергетике. 2019. № 12 (125). С. 16-24.

11. Воробьев С.В., Гуляев И.В. Средства и методы релейной защиты и автоматики для вдольтрассовых ЛЭП // В сб.: Фёдоровские чтения - 2021. LI МНПК с элементами научной школы. 2021. С. 151-159.

12. Васенин А.Б., Степанов С.Е., Крюков О.В. Система интеллектуального мониторинга состояния магистрального газопровода "Сахалин-Хабаровск-Владивосток" // Автоматизация и IT в нефтегазовой области. 2019. № 2 (36). С. 40-53.

13. Гуляев И.В., Волков А.С. Компьютерное моделирование мощного ЧРП объектов ТЭК // Автоматизация и IT в энергетике. 2022. № 1 (150). С. 32-41.

14. Крюков О.В., Гуляев И.В., Теплухов Д.Ю. Байесовские модели принятия решений при техническом обслуживании АЭП // Известия ВУЗов. Электромеханика. 2022. № 3. С. 49-55.

15. Крюков О.В., Гуляев И.В., Теплухов Д.Ю. Обеспечение энергоэффективных режимов работы ЭГПА // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2022. Т. 65. № 1. С. 42-48.

16. Kryukov O., Gulyaev I., Teplukhov D. Optimize of parallel operation several electric driven gas pumping units on a single gas pipeline // В сборнике: Proceedings - 2021 3rd Intern. Conf. on Control Systems, Math. Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021. 3. 2021. С. 1070-1074.

17. Гуляев И.В., Тутаев Г.М. Моделирование электромеханических процессов обобщенной электромеханической системы на основе асинхронизированного ВД // Саранск. 2004.

18. Васенин А.Б., Степанов С.Е., Крюков О.В. Автоматизированный электропривод

подводных компрессорных станций // В сборнике: Состояние и перспективы развития электротехнологии (XXII Бенардосовские чтения). Материалы МНТК. Иваново: ИГЭУ, 2023. С. 75-78.

19. Крюков О.В., Туганов Р.Б. Применение методов искусственного интеллекта для управления электромеханических систем // Автоматизация и IT в энергетике. 2020. № 3 (128). С. 10-16.

20. Gulyaev I., Teplukhov D. Improving the reliability of STD-12500-2-type electric motor of turbocompressors by predicting its state by means of spectrum analysis // В сборнике: 2021 18th International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives, ACED 2021 - Proceedings. 18. 2021. С. 9462281.

**Bibliography:**

1. Vasenin A.B., Stepanov S.E., Podshivalov E.S., Kryukov O.V. Ensuring the Stability of Electric Power Systems by Automatic Regulation of Excitation // Automation and IT in the Power Industry. 2023. No. 5 (166). Pp. 16-25.

2. Saushev A.V., Romanov L.R., Kryukov O.V. Intelligent Control of the Electric Power System // Automation and IT in the Oil and Gas Industry. 2023. No. 4 (54). Pp. 30-40

3. Vasenin A.B., Stepanov S.E., Gulyaev I.V., Kryukov O.V. Energy Management of Energy Efficiency Monitoring of Fuel and Energy Complex Facilities // Automation and IT in Power Engineering. 2022. No. 4 (153). pp. 32-43.

4. Kopylov I.P., Sonin Yu.P., Gulyaev I.V., Nikulin V.V. Contactless asynchronous synchronous motor // Russian Electrical Eng. 1999. Vol. 70. No. 9. pp. 35-41.

5. Stepanov S.E., Vasenin A.B., Kryukov O.V. Intelligent functions of control and monitoring systems of KTP "Cascade" switchgear // Automation and IT in the energy sector. 2022. No. 5 (154). Pp. 4-13.

6. Vasenin A.B., Stepanov S.E., Kryukov O.V. Block-modular KTP-10/0.4 with digital substation functions for the Arctic facilities of PJSC Gazprom // Science and Technology in the Gas Industry. 2023. No. 2 (94). Pp. 9-18.

7. Kryukov O.V., Stepanov S.E. Organization of Dispatching Control of Substations of Compressor Plants with Expert Assessment of Design Solutions // Industrial Power Engineering. 2021. No. 1. Pp. 27-34.

8. Gulyaev I.V., Stepanov S.E., Vasenin A.B., Kryukov O.V. Development of Application Software for Geotechnical Monitoring System of Gas Pipelines // Control. Diagnostics. 2022. Vol. 25. No. 6 (288). Pp. 48-59.

9. Kryukov O.V., Gulyaev I.V. Voltage Stabilization in High-Voltage Frequency Converters During the Operation of GPA Electric Drives // Izvestiya VUZov. Electromekhanika. 2023. V. 66. No. 3. Pp. 29-35.

10. Vasenin A.B., Khlynin A.S. New system of support for dispatching decisions of fuel and energy complex enterprises based on the results of assessing their energy efficiency // Automation and IT in the power industry. 2019. No. 12 (125).

11. Vorobyov S.V., Gulyaev I.V. Means and Methods of Relay Protection and Automation for Along-Route Power Lines // In the collection: Fedorov Readings - 2021. LI MNPK with Elements of a Scientific School. 2021. Pp. 151-159.

12. Vasenin A.B., Stepanov S.E., Kryukov O.V. Intelligent Monitoring System for the Sakhalin-Khabarovsk-Vladivostok Main Gas Pipeline // Automation and IT in the Oil and Gas Industry. 2019. No. 2 (36). Pp. 40-53.

13. Gulyaev I.V., Volkov A.S. Computer Modeling of a Powerful Chrp of Fuel and Energy Complex Facilities // Automation and IT in Power Engineering. 2022. No. 1 (150). Pp. 32-41.

14. Kryukov O.V., Gulyaev I.V., Teplukhov D.Yu. Bayesian Models of Decision-Making in the Maintenance of Power Plants // Izvestiya VUZov. Electromechanics. 2022. No. 3. Pp. 49-55.

15. Kryukov O.V., Gulyaev I.V., Teplukhov D.Yu. Ensuring Energy-Efficient Modes of Operation of EGPA // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Electromechanics. 2022. Vol. 65. No. 1. Pp. 42-48.

16. Kryukov O., Gulyaev I., Teplukhov D. Optimize of parallel operation several electric driven gas pumping units on a single gas pipeline // In the collection: Proceedings - 2021 3rd Intern. Conf. on Control Systems, Math. Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021. 3. 2021. Pp. 1070-1074.

17. Gulyaev I.V., Tutayev G.M. Modeling of Electromechanical Processes of a Generalized Electromechanical System Based on Asynchronous DC // Saransk. 2004.

18. Vasenin A.B., Stepanov S.E., Kryukov O.V. Automated Electric Drive for Underwater Compressor Stations // In the collection: State and Prospects of the Development of Electrotechnology (XXII Benardos Readings). Materials of the International Scientific and Technical Conference. Ivanovo: ISEU, 2023. Pp. 75-78.

19. Kryukov O.V., Tuganov R.B. Application of Artificial Intelligence Methods for the Control of Electromechanical Systems // Automation and IT in the Power Industry. 2020. No. 3 (128). Pp. 10-16.

20. Gulyaev I., Teplukhov D. Improving the reliability of STD-12500-2-type electric motor of turbocompressors by predicting its state by means of spectrum analysis // В сборнике: 2021 18th International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives, ACED 2021 - Proceedings. 18. 2021. С. 9462281.

*Алексей Борисович Васенин, руководитель группы отдела комплексного проектирования АСУ ЛЧ МГ ООО "Газпром проектирование". SPIN-код: 9032-8423, AuthorID: 875743. 603950, г. Нижний Новгород, ул. Алексеевская, 26. e-mail:* alexsbob@mail.ru

*Сергей Евгеньевич Степанов, канд. техн. наук, ведущий инженер отдела технологического проектирования ООО "Газпром проектирование". 603950, г. Нижний Новгород, ул. Алексеевская, 26. SPIN-код: 7839-4657, AuthorID: 819985. e-mail:* stepanov55@yandex.ru

*Егор Сергеевич Подшивалов, аспирант кафедры «Электрификации и автоматизации» Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, г. Княгинино, Нижегородской области, коммерческий инженер ООО «ТСН-электро». 603108, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Электровозная, 7 А. SPIN-код: 9115-8086, AuthorID (РИНЦ): 1173793, e-mail: e.podshivalov-tcn-nn@yandex.ru*

*Олег Викторович Крюков, доктор технических наук, доцент, заместитель директора по науке ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород. Россия, 603108, г. Нижний Новгород, ул. Электровозная, 7А. SPIN-код: 9406-6475. AuthorID (РИНЦ): 498607. ORCID: 0000-0002-5682-1946. e-mail: o.v.kryukov@mail.ru*

*Игорь Васильевич Гуляев, доктор технических наук, профессор (Россия), руководитель НОЦ «Энергоэффективные двигатели двойного питания» Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева.*

*Россия, 430005, г. Саранск, ул. Б. Хмельницкого, 39. SPIN-код: 7203-6720. AuthorID (РИНЦ): 40902. e-mail: ivgulyaev@mail.ru*

## PROSPECTS FOR THE INTRODUCTION OF ACTIVE FILTERS AND STATIC COMPENSATORS TO REDUCE ELECTRICITY COSTS

A.B. Vasenin, S.E. Stepanov, E.S. Podshivalov, O.V. Kryukov, I.V. Gulyaev

The problems of reducing energy costs, which can be solved by new solutions to improve the accounting of electricity consumption under the existing spectral composition of network parameters, as well as with the use of devices that suppress higher harmonics and compensate for reactive power. Proposed a method for determining the spectrum of higher harmonics on the interval of the period of the fundamental frequency based on fast Fourier, Walsh and Haar transformations. Developed a new algorithm for accounting of electricity in a network containing higher harmonics, the basis of which is the use of a newly introduced integral indicator of the current, which is estimated by reactive power. The step-by-step procedure for implementing the electricity metering algorithm is provided, which includes the calculation of active power for all harmonics and reactive power for the integral current value, the selection of a reactive power meter, and the introduction of a mathematical framework with fast Fourier transform into the control system to improve the speed of filter operation and enhance the quality of electricity. The algorithm's functionality was tested using the MATLAB/Simulink computer simulation environment, where the algorithm was fed with instantaneous voltage values that corresponded to the calculated voltage amplitude of a spatial vector. As a result, it is possible to perform an analysis of the spectral composition of the network for this software package, which allows to increase the speed of the filter-compensating device, which affects the quality of electricity and its consumption.

Keywords: power supply system; distribution device; total voltage distortion factor; power quality indicator; higher harmonics.

*Alexey Borisovich Vasenin, head of the group of the integrated design department of the ACS LCh MG LLC Gazprom Proektirovanie. SPIN code: 9032-8423, AuthorID: 875743. 603950, Nizhny Novgorod, st. Alekseevskaya, 26. e-mail: alexsbob@mail.ru*

*Sergey Evgenievich Stepanov, Ph.D. tech. Sciences, leading engineer of the technological design department of Gazprom Proektirovanie LLC. 603950, Nizhny Novgorod, st. Alekseevskaya St., 26. SPIN: 7839-4657, AuthorID: 819985. Email: stepanov55@yandex.ru*

*Egor Sergeevich Podshivalov, postgraduate student in the Electrification and Automation Department of the Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino, Nizhny Novgorod Region; commercial engineer at TSN-Electro LLC. 7A Elektrovoznaya St., Nizhny Novgorod, 603108, Russia. SPIN: 9115-8086, AuthorID (RINTS): 1173793, Email: e.podshivalov-tcn-nn@yandex.ru*

*Oleg Viktorovich Kryukov, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Science at TSN-Electro LLC, Nizhny Novgorod. Russia, 603108, Nizhny Novgorod, Elektrovoznaya St., 7A. SPIN: 9406-6475. AuthorID (RINTS): 498607. ORCID: 0000-0002-5682-1946. E-mail: o.v.kryukov@mail.ru*

*Igor Vasilyevich Gulyaev, Doctor of Engineering Sciences, Professor (Russia), Head of the Research Center "Energy-Efficient Double-Fed Motors" at the N.P. Ogarev Mordovian State University. Russia, 430005, Saransk, B. Khmelnitsky St., 39. SPIN: 7203-6720. AuthorID (RINTS): 40902. E-mail: ivgulyaev@mail.ru*

**УДК 620.9**

# АСПЕКТЫ ЭНЕРГОВЕДЕНИЯ И ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В ТУРКМЕНИСТАНЕ

Пенджиев А.М.

Туркменский государственный архитектурно-строительный институт

***Аннотация.*** *В статье рассматриваются экологические проблемы дальнейшего развития энергосистем на базе традиционных и возобновляемых источников энергии. Для понимания существующей ситуации с энергетикой и экологией в стране описан их энергетический профиль и состояние энергетического сектора, используемое топливо, уровень энергоэффективности и износа энергооборудования, уровень потребляемой ими первичной энергии и показана картина распределения выбросов $CO_2$ в стране.Представлена стратегические, социально-экономические программы развития энергетики в Туркменистана, направленные на установление связей между действиями, создающими движущие силы и нагрузки, влияющие на состояние окружающей среды. Приведены соответствующими ответными мерами, направленными на решение экологических проблем в энергетическом секторе Туркменистана. Такая форма энерговедения позволит устойчивое развития энергетики и принятие ответных мер снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду.*

***Ключевые слова:*** *энерговедение, энергетика, экономика, экология, устойчивое развития, охрана окружающей среде, Туркменистан*

**Введение.** Вызовы современного мира, связанные с ухудшением состояния окружающей среды, истощением природных ресурсов, включая климатические изменения, деградацию земель, засуху, опустынивание, дефицит водных ресурсов, загрязнения атмосферного воздуха и утрату биоразнообразия диктуют необходимость перехода стран мирового сообщества с техногенного типа экономического развития на новый путь, ориентированный на решение проблем окружающей среды.

За годы независимости Туркменистан достиг заметных успехов в области социально-экономического развития. В стране сформирована национальная модель рыночной экономики, обеспечен ее динамичный рост. Интенсивное развитие промышленного производства, сельского хозяйства, реализация региональных, транснациональных и других инвестиционных проектов требуют своевременного решения возникающих экологических проблем. В этих условиях в основу дальнейшего развития Туркменистана заложен подход тесного сочетания экономических, социальных и экологических аспектов, что явится основой для перехода страны на «зеленый» путь развития [1,2].

Учитывая создавшуюся ситуацию, Туркменистан предпринимает важные шаги для улучшения экологической ситуации, решения проблемы изменения климата. Страна присоединилась и активно участвует во многих международных экологических конвенциях и договорах, выступает с важными экологическими инициативами на региональном уровне и в глобальном масштабах. К числу важных инициатив Президента Туркменистана Сердара Бердымухамедова следует отнести создание в сотрудничестве с ООН Регионального центра

по технологиям, связанным с изменением климата в Центральной Азии, разработку Специальной Программы ООН для бассейна Аральского моря, необходимость выработки эффективных форматов международного взаимодействия по водной проблематике и др. Глава государства также обратился к ООН, международным финансовым институтам и фондам с призывом перейти к системному и целенаправленному взаимодействию с прикаспийскими странами в борьбе с обмелением Каспийского моря, разрушением его экосистемы, сокращением биоразнообразия и предложил Каспийскую экологическую инициативу для решения эколого-климатических проблем моря [1-4].

В контексте решения указанных экологических проблем Правительство Туркменистана приняло обновленную Национальную Стратегию Туркменистана об изменении климата, Национальную Лесную программу, Национальную Аральскую программу и другие долгосрочные программы развития. В 2022 году принят Определённый на национальном уровне вклад (ОНУВ) по выполнению обязательств по Парижскому соглашению. В его рамках Туркменистан намерен активизировать усилия по реализации обозначенных в этом документе целей, включая сокращение выбросов парниковых газов, продвижению инициативы по «Глобальному метановому обязательству» [1,2,6,7].

**Основные факторы развития – энергетики Туркменистана**

Энергетическая отрасль является основной движущей силой национальной экономики Туркменистана, обеспечивающая продвижение всех других отраслей экономики и социальной сферы. Энергетические отрасли, включая нефтегазовый комплекс и электроэнергетику, обладают значительным потенциалом развития и являются наиболее быстро растущим сектором экономики Туркменистана.

Развитие Туркменистана в годы независимости было отмечено высоким ростом промышленного производства и объемов инвестиций в экономику страны. Интенсивный экономический рост страны связан с увеличением использования энергетических ресурсов, прежде всего нефти и газа, что в свою очередь способствовало росту выбросов в атмосферу, загрязнению земельных и водных ресурсов и негативному воздействию на биоразнообразие.

В настоящее время нефть и нефтепродукты признаны главными загрязнителями окружающей среды. Большую часть выбросов 36% составляет фугитивные эмиссии в нефтегазовой деятельности, далее население 23%, электроэнергетика 22%, транспорт 13% и коммунальный сектор 6%. Остальные источники все вместе дают менее 1% [3,8].

В связи с ростом промышленного сектора на окружающую среду воздействуют опасные загрязнители атмосферного воздуха такие как: диоксид серы $SO_2$; оксид азота NOx; оксид углерода CO; метан $CH_4$; двуокись углерода $CO_2$ и другие твердые вещества. Заметное воздействие на окружающую среду оказывают отходы, образуемые в энергетическом секторе, большая доля, которой приходится на нефтяную и газовую промышленность. Так, свыше 90% промышленных опасных отходов формируется за счёт нефтеотходов и нефтешламов [3,4,8,9]..

Основные источники выбросов в Туркменистане – это предприятия нефтегазовой, энергетической, сельскохозяйственной, транспортной отраслей и жилищно-коммунальное хозяйство. Самые крупные объемы выбросов загрязняющего вещества (ЗВ) образуются при сжигании топлива, добыче, транспортировке и хранении нефти и газа. В Туркменистане к числу таких предприятий относятся Туркменбашинский комплекс нефтеперерабатывающих заводов (ТКНПЗ), Туркменбашинская ТЭЦ, Производственное объединение (ПО) «Гарабогазсульфат», Туркменбашинский комбинат нерудных и строительных материалов,

Кенарское предприятие по хранению и отгрузке нефтепродуктов, химический завод «Хазар», Туркменбашинский Международный морской порт, Управление по добыче нефти и газа «Галкыныш» в г. Хазар, Сейдинский НПЗ, входящий в состав Туркменбашинского комплекса нефтеперерабатывающих заводов и др. [8,9].

Сельскохозяйственная деятельность и рост продукции сельского хозяйства негативно влияет на окружающую среду связана с выбросами в атмосферу метана, окиси азота, окиси углерода, окиси азота, а также загрязнением пестицидами, гербицидами и другими агрохимикатами водных объектов, включая подземные воды и почвы. В настоящее время доля выбросов ПГ в сельскохозяйственном секторе составляет 8,58% от общих выбросов [12].

***Нефтегазовый комплекс.*** Энергетическая политика Туркменистана нацелена на всестороннее развитие нефтегазовой промышленности, являющейся одной из ведущих отраслей национальной экономики. На ее основе развиваются такие отрасли как электроэнергетика, производство минеральных удобрений, отрасли инженерной и транспортной инфраструктуры, а также нефтегазовая отрасль вносит неоценимый вклад в развитии социального блока отраслей.

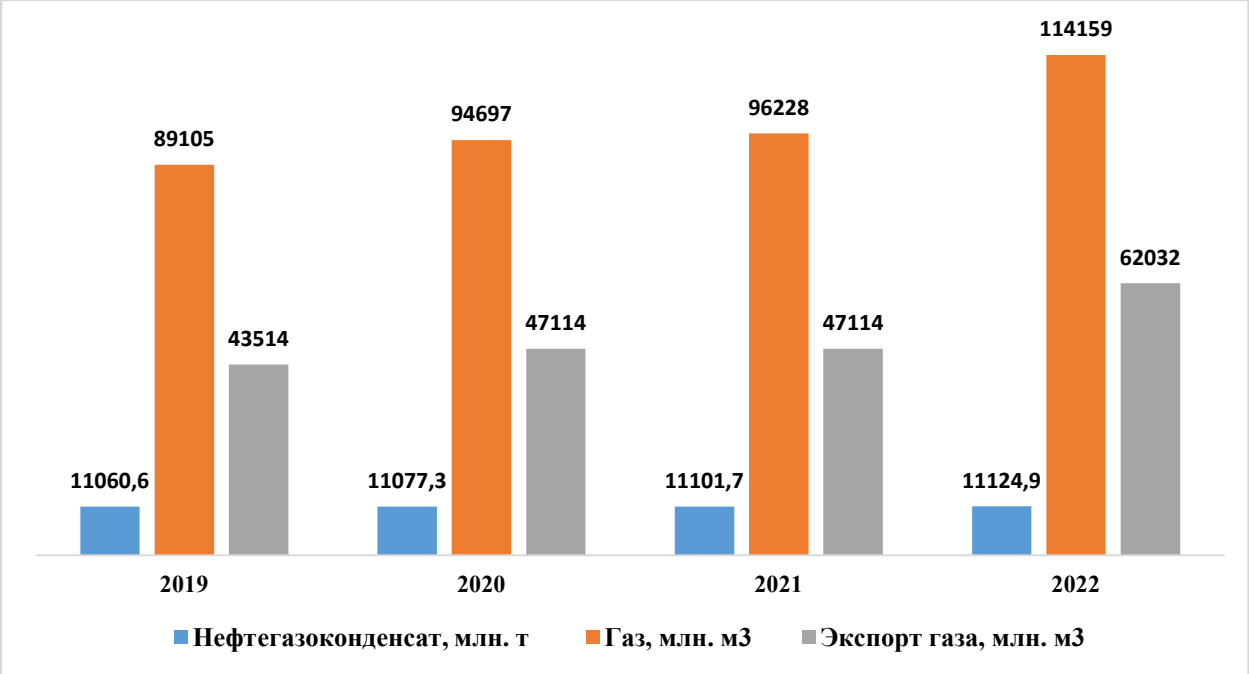



Диаграмма 1 производства нефтегазоконденсата и экспорт газа за 2019-2022 гг. [8].

Ресурсы нефти и газа являются одним из основных природных богатств страны. По запасам природного газа Туркменистан занимает 4-е место в мире. В стране сформирована крупная нефтегазовая промышленность, функционируют производства по переработке природного газа и нефтепродуктов. Ресурсы природного газа основательно сформировали электрогенерирующую мощь, создали единую газотранспортную и электроэнергетическая систему Туркменистана и тем самым полностью обеспечивают экономику собственным природным газом и электроэнергией. Нефтяные запасы страны также полностью удовлетворяют свои внутренние потребности в нефтепродуктах. Помимо этого, большая часть углеводородов экспортируется за рубеж [1,2,8,9].

Таблица 1 - Основные показатели развития нефтяной промышленности Туркменистана за годы 2019-2022 гг.

| **Наименование продукта** | **2019** | **2020** | **2021** | **2022** |
|---|---|---|---|---|
| Нефтегазоконденсат, млн. т | 11060,6 | 11077,3 | 11101,7 | 11124,9 |
| Газ, млн. $м^3$ | 89105,0 | 94697,0 | 96228,0 | 114159,0 |
| В том числе экспорт, млн. $м^3$ | 43514,0 | 047114,0 | 47114,0 | 62032,0 |
| Первичная переработка нефти, млн. т | 6478,8 | 6484,9 | 6496,2 | 6501,5 |
| Итого по сектору в стране, млн. манат | 24793,0 | 26053,3 | 26235,9 | 31262,3 |

Источник: Статистический ежегодник Туркменистана, 2022 г. (2023) [7].

***Электроэнергетика*** является ведущей отраслью экономики Туркменистана. Электростанции страны, входящие в государственную энергораспределительную систему, работают на природном газе. Его использование по сравнению с другими видами углеводородного топлива характеризуется наименьшим отрицательным воздействием на окружающую среду. За последние годы развитие электроэнергетики страны вышло на новый уровень: в стране действует 12 электростанций мощностью 6943,2 МВт, на которых установлено 51 турбинная установка, из них газовых турбин – 39, паровых турбин – 12 [2].

Ниже в таблице 2 приведены данные роста электропотребления в стране за период с 2017 по 2022 гг.

Таблица 2 - Показатели электропотребления в Туркменистане за 2017-2022 гг.

| **Годы** | **2017** | **2018** | **2019** | **2020** | **2021** | **2022** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Млн. кВт·ч** | 20520,432 | 20242,989 | 19485,371 | 20049,315 | 20991,469 | 21821,741 |

Источник: Министерство энергетики Туркменистана, 2020, 2022 гг. [7].

Из таблицы 2 видно, что объем поставок электроэнергии потребителям в 2022 году вырос на 1301,309 млн. кВт·ч или на 6,34% по сравнению с 2017 годом [1,2]..

В таблице 3 приведено производство электроэнергии и экспорт электроэнергии за 2017-2022 гг.

Таблица 3 - Производство электроэнергии и экспорт Туркменистаном за 2017 - 2022 гг., млн кВт·ч.

| **Годы** | **2017** | **2018** | **2019** | **2020** | **2021** | **2022** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Произведено, млн. кВт·ч | 24903,9 | 23817,7 | 22521,0 | 27018,8 | 30238,2 | 32577,2 |
| Экспортировано, млн. кВт·ч | 3457,8 | 2719,8 | 1803,5 | 5529,7 | 7543,6 | 9398,7 |

Источники: Статический ежегодник Туркменистана, 2019 г. (2020 г.); 2022 г. (2023 г.) [7].

Производство электроэнергии распределяется следующим образом: на тепловые электростанции (ТЭС) приходится 29,83%, на газотурбинные ГЭС - около 70,17 %.

Ниже в таблице 4 приведены показатели потребления электроэнергии и её распределение по видам деятельности в стране за 2017 – 2022 гг.

Таблица 4 - Чистое потребление электроэнергии и распределения по видам деятельности в Туркменистане за 2017 – 2022 гг. млрд кВт·ч.

| **Годы** | **2017** | **2018** | **2019** | **2020** | **2021** | **2022** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Всего (валовое потребление) | 20,018 | 19,662 | 18,670 | 20,602 | 25,323 | 27,721 |
| По видам деятельности: | | | | | | |
| Промышленность | 4,831 | 4,368 | 4,568 | 4,375 | 3,812 | 4,395 |
| Строительство | 0,248 | 0,260 | 0,234 | 0,289 | 0,254 | 0,239 |
| Сельское хозяйство | 3,942 | 4,131 | 3,794 | 4,054 | 4,389 | 4,168 |
| Транспорт | 0,491 | 0,832 | 0,914 | 0,734 | 0,797 | 0,800 |
| Государственные учреждения и частные предприятия | 5,263 | 3,983 | 3,034 | 6,757 | 9,395 | 11,460 |

Источники: Статический ежегодник Туркменистана, 2019 г. (2020 г.); 2022 г. (2023 г.); Министерство энергетики Туркменистана, 2024 г. [6-8].

Производство электроэнергии является вторым по величине источником загрязнения углекислым газом, способствуя изменению климата, что угрожает здоровью населения и влияет на экосистемы на многих уровнях: от биологических сообществ, составляющих экосистемы, до услуг, которые они предоставляют сообществам, экономике и людям.

Увеличение роста выработки и потребления энергии отрицательно влияет на атмосферу (потребление кислорода, выбросы газов, влаги и твердых частиц), гидросферу (потребление воды, создание искусственных водохранилищ, сбросы загрязненных и нагретых вод, жидких отходов), биосферу (выбросы токсичных веществ) и литосферу (потребление ископаемых топлив, изменение ландшафта). Тепло увеличивает выбросы первичных загрязнителей. Повышенная температура приводит к увеличению потребления энергии кондиционированием воздуха в зданиях и автомобилях. Дополнительное потребление энергии приводит к большему загрязнению воздуха.

***Возобновляемая энергетика.*** Природно-климатические условия Туркменистана исключительно благоприятны для широкого использования возобновляемых источников энергии, таких как солнечная, ветровая и геотермальная энергия, при производстве электроэнергии и тепла. В настоящее время в Туркменистане производство электроэнергии за счет ВИЭ только начинает развиваться. За 2017-2022 годы в стране производится 1,7 МВт ежегодно. Основным производителем является единственная гидроэлектростанция Туркменистана - Гиндикушская ГЭС, мощностью 1,2 МВт, а оставшиеся 0,5 МВт приходятся на небольшие солнечные фотоэлектрические станции (СФЭС), расположенные на территории республики. В 2025 году планируется ввести в строй две ветроэлектростанции (ВЭС) мощностью 1,5 МВт каждая и СФЭС мощностью 7,5 МВт в районе Туркменского озера «Алтын Асыр» [2-5]..

**Ответные меры – программы развития и законодательство**

В целях обеспечения устойчивого развития в Туркменистане предпринимаются меры,

направленные защиту окружающей среды, сохранение и воспроизводство природных ресурсов.

***Программа развития энергетической дипломатии Туркменистана на 2021-2025 гг.*** ставит следующие цели:

Определить приоритеты энергетической дипломатии Туркменистана, дальнейшее совершенствование её политико- правовой базы;

Обеспечить гармоничную интеграцию в мировую энергетическую систему, а также повысить престиж Туркменистана;

Содействовать диверсификации, привлечению и эффективному развитию взаимовыгодных иностранных инвестиций, и внедрению новых технологий в промышленность.

***Национальная Стратегия Туркменистана об изменении климата (2019 г.)*** с целью увеличения роли ВИЭ в энергобалансе страны и развития альтернативной энергетики, предусматривает:

Распространение знаний об энергосбережении, повышении энергоэффективности и использовании ВИЭ как методах решения проблемы антропогенного влияния на климат;

Дальнейшая поддержка научно-исследовательских разработок и испытаний технологий возобновляемой и альтернативной энергетики, а также их адаптация к климатическим условиям Туркменистана.

В краткосрочной перспективе, внедрение малых и средних установок возобновляемой и альтернативной энергетики в отдаленных и малонаселенных районах.

В средне-и дальнесрочной перспективе, внедрение собственных производственных мощностей и увеличение доли возобновляемой энергетики в энергетическом балансе страны.

Создание экономических стимулов для применения альтернативных источников энергии. [5].

***Программа развития нефтегазовой промышленности Туркменистана до 2030 г.*** предусматривает меры по комплексной модернизации нефтегазовой промышленности, в том числе за счет привлечения иностранных инвестиций, наращиванию потенциала нефтяной и газовой отраслей, увеличению объёмов производства продукции, получаемой от переработки нефти и газа, а также реализацию проектов по разведке новых нефтегазовых месторождений, их освоению, добыче углеводородного сырья и его переработке.

В рамках Программы предусматривается поэтапное наращивание мощностей газопровода Туркменистан–Узбекистан–Казахстан–Китай; строительство стратегически важного проекта – газопровода Туркменистан–Афганистан–Пакистан–Индия; ввод в действие новых месторождений на территории «Bagtyýarlyk»; возведение крупных промышленных объектов по переработке углеводородного сырья, в том числе относящихся к нефтехимии, газохимической, химической отраслям и электроэнергетике, заводов по производству товарного газа и газокомпрессорных установок, новых газохимических комплексов в каждом велаяте, в том числе по выпуску полиэтилена и полипропилена, каучука и полистирола, поливинилхлорида, поливинилацетата, метанола; производство текстильных синтетических волокон. При этом акцент будет сделан на экологической составляющей [5-8].

***Государственная программа по энергосбережению на 2018-2024 гг.*** направлена на энергосбережение и повышение энергоэффективности во всех отраслях экономики, повышению эффективности и конкурентоспособности национальной экономики, а также охрану окружающей среды. В нефтегазовом комплексе приоритетным

направлением является внедрение в производство новых передовых технологий и последних достижений мировой науки по всему циклу производства: от геологоразведочных работ, освоения и разработки нефтегазовых месторождений до транспортировки, хранения и переработки нефти и газа. В других отраслях предусматривается модернизация и техническое перевооружение предприятий, внедрение современных ресурсосберегающих технологий, новейших научно-технических разработок, совершенствованию систем учёта и потребления энергоресурсов [5-8].

***Национальная стратегия по развитию возобновляемой энергетики в Туркменистане до 2030 г.,*** предусматривает меры по использованию ВИЭ в электроэнергетике по трем направлениям развития - экспорт; местное потребление в рамках согласованной энергосистемы; электроснабжение потребителей в отдаленных районах. Анализ используемых в мировой практике систем электро- и теплоснабжения на основе ВИЭ показывает, что к наиболее перспективным технологиям для применения в Туркменистане относятся [1,2,9,10]:

Энерго- и водоснабжение небольших рассредоточенных населенных пунктов и фермерских хозяйств.

Сеть «солнечных» водопойных пунктов на природных пастбищах.

Ветровые и солнечные установки для энергоснабжения удаленных поселков.

Энергосберегающие «солнечные» дома для фермерских хозяйств.

Солнечные системы отопления и горячего водоснабжения.

***В рамках Концепции развития региона Туркменского озера «Алтын-Асыр» на 2019-2025 гг.*** закончено строительство гибридной солнечной и ветровой электростанции. Наиболее крупной мощностью обладает электростанция, построенная для ультрасовременного экологического села, расположенного в 264 км от г. Ашхабада на берегу озера «Алтын Асыр». Мощность первой в Туркменистане солнечно-ветровой электростанции составляет 10 МВт [1,3,4,10].

В Национальной туристической зоне «Аваза», была открыта солнечная электростанция мощностью 370 кВт. Были созданы и эксплуатируются установки мощностью от 5 -10 кВт, до 350 – 400 кВт. В настоящее время общая мощность электроэнергии, вырабатываемая с помощью фотоэлектрических установок, не превышает 17 МВт [1,2].

***Национальная программа Президента Туркменистана по преобразованию социально-бытовых условий населения сёл, посёлков, городов этрапов и этрапских центров на период до 2028 г.*** планирует за счёт инвестиций провести линии электропередачи в Ахалском велаяте (область) – 1412 км, в Балканском велаяте – 347 км, в Дашогузском велаяте – 301 км, Лебапском велаяте – 474 км, в Марыйском велаяте – 750,7 км [2,3].

Динамичные темпы развития электроэнергетики позволили достичь полной энергетической независимости страны, а также наращивать экспорт электроэнергии на мировые рынки. До 2030 г. выработка электроэнергии планируется увеличить в 1,4 раза и её экспорт в 1,9 раза [2].

Средний уровень технологических потерь электроэнергии в магистральных и распределительных сетях в 2017 году составлял - 12,78%, в результате ответных мер в 2022 г. такие потери снизились до 8,58%, то есть на 4,2%.

Ниже приведены показатели снижения технологических потерь электроэнергии по годам (таблица 5).

Таблица 5 - Результаты снижения технологических потерь за период 2017-2022 гг.

| Годы | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| % | 12,78 | 10,68 | 8,85 | 8,60 | 8,44 | 8,58 |

Источник: Министерство энергетики Туркменистана, 2024 г. [6].

Азиатский банк развития (АБР) намерен предоставить техническую помощь в рамках проекта «Интегрированные решения в области возобновляемой энергетики для поддержки "зеленой" трансформации в Туркменистане». Проект запланирован к реализации в 2026 году, является важным шагом на пути к экологической устойчивости и энергетической независимости Туркменистана. Основной задачей проекта является разработка дорожной карты по использованию солнечной энергии, включая создание инновационных решений для городов, таких как Аркадаг. Ожидается, что в ходе проекта будет запущена пилотная городская солнечная электростанция, которая обеспечит ежегодную выработку более 4 гигаватт в час возобновляемой энергии, что приведёт к сокращению выбросов ПГ на более чем 3 тыс. тонн в год [10].

В соответствии с «Соглашением о совместной разработке» между Государственной электроэнергетической корпорацией «Туркменэнерго» и Abu Dhabi Future Energy Company PJSC «Masdar» планируется построить СФЭС мощностью 300 МВт в районе г. Керки [6].

Правовую основу энергетического сектора страны составляют законы «Об углеводородных ресурсах» (2008 г.), «О возобновляемых источниках энергии (2021 г.), «Об энергосбережении и энергоэффективности» (2024 г.) и др.

Туркменистан укрепляет сотрудничество в энергетической сфере на глобальном и региональном уровнях. В этом контексте, развивается взаимодействие с Международной Энергетической Хартией, Международным энергетическим агентством, Международным агентством по атомной энергии и Международным агентством по возобновляемым источникам энергии. Страна является членом Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA), присоединилась к Глобальному обязательству по метану, а также сотрудничает с ПРООН, ОБСЕ, АБР и другими международными организациями.

**Национальная политика и правовая база: ключевые политические документы и законодательство в области охраны окружающей среды**

В Туркменистане на постоянной основе совершенствуется природоохранное законодательство, процесс, обновление которого осуществляется с учетом новых политических, социально-экономических реалий, а также в соответствии с нормами международного экологического права. Оно направлено на защиту окружающей среды от загрязнения и истощения, сохранение биологического разнообразия и биосферы, рациональное использование земельных, водных ресурсов и других природных богатств.

***Конституция Туркменистана 1992 г. (новая редакция 2023 г.)*** заложила важную правовую основу для решения современных экологических проблем. Норма Основного Закона о праве каждого человека на благоприятную окружающую среду усилила акцент на социальные цели, связанные с обеспечением здоровья человека, его благополучия и экологической безопасности. В развитии Основного Закона число законодательных актов во многом возросло и более чем наполовину обновлено, появились совершенно новые законы, ранее не имевших аналога в национальном нормотворчестве. Существенно вырос удельный

вес законов в общей массе нормативных правовых актов, охватывающий правовым регулированием многие природные объекты и компоненты окружающей среды. По состоянию на 1 января 2025 года в Туркменистане принято и действует более 30 законов в области охраны окружающей среды и природопользования.

Существующая система нормативных правовых актов дополняется международными обязательствами, которые приняла страна в связи с присоединением к целому ряду международных экологических конвенций и договоров.

***Ключевые политические программы развития.*** Государственная политика Туркменистана в области охраны окружающей среды направлена на обеспечение приоритета охраны жизни и здоровья человека, сохранения и восстановления окружающей среды, сочетания экологических, экономических и социальных интересов общества в целях обеспечения устойчивого развития и благоприятной окружающей среды. Для осуществления государственной политики в области охраны окружающей среды и устойчивого развития предусмотрены следующие программы развития.

***Национальная программа по социально-экономическому развитию Туркменистана на период 2011-2030 гг.*** определяет приоритеты в области охраны окружающей среды, отражающие экологические проблемы на национальном уровне и их решение: охрану редких и исчезающих видов флоры и фауны (сохранения биоразнообразия); сохранение уникальных памятников природы; лесонасаждение и лесовосстановление; приостановление процессов опустынивания и др. [1,2,5].

***Возрождение новой эпохи могущественного государства: Национальная программа социально-экономического развития Туркменистана на 2022-2052 годы*** предусматривает меры по обеспечению экологической безопасности, улучшению экологии и системы охраны окружающей среды. Одной из основных задач программы является обеспечение экологического благополучия и развитие «зеленой» экономики [8].

***Национальная Стратегия Туркменистана об изменении климата (2019г.)*** предусматривает заблаговременные действия в отношении неизбежных последствий изменения климата, которые помогут стране минимизировать последствия негативных воздействий и обеспечить долгосрочное развитие окружающей среды, экономики и здоровье населения. Это выражается в подходе устойчивого использования природных ресурсов, охране и восстановлению окружающей среды и экологических систем, ограничению выбросов парниковых газов и улучшению возможностей страны реагировать на климатические изменения.

***Национальная Лесная программа Туркменистана на 2021-2025 гг.*** предусматривает меры по охране лесов, расширение их площади в целях смягчения последствий и адаптации к изменению климата.

***Национальная Аральская программа на 2021-2025 гг.*** включает меры адаптационного характера, направленные на смягчение последствий Аральского кризиса.

**ВЫВОДЫ:**

В Туркменистане уделяется большое внимание достижению ЦУР. Социальная составляющая устойчивого развития ориентирована на здоровье граждан и укрепление продовольственной и экологической безопасности.

Экономика Туркменистана демонстрировала стабильный рост. За период с 2017-2022 годы темпы роста ВВП в среднем составили 6,22% в год.

Энергетический сектор является основной движущей силой национальной экономики

страны, которая обеспечивает продвижение всех других отраслей экономики и социальной сферы. Производство нефтегазоконденсата в 2022 году по сравнению с 2019 годом выросло на 0,58%, а газа за тот же период на 28,1%.

Производство электроэнергии в стране с каждым годом растет. Так, 2022 году произведено электроэнергии 32577,2 млн. кВт·ч, что на 31% больше по сравнению с 2017 годом. Объемы поставок электроэнергии потребителям в 2022 году выросли на 1301,309 млн. кВт·ч или на 6,34% по сравнению с 2017 годом. Экспорт электроэнергии в 2022 году возрос на 170% по сравнению с 2017 годом.

В Туркменистане производство электроэнергии за счет ВИЭ только начинает развиваться. За соответствующий период произведено за счет ВИЭ 1,7 МВт. Единственной гидроэлектростанцией Туркменистана является Гиндикушская ГЭС, общей мощностью 1,2 МВт. В стране готовится к сдаче в эксплуатацию две ветроэлектростанции (ВЭС) мощностью 1,5 МВт каждая и солнечная фотоэлектрическая станций (СФЭС) мощностью 7,5 МВт [2-4].

Государственная поддержка в области ВИЭ в Туркменистане создала необходимые условия для производства электроэнергии с эффективным использованием ВИЭ, совершенствование структуры энергетической системы, и диверсификация источников энергии. Укрепление правовой основы в области экологии позволяют развивать и проводить меры по повышению энергоэффективности в стране и осведомлённости общественности о пользе ВИЭ.

В целях стабильного социально-экономического развития и обеспечения мер по охране окружающей среды, снижения нагрузки на её состояние развивается национальное экологическое и иное законодательство, приняты национальные программы/стратегии развития, об изменении климата, борьбы с опустыниванием и др.

Таким образом, исходя из содержания анализа о состоянии окружающей среды в Туркменистане за период с 2017 по 2022 годы можно резюмировать его следующим образом:

Туркменистан относится к числу стран, наиболее уязвимых к изменению климата в Центрально-Азиатском регионе. В последние 60 лет наблюдается интенсивное потепление по всей территории Туркменистана. В результате на значительной территории страны часто отмечаются такие неблагоприятные погодные явления, как жара, засуха, сильные ветры, дожди, паводки и селевые потоки и т. д. Частота и сила этих явлений в последнее время увеличиваются. По оценке уязвимости и воздействия изменения климата Туркменистан входит в число государств, в которых экономическое положение и здоровье населения во многом определяются климатическими факторами. Ожидается, что в Туркменистане климат станет более жарким и сухим. Более частые и интенсивные периоды аномальной жары, засухи и изменения в характере выпадения осадков приведут к увеличению числа связанных с этими изменениями экстремальных погодных явлений, таких как ливневые дожди, наводнения и сели. С 60-х годов прошлого века среднегодовая температура в стране повысилась на 2°С, превысив среднемировые показатели.

Туркменистан уделяет большое внимание достижению ЦУР. Социальная составляющая устойчивого развития ориентирована на здоровье граждан и укрепление продовольственной и экологической безопасности. Такая политика благотворно сказывается на росте численности населения. В период с 2017-2022 годы Туркменистан демонстрировал стабильное социально-экономическое развитие, население росло, наблюдалось улучшение качества жизни граждан.

За период с 2017-2022 годы экономика страны демонстрировала стабильный рост.

Энергетическая отрасль является основной движущей силой национальной экономики Туркменистана, обеспечивающей продвижение всех других отраслей экономики и социальной сферы. Энергетические отрасли, включая нефтегазовый комплекс и электроэнергетику обладают значительным потенциалом развития и являются наиболее быстро растущим сектором экономики страны.

В Туркменистане загрязнение атмосферного воздуха определяется поступлением загрязняющих веществ (ЗВ) от природных и антропогенных источников, а также физико-географическим и климатическими условиями. В последние годы одной из особых проблем Туркменистана является солепылеперенос и как следствие увеличение солевой и загрязненной пыли, распыляющейся из высохшего дна Аральского моря. Большие территории, страдают от участившихся пылевых и сольных бурь, большое количество солевой пыли накапливается ежегодно на сельскохозяйственных культурах в зоне орошения, или оседает в пустынной зоне. Основными антропогенными источниками загрязнения атмосферного воздуха в Туркменистане являются автотранспорт и предприятия нефтяной, химической и газовой промышленности. Кроме того, на загрязнение атмосферного воздуха оказывает существенное влияние естественный фон, в частности естественная концентрированная пыль, характерная для аридной зоны.

В Туркменистане дефицит воды усугубляется изменением климата, что оказывает существенное влияние на обеспеченность водой всех секторов экономики и формирование ресурсов поверхностных, а также подземных вод. Особенно это проявляется в маловодные годы, когда в результате изменения

**ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ:**

Повысить энергоэффективность использования и управления нефтегазовыми ресурсами, направленные на исключения экологических последствий, включая выбросы метана и других ПГ в атмосферу;

Расширить меры по смягчению последствия изменения климата в нефтегазовом секторе, электроэнергетике и др., а также повысить роль экологической экспертизы при внедрении энергетических технологий в отраслях энергетики;

Создание сети ВИЭ для энерго-водоснабжения на отдаленных пустынных пастбищах. Строительство на этих территориях сооружений с минимальными тепловыми потерями и энергоснабжением от ВИЭ позволит создать для сельского населения современные социально-бытовые условия жизни;

Для внедрения возобновляемых энергоустановок целесообразно научно обосновать энергетические ресурсные потенциалы ВИЭ по регионам страны;

Важно оценить технико-экономические, экологические характеристики возобновляемых энергоустановок для подготовки проектно-сметной документации и составления технико-экономического обоснования (ТЭО) с учетом экологического потенциала по всем видам ВИЭ в регионах страны;

Разработать рекомендации по составлению геоинформационных технологических карт по использованию ресурсов ВИЭ с учетом природно-климатических условий страны, применимые при проектировании возобновляемых энергетических технологий для внедрения с оценкой экологических потенциалов.

**Список использованных источников:**

1. Бердымухамедов Г.М. Туркменистан на пути достижения Целей устойчивого

развития. – Ашхабад: Туркменская государственная издательская служба, 2018. 468 с.

2. Бердымухамедов Г.М. Электроэнергетическая мощь Туркменистана. –Ашхабад: Туркменская государственная издательская служба, 2022. 130 с. (Рус. яз.).

3. Пенджиев, А. М. Экоэнергетические ресурсы возобновляемых источников энергии. М.: Изд-во «Русайнс», 2023. 400 с.

4. Стребков, Д. С., А. М. Пенджиев, Б. Д. Мамедсахатов. Развитие солнечной энергетики в Туркменистане. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2012. 498 с.

5. Национальная программа социально-экономического развития Туркменистана на 2022-2052 гг. Утверждена Постановлением Президента Туркменистана от 11 февраля 2022 г. №2601. //Собрание актов Президента Туркменистана и решений Правительства Туркменистана. 2022 г. №2. 2149 стр.

6. *Программа социально-экономического развития Туркменистана на 2019-2025* (2019) - Ашхабад: Туркменская государственная издательская служба. 482 стр.

7. *7.Статистический ежегодник, 2017-2022 гг. (2018-2024 гг.)*

8. Модернизация нефтегазовой промышленности – важнейший вектор роста экономической мощи Туркменистана. https://tdh.gov.tm/ru/post/30873/modernizaciya-neftegazovoj-promyshlennosti-vazhnejshij-vektor-rosta-ekonomicheskoj-moshchi-turkmenistana

9. АБР предоставит техпомощь Туркменистану в освоении солнечной энергии. https://turkmenportal.com/blog/85623/abr-predostavit-tehpomoshch-turkmenistanu-v-osvoenii-solnechnoi-energii

10. В Туркменистане откроют многофункциональную электростанцию на силе солнца и ветра. Министерства энергетики Туркменистана. https://minenergo.gov.tm/news_show/1034

*Пенджиев Ахмет Мырадович, доктор технических наук, доктор сельскохозяйственных наук, доцент Туркменского государственного архитектурно-строительного института, Тел. +7(993)65801754 моб. Эл. почта: ampenjiyev@gmail.com*

## ENERGY SCIENCE AND ENVIRONMENTAL PROTECTION IN TURKMENISTAN

Penjiyev Ahmet Myradovich

This article presents strategic, socio-economic programs for energy development in Turkmenistan, aimed at establishing links between actions that create drivers and pressures affecting the environment. Corresponding response measures aimed at addressing environmental problems in Turkmenistan's energy sector are presented. This approach to energy science will enable sustainable energy development and the adoption of measures to reduce anthropogenic pressures on the environment.

Keywords: energy science, energy, economics, ecology, sustainable development, environmental protection, Turkmenistan

*Pendzhiev Akhmet Myradovich, Doctor of Technical Sciences, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Turkmen State Institute of Architecture and Civil Engineering, Tel. +7 (993) 65801754 mob. E-mail: ampenjiyev@gmail.com*

**УДК 621.311.1:631.371**

# ПРИМЕНЕНИЕ ИОНИСТОРОВ В УСТРОЙСТВАХ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ У СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Г.Д. Черкасов

ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

***Аннотация.*** *Статья посвящена анализу современных научно-технических решений по применению DSTATCOM (Distribution Static Compensator) – устройства компенсации реактивной мощности и улучшения качества электроэнергии в распределительных сетях, которое имеет в своем составе ионисторы (суперконденсаторы). В результате изучения научной литературы выявлен существенный пробел в отечественных исследованиях по оптимальному размещению ионисторных DSTATCOM в сельских распределительных сетях, что определяет направления дальнейших работ: разработку методик выбора параметров и мест установки устройств с учётом реальных графиков нагрузки сельскохозяйственных предприятий. Рассмотрены ключевые эксплуатационные характеристики ионисторов, определяющие перспективность их использования в динамических компенсирующих устройствах: удельная мощность, циклический ресурс, температурная стабильность. Особое внимание уделено обзору отечественных и зарубежных исследований в области структурных схем, алгоритмов управления и методов оптимального размещения DSTATCOM в радиальных распределительных сетях. Проведен сравнительный анализ традиционных средств компенсации реактивной мощности и устройств, включающим в себя усовершенствованные статические синхронные компенсаторы с накопителями энергии на основе ионисторов (E-STATCOM – Energy Storage Static Synchronous Compensator). Проанализированы результаты моделирования и экспериментальных исследований, подтверждающие эффективность суперконденсаторных накопителей в задачах повышения коэффициента мощности, стабилизации напряжения и фильтрации гармоник. На основе проведенного анализа, выявлены перспективные направления дальнейших исследований, прежде всего, в области создания методик оптимального размещения DSTATCOM в сельских распределительных сетях 0,4 кВ, а также выбора параметров и режимов устройства с учетом специфических графиков нагрузки предприятий агропромышленного комплекса.*

***Ключевые слова:*** *ионисторы, суперконденсаторы, качество электроэнергии, реактивная мощность, компенсация, DSTATCOM, E-STATCOM, электроснабжение сельскохозяйственных потребителей, накопители энергии, электрические распределительные сети.*

**Введение**. Современный агропромышленный комплекс насыщен технологическим оборудованием, которое использует частотно-регулируемые приводы (ЧРП), автоматизированные системы микроклимата, мощные холодильные и насосные установки. Данное оборудование способствует формированию динамической нагрузки, которая генерирует резкопеременную реактивную мощность и высшие гармоники, что вызывает снижение коэффициента мощности, рост потерь активной энергии, отклонения и колебания

напряжения, а также несинусоидальность кривой напряжения. Согласно ГОСТ 32144-2013 [1], положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10 % от номинального значения, а суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения для сетей 0,4 кВ нормируется на уровне 8 % (нормально допустимое значение) и 12 % (предельно допустимое).

Исследования гармонических искажений в сельских сетях 0,4 кВ [2] также свидетельствуют о том, что широкое применение энергосберегающих технологий способно создавать уровни гармоник, превышающие существующие нормы ГОСТ 32144-2013 [1].

Соблюдение указанных требований в условиях сельских распределительных сетей возможно только при использовании средств компенсации, способных с высоким быстродействием отслеживать изменения нагрузки.

Высокое быстродействие необходимо, в первую очередь, для оборудования, создающего короткие, но мощные броски реактивной мощности: частотно-регулируемых приводов насосов и вентиляторов, пастеризаторов, сепараторов, холодильных машин с прямым пуском компрессоров, а также автоматизированных доильных установок. Традиционные конденсаторные установки со ступенчатым регулированием не справляются с такими режимами по нескольким причинам. Во-первых, они обладают дискретностью регулирования, не позволяющей точно и непрерывно компенсировать реактивную мощность в динамике. Во-вторых, конденсаторы чувствительны к гармоническим искажениям: в присутствии высших гармоник возможно возникновение резонансных явлений, способных вывести батарею из строя. В-третьих, электролитические конденсаторы подвержены старению диэлектрика и деградации параметров, особенно при повышенных температурах и частых циклах заряда–разряда. Указанные ограничения обуславливают интерес к альтернативным накопителям энергии – ионисторам (суперконденсаторам), которые лишены перечисленных недостатков: способны выдерживать глубокие и частые циклы без заметной деградации, обладают широким температурным диапазоном эксплуатации и не создают резонансных контуров.

Перспективной платформой для построения быстродействующего компенсатора является распределительный статический компенсатор реактивной мощности (DSTATCOM – Distribution Static Compensator). Классический DSTATCOM с конденсаторным звеном постоянного тока обменивается с сетью только реактивной мощностью, компенсируя фазовый сдвиг и при соответствующем алгоритме управления подавляя высшие гармоники.

Установка в звено постоянного тока накопителя энергии на основе ионисторов, а также использование специальных алгоритмов управления (например, Virtual Synchronous Generator – VSG) позволяет превратить устройство в E-STATCOM (Energy storage + STATCOM). В отличие от DSTATCOM, E-STATCOM способен на короткое время выдавать или поглощать активную мощность, что принципиально важно для демпфирования провалов напряжения, компенсации бросков мощности при пуске двигателей и повышения динамической устойчивости электросети. Таким образом, E-STATCOM на базе ионисторов обеспечивает быструю и качественную стабилизацию режима – одновременно повышая коэффициент мощности, фильтруя гармоники и сглаживая переходные процессы по напряжению.

*Учитывая преимущества устройств с использованием ионисторов перед классическими конденсаторными батареями, актуальным является применение E-STATCOM для электроснабжения потребителей АПК. Для более авторитетного обоснования применения такого устройства требуется проведение всестороннего анализа*

*научно-технической литературы, посвященной использованию ионисторов в сельском электроснабжении.*

**Цель** настоящей **работы** – систематизация данных научной литературы, посвященной применению ионисторов в составе DSTATCOM/*E-STATCOM* для повышения качества электроэнергии в системах электроснабжения сельскохозяйственных объектов, выявление достигнутых результатов и определение направлений дальнейших исследований.

**Особенности электропотребления в сельских распределительных сетях**

Сельские распределительные сети 0,4 кВ в Российской Федерации имеют ряд особенностей, которые усугубляют негативное влияние нелинейной электрической нагрузки, то есть нагрузки, при которой ток не является синусоидальным. Такая нагрузка вызывает искажения формы сигнала и генерирует гармоники – дополнительные частоты, которые могут привести к ухудшению качества электрической энергии, перегрузке оборудования, перегреву проводников и другим негативным последствиям. В отличие от городских сетей, сети сельских территорий характеризуются значительной протяженностью линий электропередачи при малых сечениях проводов, преобладанием однофазных потребителей и высокой степенью неравномерности распределения нагрузок по фазам [27[.

Данные Министерства энергетики РФ свидетельствуют о критическом состоянии электросетевой инфраструктуры: в регионах Нечерноземья около 60% воздушных линий 0,4 кВ и более 40% линий 10 кВ имеют 100-процентный физический износ. Значительная часть силовых трансформаторов в сельской местности эксплуатируется сверх амортизационного и паспортного срока службы, а также встречаются трансформаторы с коэффициентом загрузки, превышающим нормативные значения, что создает дополнительные трудности для обеспечения стабильного напряжения [27].

Периодический мониторинг показателей качества электроэнергии (ПКЭ), проводимый сетевыми компаниями преимущественно на шинах трансформаторных подстанций, не отражает реальную картину в точках подключения, находящихся в середине или в конце линии. Исследования показывают, что системы электроснабжения сельских районов традиционно отличаются более низким уровнем надежности и качества электроэнергии по сравнению с городскими [28].

Структура нагрузок сельскохозяйственных потребителей отличается высокой долей электроприемников первой категории надежности, количество которых постоянно возрастает, перебои в электроснабжении которых приводят к гибели продукции и падежу скота. При этом радиальная схема построения большинства сельских сетей и отсутствие резервирования на уровне 0,4 кВ создают ситуацию, когда при аварийном отключении участка питающей сети электропитание может отсутствовать длительное время – до нескольких часов. Сложившееся положение дел требует внедрения локальных технических средств, способных повысить как надежность, так и качество электроснабжения на стороне непосредственно потребителя.

Сельские сети 0,4 кВ, как правило, характеризуются значительной протяженностью, малыми сечениями проводов и высокой долей двигательной нагрузки [3, 4]. Как было сказано выше, в структуре сельскохозяйственных потребителей доминируют асинхронные двигатели, частотно-регулируемые приводы (ЧРП), микроклиматические системы, мощные холодильные установки и т.п., а данной группы характерны следующие особенности: низкий естественный коэффициент мощности (0,6–0,75) при недогрузке двигателей; периодические пуски, сопровождающиеся бросками реактивной мощности и провалами напряжения; нелинейное потребление тока, вызывающее рост суммарного коэффициента гармонических

искажений (THD), который на фермах с интенсивным использованием ЧРП может достигать 70 % согласно результатам измерений [5].

Исследования режимов работы действующих электрических сетей сельскохозяйственных предприятий выявляют наличие не только высших гармоник, но и интергармоник (нецелых гармонических составляющих), которые слабо подавляются стандартными фильтрами и требуют применения более совершенных методов компенсации [29].

Следует учитывать также высокую изменчивость (динамичность) графиков нагрузки сельскохозяйственных объектов, обусловленную технологическими циклами производства. Потребляемая максимальная мощность может превышать минимальную в 3 и более раз, что создает значительные суточные колебания напряжения в распределительной сети. Включение и отключение мощных электродвигателей (кормораздатчиков, насосов, вентиляторов) сопровождается бросками пусковых токов, которые вызывают кратковременные провалы напряжения и генерируют импульсы реактивной мощности, приводящие к электромагнитной несовместимости работающего оборудования [30].

Таким образом, комплекс факторов — протяженность и изношенность сельских электрических сетей, высокая доля нелинейных и динамических нагрузок, технологическая специфика сельскохозяйственного производства, низкий естественный коэффициент мощности и значительная неравномерность суточных графиков — предопределяет необходимость применения быстродействующих устройств компенсации реактивной мощности и подавления гармоник [29]. Использование традиционных конденсаторных батарей в таких условиях ограничено из-за дискретности регулирования и риска резонансных явлений с высшими гармониками, что подтверждает целесообразность внедрения устройств типа DSTATCOM и E-STATCOM на основе ионисторов.

**Размещение DSTATCOM в радиальных распределительных сетях**

Эффективность компенсирующего устройства существенно зависит от места его установки в распределительной сети. Задача оптимального размещения DSTATCOM активно исследуется как зарубежными, так и отечественными учеными.

В работе 2025 года [23] выполнена совместная оптимизация размещения конденсаторных батарей и DSTATCOM в радиальной распределительной сети с использованием улучшенного экспоненциального оптимизатора (IEDO), учитывающего надежность компенсаторов и неопределенность нагрузки. Результаты моделирования показали, что одновременная установка обоих типов устройств обеспечивает наибольшее снижение стоимости потерь и максимальный процент чистой экономии.

Исследование [24] посвящено применению алгоритма Salp Swarm Algorithm (SSA) для оптимального размещения DSTATCOM. Предложенный авторами метод, апробированный на стандартной 33-узловой системе IEEE, обеспечивает значительное снижение суммарных потерь мощности при одновременном улучшении профиля напряжения.

Подход с использованием гибридного алгоритма PSO-GA (HPSOGA) предложен в [25]. На примере 13-узловой распределительной сети, представляющей электрические системы островов Бутон и Муна, показано, что гибридный метод превосходит отдельные алгоритмы по качеству решения, скорости сходимости и стабильности.

Для сельских распределительных сетей проблема оптимального размещения компенсирующих устройств осложняется значительной суточной и сезонной неравномерностью графиков нагрузки. В [3] предложена распределенная схема управления реактивной мощностью, обеспечивающая повышение низких установившихся напряжений за

счет одного или нескольких DSTATCOM. Метод подтвержден аналитическими расчетами и кейс-стади для реальных сельских распределительных систем.

Перспективным направлением является учет в оптимизационных моделях нелинейных искажений, создаваемых ЧРП. В [26] предложена интегрированная методология анализа для сельских распределительных сетей, включающая реалистичные модели гармонической инжекции для нагрузок с преобладанием частотно-регулируемых приводов и временные профили, отражающие суточные вариации. Данный подход может быть использован при выборе параметров ионисторного компенсирующего устройства для конкретного предприятия АПК.

Проанализировав вышесказанное, можно сделать вывод, что в отличие от зарубежных работ, где тема оптимального размещения STATCOM/DSTATCOM активно развивается, в российском научном дискурсе этот вопрос остается практически неисследованным, особенно в контексте сельских распределительных сетей.

**Развитие средств компенсации реактивной мощности**

Эволюция компенсирующих устройств прослеживается от нерегулируемых конденсаторных батарей до полностью управляемых статических компенсаторов. Конденсаторные установки, будучи наиболее простым и дешевым решением, обладают принципиальными недостатками: дискретность регулирования, чувствительность к гармоническим резонансам и деградация диэлектрика [2, 6].

Следующим этапом развития стали тиристорно-коммутируемые конденсаторные батареи (ТКК) и тиристорно-регулируемые реакторы (ТРР), которые позволили ускорить переключение ступеней и частично решить проблему дискретности. Однако такие гибридные системы оставались громоздкими, инерционными и не обеспечивали полноценной фильтрации высших гармоник. Дальнейший прогресс в области силовой электроники привёл к созданию статических синхронных компенсаторов (STATCOM – static synchronous compensator), в которых вместо тиристоров используются полностью управляемые IGBT-транзисторы. В отличие от конденсаторных батарей, STATCOM способен плавно, с быстродействием в доли периода сети, генерировать или потреблять реактивную мощность, не создавая резонансных контуров с сетью. Благодаря применению широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и систем управления на базе вращающейся системы координат d-q, STATCOM также эффективно подавляет высшие гармоники тока, что делает его предпочтительным решением для питания нелинейных нагрузок. Именно на базе STATCOM были разработаны распределительные версии DSTATCOM (Distribution STATCOM), адаптированные для сетей среднего и низкого напряжения. Как отмечено в работах российских исследователей [7, 8], применение статических синхронных компенсаторов на промышленных предприятиях обеспечивает рациональное использование энергоресурсов за счет плавного регулирования реактивной мощности.

Классические работы по силовой электронике, такие как, например [6] описывают базовые принципы управления описанными выше устройствами на основе синтеза активного и реактивного токов во вращающейся системе координат d-q, где активная составляющая (*d*-ось) управляет магнитным потоком или другими параметрами, связанными с продольной составляющей, а реактивная составляющая (*q*-ось) отвечает за генерацию или поглощение реактивной мощности. Для синхронизации системы управления с сетью используется PLL (Phase Locked Loop), которая представляет собой фазовую синхронизацию, определяющую опорный сигнал для преобразования координат.

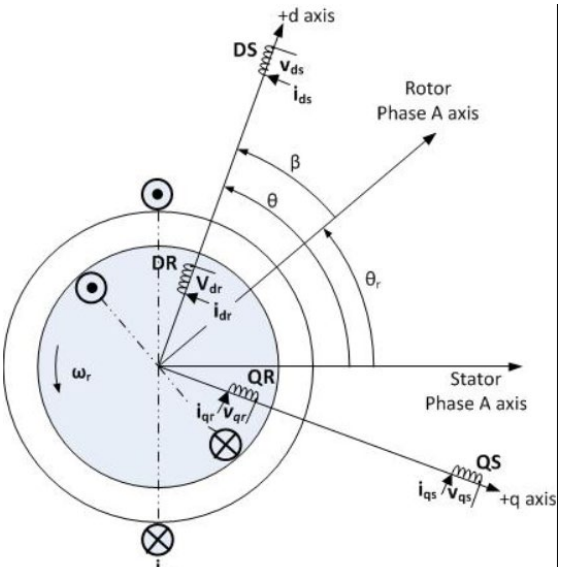



Рисунок 1 – Система координат *d-q*.

DSTATCOM (Distribution Static Compensator) представляет собой инвертор напряжения, включаемый параллельно в распределительную сеть, который генерирует управляемое переменное напряжение (преобразователь напряжения – VSC). Преобразователь напряжения (VSC) преобразует постоянное напряжение в трёхфазный набор выходных напряжений с требуемой амплитудой, частотой и фазой. IGBT-транзисторы быстро переключают постоянное напряжение с конденсатора на клеммы переменного тока. С помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) контролируется время и длительность этих импульсов, что позволяет синтезировать трёхфазную форму переменного напряжения на основной частоте системы. Структурная схема D-STATCOM представлена на рисунке 2.

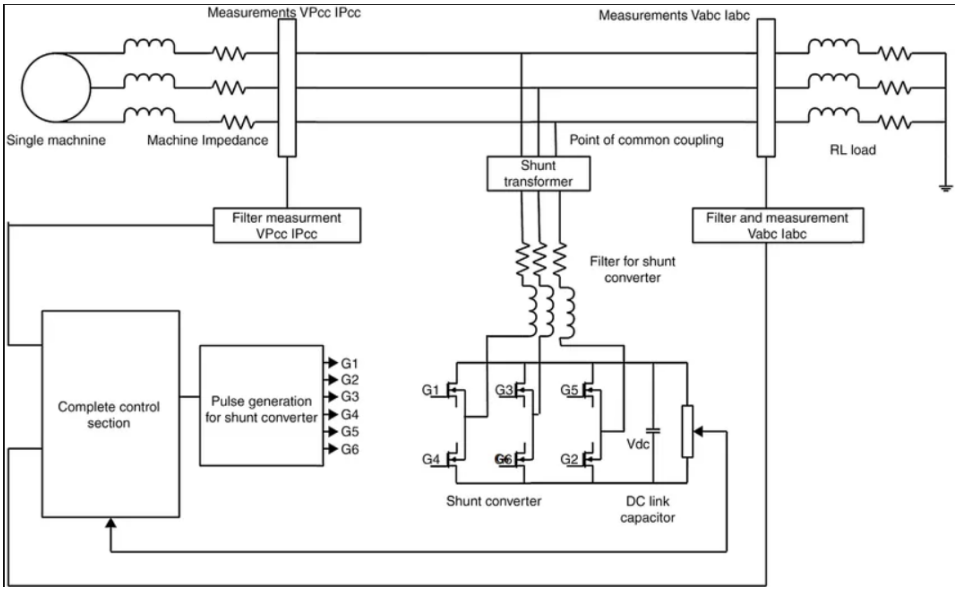



Рисунок 2 – Структурная схема DSTATCOM.

Однако, классический DSTATCOM содержит в звене постоянного тока лишь конденсаторную ёмкость (обычно электролитические конденсаторы), которая не предназначена для долговременного обмена активной энергией. Такой конденсатор используется не как накопитель энергии, а исключительно как элемент стабилизации напряжения для инвертора, он способен генерировать или потреблять только реактивную

мощность, поддерживая напряжение в точке подключения, фильтруя гармоники и снижая асимметрию фаз. Однако DSTATCOM не может компенсировать провалы напряжения, связанные с дефицитом активной мощности (например, при пуске мощного двигателя или кратковременном отключении питающей линии).

Дальнейшим развитием концепции стало оснащение DSTATCOM накопителями энергии в звене постоянного тока – E-STATCOM (Energy Storage STATCOM). Согласно обзору [9], использование энергоемких накопителей позволяет в течение короткого времени выдавать или поглощать активную мощность, что принципиально расширяет функциональные возможности устройства, таких как: компенсацию провалов и выбросов напряжения, демпфирование субгармонических колебаний, обеспечение «виртуальной инерции» для слабых сетей [10].

Кроме того, E-STATCOM, помимо описанных выше функций, способен создавать виртуальную инерцию, что позволяет поддерживать устойчивость электрической сети в масштабах энергосистемы (крупного предприятия, обособленного или удаленного от централизованной энергосистемы участка сети). Это становится особенно актуальным, когда сельскохозяйственное предприятие получает часть энергии от возобновляемых источников энергии, которые подключаются к сети через инверторы, то есть электронные преобразователи. У таких устройств нет вращающихся масс, а значит, нет естественной инерции**,** как у традиционных генераторов. Следовательно, при резких скачках нагрузки/генерации частота меняется слишком быстро, защитные системы могут не успеть среагировать и возрастает риск каскадных отключений и аварий. Применение E-STATCOM позволяет удерживать частоту в заданных пределах, что способствует *стабильности энергосистемы.*

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что применение E-STATCOM в сельском хозяйстве не только улучшает качество электроэнергии и защищает оборудование от перепадов напряжения, но и способствует созданию устойчивых автономных энергосистем на базе ВИЭ. Устройство повышает общую устойчивость энергосистемы сельских территорий – что критически важно для бесперебойной работы агропредприятий, особенно в условиях удалённости от централизованных сетей.

Таким образом, можно сделать вывод, что классические конденсаторные батареи, несмотря на простоту и низкую стоимость, обладая принципиальными ограничениями, такими как: дискретность регулирования, чувствительность к гармоническим резонансам, старение диэлектрика и малый циклический ресурс, не могут полноценно и качественно регулировать режимы электросети. В отличие от них, DSTATCOM обеспечивает плавное, безынерционное управление реактивной мощностью, не создаёт резонансных контуров и эффективно подавляет высшие гармоники. E-STATCOM (DSTATCOM с накопителем энергии) дополнительно позволяет компенсировать провалы напряжения за счёт выдачи активной мощности, поддерживать виртуальную инерцию и повышать динамическую устойчивость электросетей. Следовательно, по совокупности функциональных возможностей, быстродействия, надёжности и долговечности (циклический ресурс >500 000) устройства на базе STATCOM существенно превосходят классические конденсаторные батареи**,** особенно в условиях динамических и нелинейных нагрузок сельских распределительных сетей 0,4 кВ.

**Ионисторы как элемент накопителя энергии для E-STATCOM**

Ионистор (двойнослойный суперконденсатор) – это электрохимическое устройство, запасающее энергию в двойном электрическом слое на границе электрод–электролит. В

отличие от обычных конденсаторов, где используются металлические обкладки, разделённые диэлектриком, в суперконденсаторах применяются электроды с развитой удельной поверхностью, погружённые в электролит. Фундаментальные основы функционирования суперконденсаторов изложены в монографиях [11, 12], а также в отечественных обзорных публикациях [13, 14].

В таблице 1 приведены сравнительные характеристики трех основных типов накопителей энергии, применяемых в составе E-STATCOM.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики накопителей энергии

| **Параметр** | **Ионисторы (суперконденсаторы)** | **Электролитические конденсаторы** | **Литий-ионные аккумуляторы** |
|---|---|---|---|
| **Удельная мощность, кВт/кг** | 5–15 | 0,1–0,5 | 0,1–0,3 |
| **Удельная энергия, Вт·ч/кг** | 1–10 | 0,01–0,1 | 100–250 |
| **Циклический ресурс** | >500 000 | ~$10^6$ | 1 000–5 000 |
| **Рабочая температура, °C** | –40…+85 | –40…+105 | –20…+60 |
| **КПД цикла заряд–разряд, %** | 95–98 | ~99 | 85–95 |

*Примечание.* Данные обобщены по источникам [11–13].

Как следует из таблицы, ионисторы занимают промежуточное положение между обычными конденсаторами и аккумуляторными батареями, сочетая высокую удельную мощность с достаточной для задач динамической компенсации энергоемкостью. Важнейшими преимуществами суперконденсаторов для применения в сельских сетях являются: способность воспринимать и отдавать импульсы тока большой величины; практически полное отсутствие деградации при глубоких и частых циклах; широкий температурный диапазон (от – 40 до +85 °C), исключающий необходимость систем термостатирования; экологическая безопасность и возможность построения модульных систем.

Отечественная промышленность уже сейчас серийно выпускает суперконденсаторы, что создает предпосылки для импортозамещения. Так, например, АО «Элеконд» производит серию К58-36 с наработкой до 500 000 циклов и рабочими температурами от – 40 до +85 °C [15, 16]. Компания «Тайтэн Пауэр Солюшн» предлагает готовые суперконденсаторные системы накопления энергии (ССНЭ) с ресурсом до 1 млн циклов [17, 18], которые могут быть адаптированы для использования в составе E-STATCOM.

**Структура, алгоритмы управления и варианты реализации E-STATCOM на базе ионисторов**

E-STATCOM имеет в своем составе систему управления (Control), которая анализирует параметры сети (Vac, Iac) и задаёт уставки по активной (Pref) и реактивной

(Qref) мощности; Voltage Sourced Converter (VSC), функции которого – преобразование постоянного напряжение (Vdc) от источника энергии (Energy Source) в трёхфазное переменное, синхронизированное с сетью через согласующий трансформатор (Coupling transformer); источник энергии (Energy Source) поддерживает стабильное напряжение на шине Vdc, компенсируя пиковые нагрузки; AC Terminal обеспечивает обмен энергией с сетью в реальном времени, стабилизируя напряжение и компенсируя реактивную мощность. Функциональная блок-схема E-STATCOM показана на рисунке 5. Схема AC/DC-преобразования с управляемым VSC.

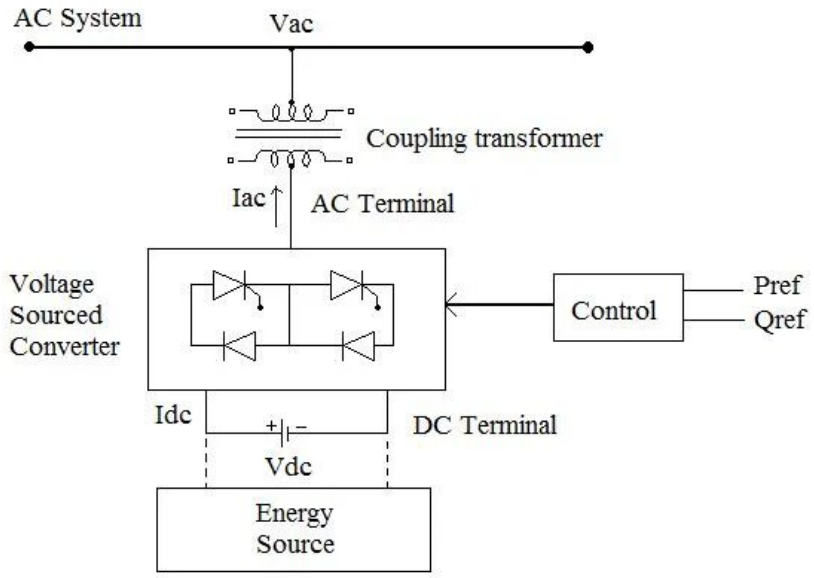



Рисунок 3 – Схема AC/DC-преобразования с управляемым VSC.

В работах по моделированию E-STATCOM подтверждена эффективность применения суперконденсаторов для динамической поддержки сети. В зарубежном исследовании [19] предложен метод управления E-STATCOM на основе виртуального синхронного генератора (VSG) с токовым контуром управления. Результаты моделирования демонстрируют, что данный метод обеспечивает непрерывную работу устройства при трёхфазном коротком замыкании на землю, а также эффективно подавляет колебания активной и реактивной мощности после устранения аварийного режима. В российском исследовании [20] с использованием имитационного моделирования в среде MATLAB Simulink обосновано применение трёхуровневого СТАТКОМ напряжением 0,4 кВ с накопителем на суперконденсаторах. Показано, что такой накопитель требует меньшей энергоёмкости по сравнению с буферным, а его использование для повышения качества электроэнергии в низковольтных сетях признано перспективным.

Скомороховым П.И. и Зацепиной В.И. [21] предложена ионистор-аккумуляторная схема для автономной работы устройств динамической компенсации искажений напряжения, подтверждающая эффективность гибридного подхода к построению накопителя.

В диссертационной работе Смотрова Н.Н. [22] доказано, что применение ионисторов в системах оперативного постоянного тока позволяет эффективно сглаживать провалы и выбросы напряжения, причем методика расчета параметров ионисторной сборки может быть адаптирована и для проектирования E-STATCOM.

**Направления дальнейших исследований**

Выполненный в данной статье обзор позволяет констатировать, что научно-технический задел в области применения ионисторов для компенсации реактивной

мощности в значительной степени сформирован. Однако для широкого внедрения ионисторных DSTATCOM в сельских распределительных сетях требуется решение следующих задач, представляющих интерес для дальнейших исследований:

1. Разработка методики выбора параметров E-STATCOM на ионисторах и места установки устройства, учитывающей суточный график реактивной нагрузки конкретного типа сельскохозяйственного предприятия.
2. Адаптация алгоритмов управления E-STATCOM к пульсирующему моменту асинхронных двигателей, создающему модуляцию реактивной мощности с частотой скольжения.
3. Оценка технико-экономической эффективности с учетом снижения платы за реактивную мощность, уменьшения потерь и предотвращенного ущерба от простоев технологического оборудования.
4. Проведение опытно-промышленной эксплуатации на действующем объекте АПК с объективным подтверждением расчетных показателей качества электроэнергии.

**Выводы**

Характер энергопотребления в агропромышленном секторе, который отличатся существенной неравномерностью и наличием множества нелинейных нагрузок, требует внедрения комплексных решений по управлению качеством электроэнергии. При этом особую значимость приобретает возможность оперативного реагирования на динамические изменения нагрузки, что может быть обеспечено посредством современных систем активной компенсации. Такими системами могут стать распределительные статические компенсаторы (DSTATCOM) или статические синхронные компенсаторы (E-STATCOM) с системой накопления энергии на базе ионисторов.

Проведенный анализ международных исследований демонстрирует активное развитие и внедрение устройств DSTATCOM/E-STATCOM в мировой практике. Зарубежные научные работы охватывают широкий спектр вопросов: от оптимизации размещения компенсирующих устройств до разработки инновационных алгоритмов управления.

Однако, изучение научной литературы выявил существенный дефицит исследований, посвящённых практическому применению устройств DSTATCOM/E-STATCOM на российских сельскохозяйственных предприятиях. Существующие публикации преимущественно концентрируются на теоретических аспектах функционирования данных систем, оставляя без должного внимания вопросы их практической реализации в специфических условиях агропромышленного комплекса России.

Особого внимания заслуживает возможность локализации производства DSTATCOM/E-STATCOM на базе отечественных компонентов. Наличие серийного производства отечественных суперконденсаторов (серия К58-36 АО «Элеконд») и готовых систем накопления («Тайтэн Пауэр Солюшн») создает необходимые предпосылки для импортозамещения в данной области. Существующие алгоритмы оптимального размещения DSTATCOM, методы математического моделирования и наработки в области схемотехники преобразователей позволяют перейти к этапу создания опытных образцов и проведению натурных испытаний на реальных сельскохозяйственных объектах.

Анализ литературы показывает, что применение ионисторов в составе статических компенсаторов реактивной мощности является перспективным направлением повышения качества электроэнергии в сельских распределительных сетях 0,4 кВ. Уникальные характеристики суперконденсаторов – высокая удельная мощность (5–15 кВт/кг),

циклический ресурс более 500 000 циклов, работоспособность в диапазоне температур от –40 до +85 °С – делают их оптимальным элементом накопителя не только для DSTATCOM, предназначенного для компенсации динамических реактивных нагрузок на предприятии АПК, но также и E-STATCOM, способного поддерживать устойчивость электрической сети, что особенно важно в условиях генерации возобновляемой электроэнергии.

**Список использованных источников:**


1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
2. Боярская, Н. П. Причины и компенсация высших гармоник в сетях 0,4 кВ АПК : монография / Н. П. Боярская ; Красноярский государственный аграрный университет. — Красноярск : Красноярский государственный аграрный университет, 2023. — 146 с. : ил. — Библиогр.: с. 114–121 (91 назв.). — ISBN 978-5-94167-533-3.
3. Singh B., Chandra A., Al-Haddad K. Power Quality: Problems and Mitigation Techniques. – Chichester: John Wiley & Sons, 2015. – 582 p.
4. A Reactive Power Compensation Scheme Using Distribution STATCOMs to Manage Voltage in Rural Distribution Systems // 2020 IEEE International Conference on Power Systems Technology (POWERCON). – Edmonton, AB, Canada, 2021. – P. 1–6.
5. Асташев М.Г., Лоскутов А.Б., Лоскутов А.А., Красноперов Р.Н. Компенсация реактивной мощности в условиях искажения токов и напряжений // Электричество. – 2025. – № 8. – С. 42–52.
6. Hingorani N.G., Gyugyi L. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. – New York: IEEE Press, 2000. – 432 p.
7. Уваров Г.Г., Зацепин Е.П. Статком как средство решения вопросов энергосбережения // Агротехника и энергообеспечение. – 2018. – № 4 (21). – С. 62–67.
8. Pronin K.M., Zatsepina V.I. Improving the Efficiency of Power Supply Systems for Agricultural Enterprises and Sparsely Populated Areas // Электротехника, электронная техника, информационные технологии. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/improving-the-efficiency-of-power-supply-systems-for-agricultural-enterprises-and-sparsely-populated-areas/viewer (дата обращения: 26.04.2026).
9. E-STATCOM (energy storage + STATCOM): a solution to integrate large-scale wind farms into the grid at medium and high power levels // Electric Power Systems Research. – 2020. – Vol. 189. – P. 106706.
10. Modelling and Control of SST Based E-STATCOM with Supercapacitor to Enhance Voltage Stability of Distribution Network // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 12345–12358.
11. Conway B.E. Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications. – New York: Kluwer Academic/Plenum, 1999. – 698 p.;
12. Béguin F., Frąckowiak E. (eds.) Supercapacitors: Materials, Systems, and Applications. – Weinheim: Wiley-VCH, 2013. – 568 p.
13. Шамаханова И.М. Суперконденсаторы в электрической цепи // Научно-технический вестник. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/superkondensatory-v-elektricheskoy-tsepi/viewer (дата обращения: 26.04.2026).
14. Мутаев Н.Х. Ионисторы (суперконденсаторы): основы и применение // StudNet. – 2021. – № 7. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ionistory-superkondensatory-osnovy-i-primenenie/viewer (дата обращения: 26.04.2026).

15. АО «Элеконд». Суперконденсаторы К58-36. ЕВАЯ.673623.040ТУ. – URL: https://elecond.ru/supercapacitors/k58-36/ (дата обращения: 01.03.2026).

16. Суперконденсаторы К58-36 от АО «Элеконд» // CHIPDIP: новости. – 06.08.2025. – URL: https://www.chipdip.ru/news/elekond-k58-36-supercapacitors (дата обращения: 01.03.2026).

17. ООО «Тайтэн Пауэр Солюшн». Высокомощные суперконденсаторные системы накопления энергии (ССНЭ). – URL: https://titanps.ru/product/ionistory-superkondensatory (дата обращения: 26.04.2026).

18. «Тайтэн Пауэр Солюшн» продемонстрировала на МФЭС суперконденсаторную систему накопления энергии // Энергетика и промышленность России. – URL: https://www.eprussia.ru/news/base/2024/3231404.htm (дата обращения: 26.04.2026).

19. K. Nada, T. Fujii, K. Sano, "Control Study of Enhanced STATCOM for Supercapacitor Applying Virtual Synchronous Generator Control," in *Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Expo (ECCE 2024)*, pp. 1377–1382, Oct. 2024.

20. Третьяков, Е. А., Мещеряков, А. В. Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения с резервированием от дизель-генераторных установок / Е. А. Третьяков, А. В. Мещеряков // Вестник Югорского государственного университета. — 2023. — Вып. 2 (69). — С. 133–143.

21. Скоморохов П.И., Зацепина В.И. Обеспечение автономной работы устройств динамической компенсации искажений напряжения посредством ионисторно-аккумуляторной схемы // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 1. – С. 146–153.

22. Смотров Н.Н. Сглаживание провалов и выбросов напряжения в системах оперативного постоянного тока электрических станций и подстанций с помощью ионисторов: дис. … канд. техн. наук: 05.14.02. – М.: НИУ МЭИ, 2019. – 20 с.

23. Alanazi A., Alanazi M., Memon Z.A., Awan A.B., Deriche M. Availability and Uncertainty-Aware Optimal Placement of Capacitors and DSTATCOM in Distribution Network Using Improved Exponential Distribution Optimizer // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – P. 13204.

24. Yuvaraj T., Lakshmi D., Sivarajeswari S., Raj R.E., Balamurugan P., Buvana D. Application of Salp Swarm Algorithm for Optimal Placement of DSTATCOM in the Radial Distribution Networks // AIP Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3044, No. 1. – P. 1–6.

25. Kasim M., Yusran Y., Hasniaty A. AI-Based Optimization of D-STATCOM Placement for Power Quality Improvement in Isolated Power Networks // 2025 12th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE). – Semarang, Indonesia, 2025.

26. Identifying Optimal Wind Penetration for Agricultural Distribution Networks: Integrated Power Quality and Reliability Analysis // International Journal of Engineering and Manufacturing. – 2026. – Vol. 16, No. 2. – P. 1–15.

27. Бухвал, А. В. Анализ показателей качества электроэнергии в точках её передачи на напряжении 0,22 кВ / А. В. Бухвал, М. А. Юндин // Вестник аграрной науки Дона. – 2021. – № 1 (53). – С. 51–58.

28. Королёв, Д. С. Обзор состояния и перспективных направлений развития сельских электрических сетей 0,4 кВ / Д. С. Королёв // Агротехника и энергообеспечение. – 2025. – № 1 (46). – С. 47.

29. Наумов, И. В. Исследование режимов работы действующих электрических сетей сельскохозяйственных предприятий / И. В. Наумов, С. В. Подъячих, М. А. Якупова, Э. С.

Федоринова, А. Н. Третьяков // Вестник НГИЭИ. – 2024. – № 1 (152). – С. 72–90.

30. Сбитнев, Е. А. Моделирование параметров электрической сети сельскохозяйственного предприятия в среде MATLAB / Е. А. Сбитнев, В. Л. Осокин // Процессы и машины агроинженерных систем: вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2017. – № 8 (154). – С. 171.

**Bibliography:**

1. GOST 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in public power supply systems. – Moscow: Standartinform, 2014. – 16 p.

2. Boyarskaya, N.P. Causes and compensation of higher harmonics in 0.4 kV networks of the agro-industrial complex: monograph / N.P. Boyarskaya; Krasnoyarsk State Agrarian University. – Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University, 2023. – 146 p.: ill. – Bibliography: pp. 114–121 (91 ref.). – ISBN 978-5-94167-533-3.

3. Singh B., Chandra A., Al-Haddad K. Power Quality: Problems and Mitigation Techniques. – Chichester: John Wiley & Sons, 2015. – 582 p.

4. A Reactive Power Compensation Scheme Using Distribution STATCOMs to Manage Voltage in Rural Distribution Systems // 2020 IEEE International Conference on Power Systems Technology (POWERCON). – Edmonton, AB, Canada, 2021. – P. 1–6.

5. Astashev M.G., Loskutov A.B., Loskutov A.A., Krasnoperov R.N. Reactive power compensation under current and voltage distortion conditions // Elektrichestvo. – 2025. – No. 8. – P. 42–52.

6. Hingorani N.G., Gyugyi L. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. – New York: IEEE Press, 2000. – 432 p.

7. Uvarov G.G., Zatsepin E.P. STATCOM as a means for solving energy saving issues // Agrotechnika i Energoobespechenie. – 2018. – No. 4 (21). – P. 62–67.

8. Pronin K.M., Zatsepina V.I. Improving the Efficiency of Power Supply Systems for Agricultural Enterprises and Sparsely Populated Areas // Electrical Engineering, Electronic Engineering, Information Technologies. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/improving-the-efficiency-of-power-supply-systems-for-agricultural-enterprises-and-sparsely-populated-areas/viewer (accessed: 26.04.2026).

9. E-STATCOM (energy storage + STATCOM): a solution to integrate large-scale wind farms into the grid at medium and high power levels // Electric Power Systems Research. – 2020. – Vol. 189. – P. 106706.

10. Modelling and Control of SST Based E-STATCOM with Supercapacitor to Enhance Voltage Stability of Distribution Network // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 12345–12358.

11. Conway B.E. Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications. – New York: Kluwer Academic/Plenum, 1999. – 698 p.

12. Béguin F., Frąckowiak E. (eds.) Supercapacitors: Materials, Systems, and Applications. – Weinheim: Wiley-VCH, 2013. – 568 p.

13. Shamakhanova I.M. Supercapacitors in an electric circuit // Scientific and Technical Bulletin. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/superkondensatory-v-elektricheskoy-tsepi/viewer (accessed: 26.04.2026).

14. Mutaev N.Kh. Ionistors (supercapacitors): fundamentals and applications // StudNet. – 2021. – No. 7. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ionistory-superkondensatory-osnovy-i-primenenie/viewer (accessed: 26.04.2026).

15. JSC "Elecond". Supercapacitors K58-36. YeVAYa.673623.040TU. – URL: https://elecond.ru/supercapacitors/k58-36/ (accessed: 01.03.2026).

16. Supercapacitors K58-36 from JSC "Elecond" // CHIPDIP: news. – 06.08.2025. – URL: https://www.chipdip.ru/news/elekond-k58-36-supercapacitors (accessed: 01.03.2026).

17. LLC "Titan Power Solution". High-power supercapacitor energy storage systems. – URL: https://titanps.ru/product/ionistory-superkondensatory (accessed: 26.04.2026).

18. "Titan Power Solution" demonstrated a supercapacitor energy storage system at the MFES // Energy and Industry of Russia. – URL: https://www.eprussia.ru/news/base/2024/3231404.htm (accessed: 26.04.2026).

19. K. Nada, T. Fujii, K. Sano, "Control Study of Enhanced STATCOM for Supercapacitor Applying Virtual Synchronous Generator Control," in Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Expo (ECCE 2024), pp. 1377–1382, Oct. 2024.

20. Tretyakov, E.A., Meshcheryakov, A.V. Improving power quality in power supply systems with diesel-generator set backup // Bulletin of Yugra State University. – 2023. – Issue 2 (69). – P. 133–143.

21. Skomorokhov P.I., Zatsepina V.I. Ensuring autonomous operation of dynamic voltage distortion compensation devices using an ionistor-battery circuit // Bulletin of Chuvash University. – 2019. – No. 1. – P. 146–153.

22. Smotrov N.N. Smoothing of voltage sags and swells in DC auxiliary systems of power plants and substations using ionistors: PhD thesis in Engineering: 05.14.02. – Moscow: NRU MPEI, 2019. – 20 p.

23. Alanazi A., Alanazi M., Memon Z.A., Awan A.B., Deriche M. Availability and Uncertainty-Aware Optimal Placement of Capacitors and DSTATCOM in Distribution Network Using Improved Exponential Distribution Optimizer // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – P. 13204.

24. Yuvaraj T., Lakshmi D., Sivarajeswari S., Raj R.E., Balamurugan P., Buvana D. Application of Salp Swarm Algorithm for Optimal Placement of DSTATCOM in the Radial Distribution Networks // AIP Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3044, No. 1. – P. 1–6.

25. Kasim M., Yusran Y., Hasniaty A. AI-Based Optimization of D-STATCOM Placement for Power Quality Improvement in Isolated Power Networks // 2025 12th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE). – Semarang, Indonesia, 2025.

26. Identifying Optimal Wind Penetration for Agricultural Distribution Networks: Integrated Power Quality and Reliability Analysis // International Journal of Engineering and Manufacturing. – 2026. – Vol. 16, No. 2. – P. 1–15.

27. Bukhval, A.V., Yundin, M.A. Analysis of power quality indices at points of electricity transmission at 0.22 kV voltage // Herald of Don Agrarian Science. – 2021. – No. 1 (53). – P. 51–58.

28. Korolev, D.S. Review of the state and promising development directions of rural 0.4 kV electrical networks // Agrotechnika i Energoobespechenie. – 2025. – No. 1 (46). – P. 47.

29. Naumov, I.V., Podyachikh, S.V., Yakupova, M.A., Fedorinova, E.S., Tretyakov, A.N. Study of operating modes of existing electrical networks of agricultural enterprises // Bulletin of NGIEI. – 2024. – No. 1 (152). – P. 72–90.

30. Sbitnev, E.A., Osokin, V.L. Modeling of parameters of an agricultural enterprise electrical network in MATLAB environment // Processes and Machinery of Agro-Engineering Systems: Bulletin of Altai State Agricultural University. – 2017. – No. 8 (154). – P. 171.

*Черкасов Глеб Дмитриевич, магистрант кафедры электроснабжения и теплоэнергетики имени академика И.А. Будзко ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49. e-mail: moscow3508@mail.ru*

# APPLICATION OF SUPERCAPACITORS (IONISTORS) IN REACTIVE POWER COMPENSATION DEVICES FOR IMPROVING POWER QUALITY OF AGRICULTURAL CONSUMERS

G. D. Cherkasov

Timiryazev Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy

Annotation. This paper presents an analysis of current scientific and technical solutions concerning the application of DSTATCOM (Distribution Static Compensator) – a device intended for reactive power compensation and power quality improvement in distribution networks – which integrates supercapacitors (ionistors). A review of the relevant literature reveals a significant gap in Russian research regarding the optimal placement of supercapacitor-based DSTATCOMs in rural distribution networks. This gap defines the directions for future work: the development of methodologies for selecting device parameters and installation locations that account for actual load profiles of agricultural enterprises. The key operational characteristics of supercapacitors that make them promising for dynamic compensating devices are examined, namely specific power, cycle life, and temperature stability. Particular attention is paid to a review of both Russian and international studies focusing on topological configurations, control algorithms, and optimal placement strategies for DSTATCOMs in radial distribution networks. A comparative analysis is carried out between conventional reactive power compensation equipment and advanced static synchronous compensators equipped with supercapacitor-based energy storage systems (E-STATCOM – Energy Storage Static Synchronous Compensator). The results of simulation and experimental studies are analyzed, confirming the effectiveness of supercapacitor energy storage units in improving power factor, stabilizing voltage, and mitigating harmonics. Based on the performed analysis, promising avenues for further research are identified, primarily in the area of developing optimal DSTATCOM placement techniques for 0.4 kV rural distribution networks, as well as methods for selecting device parameters and operating modes that take into account the specific load patterns of agro-industrial complex enterprises.

Keywords: supercapacitors, ionistors, power quality, reactive power, compensation, DSTATCOM, E-STATCOM, agricultural power supply, energy storage systems, electric distribution networks.

*Gleb Dmitrievich Cherkasov, Master's Student, Department of Power Supply and Heat Power Engineering named after Academician I.A. Budzko, Timiryazev Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russia Email: moscow3508@mail.ru*

**УДК 621.383.51**

# МЕТОДЫ И СПОСОБЫ ОЧИСТКИ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ ОТ СНЕГА

В.Д. Агафонов, В.И. Загинайлов

ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева

***Аннотация.*** *Снежный покров на поверхности фотоэлектрических модулей приводит к снижению выработки электроэнергии вплоть до полной остановки генерации; установлено, что критический порог снегового покрова составляет около 7 мм, при котором КПД модуля падает с 16 до 6,67 % за 6 суток; рассмотрены три основные группы методов очистки (пассивные, механические и автоматизированные); обоснованы рекомендации по выбору способа очистки в зависимости от климатических условий, типа установки и экономической целесообразности. Выводы: наиболее эффективным с точки зрения соотношения затрат и результата является комплексный подход, сочетающий правильный выбор угла установки панелей, применение гидрофобных покрытий и, при необходимости, использование автоматизированных систем очистки.*

***Ключевые слова:*** *солнечные панели, фотоэлектрические модули, очистка от снега, зимняя эксплуатация, механическая очистка, автоматизированные системы.*

**Введение.** Солнечная энергетика — одно из наиболее динамично развивающихся направлений возобновляемой энергетики в мире. В России, несмотря на суровые климатические условия в большинстве регионов, количество солнечных панелей неуклонно растёт, причём значительная их часть приходится на агропромышленный комплекс, где такие модули используются для электроснабжения удалённых ферм, теплиц и насосных станций. Однако эффективность работы солнечных панелей напрямую зависит от чистоты их поверхности [1]. Зимой на них накапливается снег, который почти полностью блокирует доступ солнечного света к фотоэлементам.

Согласно данным мониторинга 84 станций на территории РФ, проведённого в 2024 г., в 68 % случаев снег покидает панели самостоятельно в течение 24–48 часов после снегопада, в 22 % случаев остаётся до 5 дней, а в 10 % случаев требует ручной очистки. При этом исследования показывают, что снеговая нагрузка способна снижать производительность солнечных батарей на 10–30 % в зимний период, а в отдельных случаях потери достигают 70–80 % [2]. Снег на поверхности панели действует как зеркало: он отражает солнечные лучи, не пропуская их к фотоэлементам. Даже небольшой участок панели, закрытый снегом, может привести к потере мощности всей цепочки модулей из-за особенностей последовательного соединения [3].

В этой связи проблема своевременной и эффективной очистки солнечных панелей от снега приобретает особую актуальность для сельских территорий, где обслуживающий персонал часто отсутствует, а доступ к панелям затруднён [4].

**Цель работы** заключается в анализе и систематизации существующих методов очистки солнечных панелей от снежного покрова.

**Материалы и методы исследования**

Объект исследования — методы и технические средства очистки поверхности фотоэлектрических модулей от снега и наледи в условиях зимней эксплуатации, включая

стационарные наземные фотоэлектрические батареи, используемые в сельском хозяйстве [5].

Методы исследования включают:

-анализ отечественного и зарубежного опыта эксплуатации солнечных панелей в зимний период;

-классификацию существующих методов очистки по принципу действия;

-сравнение методов по критериям эффективности, затрат и безопасности для панелей [6].

**Результаты исследования и их обсуждение**

**Анализ опыта эксплуатации солнечных панелей в зимний период.**

1. **Эффект самоочистки.** При выработке панелью даже 50 Вт мощности её поверхность нагревается на 8–12 °С выше температуры окружающего воздуха, что способствует образованию скользкой прослойки между снегом и стеклом. Однако в условиях длительных морозов этого может быть недостаточно для полного удаления снега [2]. В исследовании, проведённом в Новосибирске в 2025 году на 12 системах, зафиксировано, что в 87 % снежных дней панели очищались самостоятельно за 6–36 часов благодаря самонагреву под солнцем, гладкой поверхности стекла и гидрофобным свойствам антибликового покрытия [10].

2. **Отрицательное влияние наледи.** Закрытые снегом участки панели остывают сильнее открытых, возникают локальные напряжения. Со временем это вызывает деградацию спаев. Исследование НИИСФ РААСН показало: регулярное обледенение сокращает срок службы панелей на 3–5 лет [2].

3. **Повышение энергоэффективности зимой.** Свежевыпавший снег обладает высокой отражающей способностью, направляя солнечные лучи обратно на панели (эффект альбедо) [13]. Низкая температура воздуха снижает внутренние потери энергии. Исследования Министерства энергетики США показывают, что зимой панели могут производить на 10–15 % больше энергии при условии очистки, особенно в ясную морозную погоду [16]. Однако это преимущество полностью нивелируется при накоплении снега на поверхности.

**Классификация методов очистки солнечных панелей от снега.**

Проведённый анализ позволяет разделить все существующие методы очистки солнечных панелей от снега на три основные группы: пассивные, механические (ручные) и автоматизированные [3, 7].

**Пассивные методы.** Пассивные методы не требуют вмешательства человека и основываются на правильном проектировании и установке солнечных панелей [4]. К их числу относятся:

*Выбор оптимального угла наклона.* При установке панелей под углом 35° и более снег сползает сам через 2–5 дней после снегопада (в Сибири это наблюдается в 84 % случаев). Согласно рекомендациям Министерства энергетики США, угол наклона до 60° является оптимальным (рис 1) для естественного схода снега в зимний период [17]. В руководстве Enphase подтверждается, что стёкла панелей имеют низкое трение, и при достаточном угле наклона снег быстро соскальзывает [3].

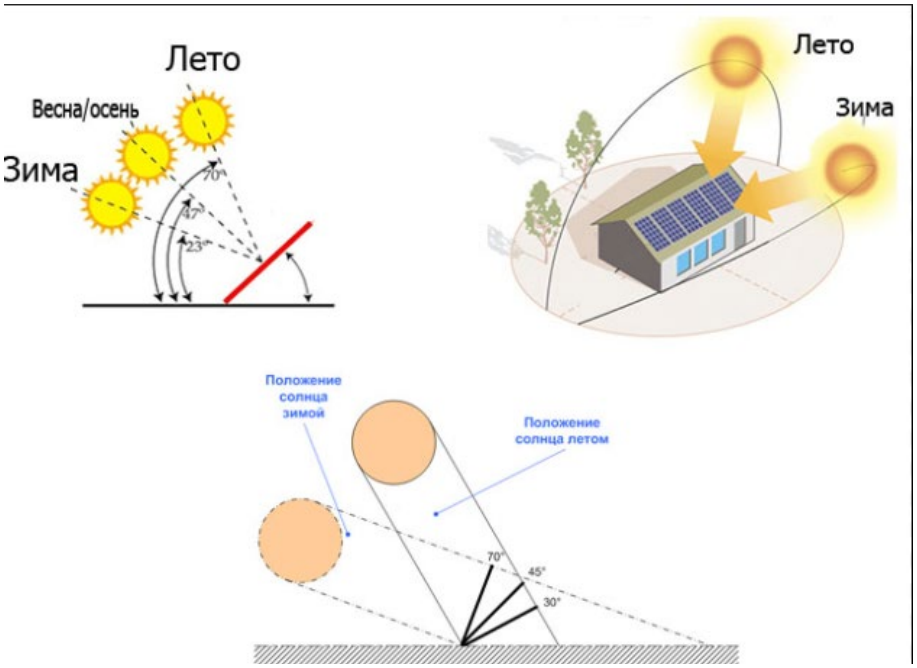



Рисунок 1. Углы наклона солнечных панелей

*Вертикальная установка.* Монтирование модуля практически вертикально (угол 90°) решает проблему налипания снега. Вертикальная конструкция, как отмечается в исследованиях, позволяет в зимнее время повысить эффективность генерации электроэнергии за счёт отражения снега, а летом обеспечивает экономию пространства [5].

*Использование гидрофобных покрытий.* Гидрофобные составы (например, «NANOPROTECH Solar») снижают адгезию снега на 40 % и действуют в течение 1,5 лет. Современные панели покрыты антибликовым слоем, который часто обладает и гидрофобными свойствами — вода и расплавленный снег скатываются, унося за собой рыхлый снег [10]. В Польше разработаны покрытия на основе силикон-эпоксидной смолы с добавлением октасферосиликатов, которые снижают адгезию льда на 43 % и задерживают замерзание в 70 раз дольше по сравнению с немодифицированным покрытием [11]. Обзорная работа в журнале Surfaces and Interfaces также подтверждает, что прозрачные супергидрофобные покрытия обладают потенциалом для создания самоочищающихся поверхностей солнечных панелей, сохраняя при этом необходимую проницаемость солнечных лучей [15].

*Эффект Вентури.* Канадская компания «Isolara Energy Services» разработала систему самоочистки, основанную на падении давления при прохождении воздуха через суженную часть трубы. Поток воздуха сдувает с панели снег и пыль. Главное условие — установка панели в хорошо продуваемом месте [7].

**Ручная (механическая) очистка.** Это наиболее простой и доступный способ, но он требует соблюдения определённых правил, чтобы не повредить панели. Для очистки рекомендуется использовать мягкие щётки из EVA-пены или мягкие скребки, которые не царапают защитное стекло [3]. Применяются также специальные телескопические швабры, позволяющие очищать панели с земли, не поднимаясь на крышу (рис 2) [13].



Рисунок 2. Механическая очистка солнечных панелей

При выполнении ручной очистки категорически запрещается:

-использовать металлические скребки и лопаты — они оставляют царапины, снижающие прозрачность стекла. Данные за январь–февраль 2026 года в Новосибирской, Кировской и Свердловской областях показывают, что зафиксировано 23 случая резкого падения выработки солнечных станций после ручной уборки снега: выработка упала на 18–32 %, при этом визуально повреждений обнаружено не было, а тепловизионная диагностика выявила микротрещины в кремниевых ячейках [9];

-лить горячую воду — резкий перепад температур вызывает растрескивание стекла;

-применять химические реагенты на основе хлоридов и солей — они разрушают алюминиевые рамы и уплотнители за 1–2 сезона;

-счищать снег при сильном нажатии (более 3 кг/см²), так как это может привести к микротрещинам в стекле. По данным ВНИИКП (2025 год), локальное давление более 30 Н (≈3 кгс) в одной точке вызывает необратимую деформацию кремниевой ячейки толщиной 160–180 мкм, что через 6 месяцев приводит к падению выработки на 18–37 % [9];

-производить очистку без страховки на скользких крышах.

**Автоматизированные методы.** Автоматизированные системы позволяют производить очистку без участия человека, что особенно важно для удалённых панелей, характерных для сельскохозяйственных предприятий [6, 7].

*Роботизированные системы очистки.* Специальные роботы (рис 3), перемещающиеся по поверхности панелей, удаляют снег с помощью щёток и воздушных потоков. Согласно исследованию автономной роботизированной системы, представленному в IEEE, робот способен очищать до 135 м²/ч свежего снега и поддерживает эффективность очистки выше 85 % даже на обледенелых участках [8]. Исследователи также отмечают, что в производстве стоимость компонентов такого робота составляет порядка нескольких тысяч долларов США, а при массовом производстве цена единицы может снизиться ещё больше [8]. Некоторые модели оснащены датчиками на основе искусственного интеллекта и могут работать автономно [16].




Рисунок 3. Роботизированная система очистки солнечных панелей

*Системы обогрева.* На тыльной стороне панели или по всей её поверхности монтируются нагревательные элементы, изображенные на рисунке 4 (провода, маты). При включении системы снег на лицевой поверхности тает и стекает [14]. Этот метод обеспечивает полную автоматизацию, но потребляет до 10–15 % от вырабатываемой панелью энергии. В работе Лагойды З.С. (Национальный университет «Львовская политехника») описана разработка и исследование системы самонагрева солнечных панелей для очистки от снега в зимних условиях [1].

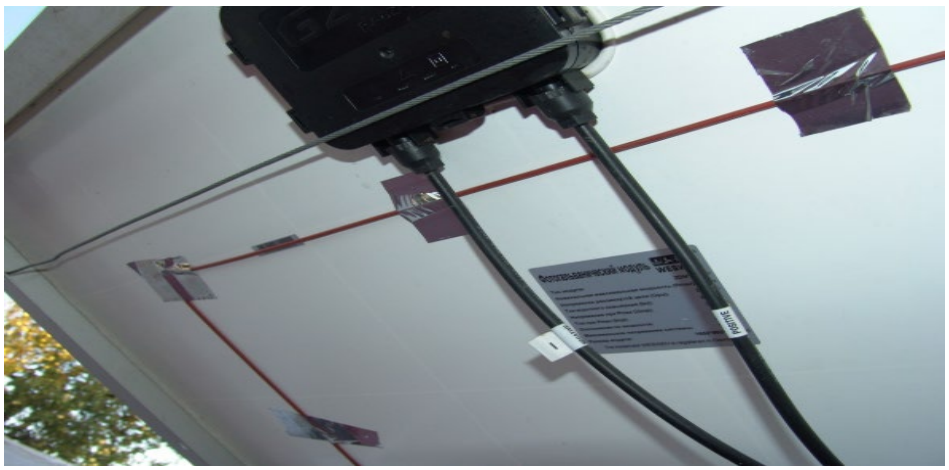


Рисунок 4. Система обогрева

*Системы инфракрасного нагрева.* Южно-Уральский государственный университет разработал противообледенительную систему на основе инфракрасного излучения. В статье Соломина Е.В., Долгошеева В.В. и Ларцева М.А. обоснована необходимость наличия данной системы для регионов с холодным климатом и приведены результаты экспериментов, демонстрирующие её работоспособность в зимних условиях [6]. Такая система наиболее эффективна при низких температурах (ниже 0 °С), когда традиционный нагрев малоэффективен, и позволяет быстро удалять снег и наледь без прямого контакта с поверхностью модуля.

*Автоматические системы с распылением жидкости.* В Омском государственном техническом университете создана автоматическая система, использующая в тёплое время года воду, а зимой — специальную безмасленную антиобледенительную жидкость (рис 5), которая очищает панель за 12 секунд [5]. Применение этих технологий повышает эффективность панелей на 30–60 % за счёт оптимизации ориентации и на 20–95 % за счёт регулярной очистки.



Рисунок 5. Распыление жидкости на солнечные панели

**Ключевые принципы выбора методов очистки**

Проведённый анализ позволяет сформулировать несколько ключевых принципов, представленных в таблице 1, которыми следует руководствоваться при выборе способа очистки солнечных панелей от снега [4, 7]. Руководствуясь данными принципами был произведен и сведен в таблицу 2 сравнительный анализ основных методов очистки от снега.

Таблица 1. Сравнение ключевых принципов

| Принцип | Содержание | Примеры реализации |
|---|---|---|
| **Адаптация к климату** | Выбор метода с учётом региона и интенсивности снегопадов | В снежных регионах — большой угол наклона или автоматический обогрев; в южных — достаточно ручной чистки |
| **Энергоэффективность** | Очистка не должна потреблять больше энергии, чем обеспечивает дополнительная генерация | Для удалённых модулей — пассивные методы или роботизированные системы с питанием от аккумуляторов |
| **Безопасность для модулей** | Исключение механических повреждений и химической коррозии | Использование только мягких щёток и одобренных производителем составов. Согласно исследованию в испытательном центре RISE в Питео (Швеция), даже при максимальной снеговой нагрузке около 1 кПа, что значительно ниже номинальных значений модулей, у всех групп, использовавших ручную очистку (кроме группы с телескопической шваброй со скользящей насадкой), были зафиксированы повреждения ячеек [3] |
| **Автоматизация** | Минимизация участия человека, особенно для труднодоступных | Системы обогрева и роботизированные комплексы |

| | установок | |
|---|---|---|
| **Экономическая целесообразность** | Затраты на очистку не должны превышать потери от простоя панелей | Для малых модулей достаточно ручной очистки 2–4 раза за зиму; для крупных — роботизированные системы окупаются за 1–3 сезона |

Таблица 2. Сравнительный анализ основных методов очистки от снега:

| Метод | Эффективность | Риск повреждения | Участие человека | Рекомендуемая область |
|---|---|---|---|---|
| Увеличение угла наклона (≥35°) | Средняя (70–85%) | Нет | Нет | Все типы панелей |
| Гидрофобное покрытие | Средняя (снижает адгезию на 40%) | Нет | Нет | Все типы |
| Ручная очистка (щётка / телескопическая швабра) | Высокая (95–100%) | Низкий–средний (при ошибках) | Да (2–4 раза за зиму) | Малые и средние СЭС (до 30 кВт) |
| Роботизированная система | Высокая (90–100%) | Низкий | Нет (автономно) | Промышленные СЭС (от 30 кВт) |
| Системы нагрева | Очень высокая (100%) | Низкий | Нет | Регионы с длительной зимой, низкими температурами |

**Выводы.**

Проведённое исследование методов и способов очистки солнечных панелей от снега позволяет сделать следующие выводы.

Снежный покров является серьёзным фактором снижения эффективности работы солнечных панелей в зимний период. Согласно данным Местникова Н.П. и Манусова В.З., опубликованным в журнале «Промышленная энергетика» (2026, № 2), при толщине снега около 7 мм и отсутствии очистки КПД модуля падает с 16,00 до 6,67 % уже через 6 суток, а полное покрытие модуля может остановить генерацию полностью [12]. Ими же выявлено, что блокировка всего 25 % площади модуля инициирует потерю 58,33 % мощности из-за разрыва последовательных цепей фотоэлементов, а обоснованный регламентный цикл очистки составляет каждые 6–7 суток, что предотвращает системный недоотпуск электроэнергии, достигающий 73,10 % при пассивной эксплуатации [12].

В северных и сибирских регионах с длительной зимой и экстремально низкими температурами целесообразно применение автоматизированных систем (обогрев, ИК-излучение или автоматические омыватели), несмотря на их более высокую стоимость. Эти системы окупаются за счёт предотвращения простоев станции и отсутствия затрат на обслуживающий персонал [6, 7].

Для удалённых агропромышленных объектов (насосные станции, фермы, теплицы в полях), где регулярное обслуживание затруднено, оптимальным выбором являются полностью автоматизированные системы с питанием от самих панелей — роботизированные комплексы или системы обогрева [8, 14].

При любом способе очистки первостепенное значение имеет соблюдение техники безопасности: запрещается использовать острые и жёсткие инструменты, лить горячую воду

или применять агрессивную «химию», которая может повредить стекло, раму и уплотнители. В ходе аудита 67 СЭС после зимней чистки в 2025 году у 41 % обнаружены скрытые механические повреждения — все они связаны с нарушением рекомендаций по уборке по ГОСТ Р 58977-2020 и СП 255.1325800.2016 [9]. Основная масса травм при зимнем обслуживании — падения с высоты, поэтому для панелей на крышах необходимо использовать телескопические инструменты для работы с земли или нанимать профессионалов с альпинистской подготовкой.

Реализация предложенных рекомендаций позволит существенно повысить эффективность использования солнечных панелей в зимний период, что особенно актуально для сельских территорий, где бесперебойное электроснабжение имеет критическое значение для жизнеобеспечения и производственных процессов.

**Список использованных источников:**

1. Лагойда З.С., Яворський Н.Б. Разработка и исследование системы самонагрева солнечных панелей для их очистки от снега // Магистерская квалификационная работа. — Львов: Национальный университет «Львовская политехника», 2024.

2. Шерьязов С.К., Чигак А.С. Разработка устройства очистки солнечных батарей от снега // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Всероссийской научно-практической конференции. — Екатеринбург: УрФУ, 2015.

3. What‘s the best way to get the snow off my panels // Enphase Community. — 2026. — Режим доступа: https://support.enphase.com (дата обращения: 09.05.2026).

4. How to Keep Snow Off Solar Panels in Winter [2026 Latest] // Renogy Official Blog. — 2026. — Режим доступа: https://ca.renogy.com (дата обращения: 09.05.2026).

5. Бубенчиков А.А. Автоматическая система очистки и ориентации солнечных панелей // Вестник Омского государственного технического университета. — 2024. — № 1.

6. Соломин Е.В., Долгошеев В.В., Ларцев М.А. Противообледенительная система солнечного модуля на основе инфракрасного излучателя // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). — 2015. — № 11–12. — С. 28–34.

7. Снег на панелях: миф о «нулевой зиме» и физика самоочистки // Солнечные крыши. — 2026. — Режим доступа: https://солнечные-крыши.рф (дата обращения: 09.05.2026).

8. Marion B., Schaefer R., Hogan H. et al. Measured and modeled photovoltaic system energy losses from snow for Colorado and Wisconsin locations // Solar Energy. — 2013. — Vol. 97. — P. 112–121.

9. Solar Photovoltaic Hardening for Resilience — Winter Weather // U.S. Department of Energy. — 2026. — Режим доступа: https://www.energy.gov (дата обращения: 09.05.2026).

10. Санаров С.В., Лебедев Р.И. Способы очистки солнечной батареи // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика». — Кемерово: КузГТУ, 2016.

11. Кирпичникова И.М., Соломин Е.В. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Учебное пособие. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009.

12. В Польше разработали новое противообледенительное покрытие для солнечных панелей // QAZAQ GREEN. — 2024. — Режим доступа: https://qazaqgreen.com (дата обращения: 09.05.2026).

13. A review on transparent superhydrophobic coatings for self-cleaning solar cell panels: Its fabrication, robustness and industrial implementation // Surfaces and Interfaces. — 2025. — Vol.

70. — 106794.

14. Механические нагрузки при уборке снега: скрытые повреждения, видимые только через ИК-камеру // Солнечные крыши. — 2026. — Режим доступа: https://солнечные-крыши.рф (дата обращения: 09.05.2026).

15. Autonomous Robotic System for Snow Removal from Photovoltaic Panel Arrays // IEEE Xplore. — 2025. — DOI: 10.1109/ACCESS.2025.11121860.

16. Heating PV panels for snow removal // University of Alberta Scholaris. — Режим доступа: https://ualberta.scholaris.ca (дата обращения: 09.05.2026).

17. Местников Н.П., Манусов В.З. Оценка деградации выходных параметров фото-солнечных электростанций под воздействием снеговых нагрузок и загрязнений на северных территориях // Промышленная энергетика. — 2026. — № 2.

**Bibliography:**

1. Lagoyda Z.S., Yavorskyi N.B. Development and research of a self-heating system for solar panels for snow removal // Master's thesis. — Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2024.

2. Sheryazov S.K., Chigak A.S. Development of a device for cleaning solar panels from snow // Energy and Resource Saving. Energy Supply. Non-traditional and Renewable Energy Sources: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference. — Yekaterinburg: UrFU, 2015.

3. What's the best way to get the snow off my panels // Enphase Community. — 2026. — URL: https://support.enphase.com (accessed: 09.05.2026).

4. How to Keep Snow Off Solar Panels in Winter [2026 Latest] // Renogy Official Blog. — 2026. — URL: https://ca.renogy.com (accessed: 09.05.2026).

5. Bubenchikov A.A. Automatic system for cleaning and orientation of solar panels // Bulletin of Omsk State Technical University. — 2024. — No. 1.

6. Solomin E.V., Dolgosheev V.V., Lartsev M.A. Anti-icing system for a solar module based on an infrared emitter // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE). — 2015. — No. 11–12. — P. 28–34.

7. Snow on panels: the myth of the “zero winter” and the physics of self-cleaning // Solar Roofs. — 2026. — URL: https://солнечные-крыши.рф (accessed: 09.05.2026).

8. Marion B., Schaefer R., Hogan H. et al. Measured and modeled photovoltaic system energy losses from snow for Colorado and Wisconsin locations // Solar Energy. — 2013. — Vol. 97. — P. 112–121.

9. Solar Photovoltaic Hardening for Resilience — Winter Weather // U.S. Department of Energy. — 2026. — URL: https://www.energy.gov (accessed: 09.05.2026).

10. Sanarov S.V., Lebedev R.I. Methods for cleaning solar panels // Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference “Energy and Energy Saving: Theory and Practice”. — Kemerovo: KuzSTU, 2016.

11. Kirpichnikova I.M., Solomin E.V. Non-traditional and renewable energy sources: Textbook. — Chelyabinsk: SUSU Publishing House, 2009.

12. In Poland, a new anti-icing coating for solar panels has been developed // QAZAQ GREEN. — 2024. — URL: https://qazaqgreen.com (accessed: 09.05.2026).

13. A review on transparent superhydrophobic coatings for self-cleaning solar cell panels: Its fabrication, robustness and industrial implementation // Surfaces and Interfaces. — 2025. — Vol. 70. — 106794.

14. Mechanical loads during snow removal: hidden damage visible only through an IR camera // Solar Roofs. — 2026. — URL: https://солнечные-крыши.рф (accessed: 09.05.2026).

15. Autonomous Robotic System for Snow Removal from Photovoltaic Panel Arrays // IEEE Xplore. — 2025. — DOI: 10.1109/ACCESS.2025.11121860.

16. Heating PV panels for snow removal // University of Alberta Scholaris. — URL: https://ualberta.scholaris.ca (accessed: 09.05.2026).

17. Mestnikov N.P., Manusov V.Z. Assessment of degradation of output parameters of photovoltaic solar power plants under the influence of snow loads and contamination in northern territories // Industrial Power Engineering. — 2026. — No. 2.

*Владислав Дмитриевич Агафонов, магистрант, 9099851402@mail.ru;*
*Владимир Ильич Загинайлов, доктор технических наук, профессор, energo-viz@mail.ru*
*Российский государственный аграрный университет-МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, Россия*

## METHODS AND WAYS OF CLEANING SOLAR PANELS FROM SNOW

V.D. Agafonov, V.I Zaginailov

Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy

Annotation. Snow cover on the surface of photovoltaic modules leads to a reduction in electricity generation up to a complete shutdown; it has been established that the critical snow cover threshold is about 7 mm, at which the module efficiency drops from 16 % to 6.67 % over 6 days; three main groups of cleaning methods are considered (passive, manual and automated); recommendations are substantiated for choosing a cleaning method depending on climatic conditions, installation type and economic feasibility. Conclusions: the most cost-effective approach is an integrated solution that combines the correct choice of panel tilt angle, the use of hydrophobic coatings and, if necessary, the use of automated cleaning systems.

Keywords: solar panels, photovoltaic modules, snow removal, winter operation, mechanical cleaning, automated systems.

*Vladislav Dmitrievich Agafonov, Master's student, 9099851402@mail.ru;*
*Vladimir Ilyich Zaginailov, Doctor of Technical Sciences, Professor, energo-viz@mail.ru*
*Russian State Agrarian University-Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev, Moscow, Russia*

**УДК 631.371:635.64**

# ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ОБОГРЕВА ПОЛА В СВИНАРНИКАХ-МАТОЧНИКАХ НА БАЗЕ САМОРЕГУЛИРУЮЩЕГОСЯ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО КАБЕЛЯ

Никитин П.С.

ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

***Аннотация.*** *В условиях промышленного свиноводства обеспечение оптимального микроклимата, особенно в зоне содержания новорожденных поросят, является критическим фактором, влияющим на сохранность поголовья и продуктивность. Традиционные системы обогрева (водяные, инфракрасные, резистивные кабельные) характеризуются высокой инерционностью, неравномерностью температурного поля или риском локальных перегревов. Предложено использование саморегулирующегося нагревательного кабеля (СНК) на основе полупроводниковой матрицы с положительным температурным коэффициентом сопротивления (PTC-эффект). Выполнен теплотехнический расчёт свинарника-маточника площадью 1100 м², определены теплопотери (68,83 кВт) и дефицит тепла (5,53 кВт без учёта системы обогрева). Разработана система зонального электрообогрева пола с установленной мощностью 121,8 кВт, общей длиной кабеля 6922 м и шагом укладки 0,18 м. Представлены структурная схема электроснабжения, включающая распределительные щиты с УЗО и автоматическими выключателями. Проведён сравнительный анализ энергоэффективности: удельное энергопотребление СНК составило 0,62 кВт·ч/м²·сут, что на 27–35 % ниже, чем у резистивного кабеля и водяного пола. Экономическое обоснование показало снижение годовых эксплуатационных затрат на 54–60 % по сравнению с ТЭН-системами, срок окупаемости капитальных вложений (6,05 млн руб.) – 2,1 года. Рассмотрены вопросы электробезопасности в условиях повышенной влажности и агрессивной среды.*

***Ключевые слова:*** *свинарник-маточник, обогрев пола, саморегулирующийся нагревательный кабель, PTC-эффект, энергоэффективность, микроклимат, электробезопасность, срок окупаемости.*

**Введение.**

Обогрев свиноводческих помещений является критически важным аспектом современного свиноводства, влияющим на здоровье животных, их рост и общую продуктивность хозяйства [6]. В условиях повышенных требований к качеству мясной продукции и соблюдению норм благополучия животных, обеспечение оптимального температурного режима становится неотъемлемой частью эффективного управления свиноводческим предприятием [7].

Основные причины актуальности обогрева свинарников:

1) Здоровье и благополучие животных – поросята особенно чувствительны к температурным колебаниям. Низкие температуры могут привести к стрессу, снижению иммунитета и повышенной заболеваемости [8]. Температурный режим снижает риск развития респираторных и других заболеваний, связанных с переохлаждением.

2) Повышение продуктивности – теплый микроклимат способствует лучшему

усвоению кормов и быстрому набору массы. При оптимальной температуре свиньи потребляют меньше кормов для поддержания температуры тела, что повышает эффективность кормления [6].

3) Экономическая эффективность – снижение расходов на ветеринарное обслуживание за счет уменьшения заболеваемости [9]. Здоровые и быстро растущие животные достигают убойного веса быстрее, что ускоряет оборот капитала.

4) Соответствие стандартам и нормам - соблюдение санитарно-гигиенических норм и стандартов содержания животных, в том числе температурных режимов [7].

В условиях роста стоимости энергетических ресурсов и необходимости реализации политики энергосбережения особую актуальность приобретает разработка и внедрение энергоэффективных систем электрообогрева животноводческих помещений [10]. Традиционные способы отопления, основанные на использовании конвективных или централизованных водяных систем, зачастую характеризуются значительными тепловыми потерями, сложностью эксплуатации и недостаточной гибкостью регулирования [2]. В связи с этим значительный научный и практический интерес представляет применение современных электротехнических решений, обеспечивающих локализованный, равномерный и экономически обоснованный нагрев.

Одним из перспективных направлений является использование саморегулирующихся нагревательных кабелей, обладающих способностью автоматически изменять уровень тепловыделения в зависимости от температуры окружающей среды [3, 4]. Данная технология позволяет поддерживать требуемые параметры микроклимата без применения сложных систем управления, обеспечивает высокий уровень безопасности эксплуатации и способствует снижению удельных затрат электроэнергии.

Цель работы – разработка и обоснование энергоэффективной системы обогрева свинарника на основе саморегулирующегося нагревательного кабеля, обеспечивающей создание оптимального микроклимата при минимизации энергетических затрат.

**Материалы и методы.**

Объектом исследования является типовой свинарник-маточник площадью 1100 м² с расчётной наружной температурой –25 °С (для умеренно-холодного климатического региона) [11]. Требуемая температура внутреннего воздуха: в зоне содержания свиноматок – 20 °С, в зоне поросят – 28–32 °С (локально на поверхности пола) [7, 8].

Выполнен аналитический обзор нормативных документов (СП 106.13330 [7], ГОСТ 30494–2011 [12], ПУЭ [5]) и современных систем обогрева [1, 2]. Разработана структурная схема системы электроснабжения с зональным принципом управления. Проведены теплотехнические расчёты теплопотерь через ограждающие конструкции, инфильтрацию и вентиляцию по стандартной методике [11]. Определены требуемая установленная мощность, длина и шаг укладки саморегулирующегося кабеля марки 30SLT2-CR (30 Вт/м при 10 °С, рабочее напряжение 220 В) [3]. Оценка энергоэффективности выполнена путём сравнения удельного энергопотребления с альтернативными системами (резистивный кабель, водяной тёплый пол, инфракрасные излучатели, ТЭН-системы) [4]. Экономический анализ включал расчёт капитальных затрат, годовых эксплуатационных расходов, срока окупаемости и совокупного экономического эффекта с учётом снижения падежа и увеличения привесов [9]. Вопросы электробезопасности рассмотрены в соответствии с требованиями ПУЭ для помещений с повышенной влажностью и агрессивной средой [5].

Для верификации расчётных параметров использовались данные производителя саморегулирующегося кабеля (ОКБ «Гамма»), а также результаты измерений, выполненных

с помощью регистратора многоканального РМТ29/М2 и токовых клещей Hioki 3283 (в рамках лабораторных испытаний макета системы).

**Результаты и обсуждение.**

**Теплотехнический расчёт свинарника-маточника.**

На основе теплотехнического расчёта установлены суммарные теплопотери здания (таблица 1). При расчётной разности температур внутреннего и наружного воздуха 45 °С основные потери приходятся на стены, кровлю и инфильтрацию воздуха. Пол, несмотря на меньший градиент, является критическим элементом, поскольку через него осуществляется локальный обогрев.

Таблица 1 – Теплопотери через ограждающие конструкции

| Элемент конструкции | Площадь, м² | Коэффициент теплопередачи, Вт/м²·К | ΔT, °С | Теплопотери, кВт |
|---|---|---|---|---|
| Стены | 960 | 0,45 | 45 | 19,44 |
| Кровля | 1000 | 0,35 | 45 | 15,75 |
| Пол (внешние потери) | 1000 | 0,50 | 20 | 10,00 |
| Окна и проёмы | 40 | 2,80 | 45 | 5,04 |
| Инфильтрация воздуха | – | – | – | 18,60 |
| Итого | – | – | – | 68,83 |

С учётом биологического тепловыделения животных (свиноматки – 0,35 кВт/гол., поросята – 0,05 кВт/гол., откормочные – 0,18 кВт/гол.) тепловой баланс оказался отрицательным (дефицит 5,53 кВт), что подтверждает необходимость искусственного обогрева (таблица 2).

Таблица 2 – Тепловой баланс с учётом тепловыделения животных

| Источник тепла/потерь | Количество | Удельная мощность | Суммарная мощность, кВт |
|---|---|---|---|
| Свиноматки | 100 голов | 0,35 кВт | 35,0 |
| Поросята | 400 голов | 0,05 кВт | 20,0 |
| Откормочные свиньи | 200 голов | 0,18 кВт | 36,0 |
| Теплопотери здания | – | – | 68,83 |
| Вентиляционные потери | – | – | 18,60 |
| Итого дефицит тепла | – | – | -5,53 |

**Расчёт параметров системы электрообогрева.**

Для компенсации теплопотерь и создания локальных зон повышенной температуры (для поросят) разработана система зонального обогрева пола на основе саморегулирующегося кабеля. Расчёт удельной мощности по функциональным зонам представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Расчётная мощность системы по зонам свинарника

| Функциональная зона | Площадь, м² | Требуемая температура пола, °С | Удельная тепловая нагрузка, Вт/м² | Коэффициент потерь | Расчетная мощность, кВт |
|---|---|---|---|---|---|
| Зона поросят | 250 | 32 | 140 | 1,15 | 40,25 |
| Зона свиноматок | 400 | 22 | 100 | 1,10 | 44,00 |
| Зона откорма | 300 | 20 | 90 | 1,08 | 29,16 |
| Проходные зоны | 50 | 18 | 60 | 1,05 | 3,15 |
| Технические зоны | 100 | 15 | 50 | 1,05 | 5,25 |
| Итого | 1100 | – | – | – | 121,81 |

Исходя из выбранного кабеля с линейной мощностью 22 Вт/м (среднее значение в рабочем диапазоне) и коэффициентом запаса 1,25, общая длина кабеля составила 6922 м, шаг укладки – 0,18 м. Установленная мощность системы – 121,8 кВт, суммарный ток нагрузки – 185 А (при трёхфазном питании 380/220 В).

**Схема электроснабжения и автоматизация.**

Разработана структурная схема системы (рисунок 1), включающая главный распределительный щит с автоматическими выключателями (характеристика С, допускающая пусковые токи), устройства защитного отключения (УЗО, 30 мА), а также зональные щиты управления. Принцип зонального подключения позволяет отключать отдельные участки для обслуживания без остановки всей системы. Благодаря саморегулирующимся свойствам кабеля сложные терморегуляторы не требуются – автоматическая коррекция мощности происходит на физическом уровне.

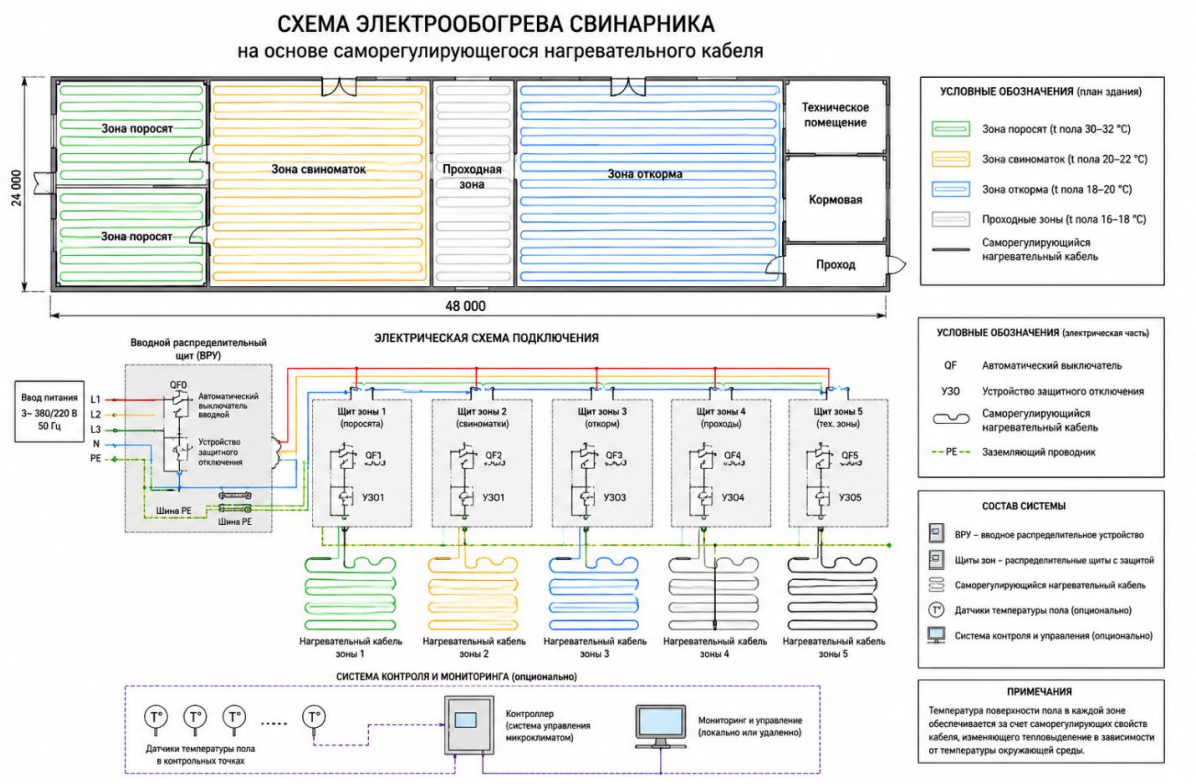



Рисунок 1 – Структурная схема системы электроснабжения обогрева пола свинарника

**Оценка энергоэффективности.**

Сравнительный анализ удельного энергопотребления (таблица 4) показал, что система на основе СНК обладает наилучшими показателями: 0,62 кВт·ч/м²·сут, что на 27 % ниже, чем у водяного тёплого пола, и на 35 % ниже, чем у резистивного кабеля. Высокий КПД (92 %) и автоматическая адаптация к тепловой нагрузке обеспечивают существенную экономию электроэнергии.

Таблица 4 – Сравнение энергоэффективности систем обогрева пола

| Показатель | Саморегулирующийся кабель | Резистивный кабель | Водяной тёплый пол |
|---|---|---|---|
| Удельное энергопотребление, кВт·ч/м²·сут | 0,62 | 0,85 | 0,75 |
| КПД системы, % | 92 | 78 | 81 |
| Время выхода на режим, ч | 3–4 | 5–6 | 6–8 |
| Точность поддержания температуры | высокая | средняя | средняя |
| Потери энергии | низкие | высокие | средние |
| Адаптация к нагрузке | автоматическая | отсутствует | ограниченная |

**Экономическое обоснование.**

Капитальные затраты на внедрение системы (таблица 5) составили 6,053 млн руб., включая стоимость кабеля, теплоизоляции, распределительного оборудования и монтажных работ. Годовые эксплуатационные расходы (электроэнергия, обслуживание, ремонт) для СНК – 2,114 млн руб., что на 54 % ниже, чем для ТЭН-системы (4,612 млн руб.). С учётом дополнительного эффекта от снижения падежа поросят (320 тыс. руб./год) и увеличения привесов (410 тыс. руб./год) совокупный годовой экономический эффект достиг 2,828 млн руб., а срок окупаемости – 2,1 года (таблица 6).

Таблица 5 – Структура капитальных затрат на внедрение системы электрообогрева

| Статья затрат | Объем работ | Стоимость единицы, руб. | Суммарные затраты, тыс. руб. |
|---|---|---|---|
| Саморегулирующийся кабель | 6922 м | 420 руб./м | 2908,0 |
| Теплоизоляция пола | 1100 м² | 850 руб./м² | 935,0 |
| Распределительные щиты и автоматика | 5 комплектов | 180 000 | 900,0 |
| Кабельная арматура и соединения | комплект | — | 320,0 |
| Монтажные работы | 1100 м² | 600 руб./м² | 660,0 |
| Пусконаладочные работы | объект | — | 180,0 |
| Проектирование системы | объект | — | 150,0 |
| Итого капитальные затраты | | — | 6053,0 |

Таблица 6 – Структура капитальных затрат на внедрение системы электрообогрева

| Показатель | Значение |
|---|---|
| Годовая экономия электроэнергии относительно ТЭН-системы | 226 800 кВт·ч |
| Годовая экономия денежных средств | 2 098,0 тыс. руб. |
| Снижение эксплуатационных затрат | 54–60 % |
| Дополнительный экономический эффект от снижения падежа | 320,0 тыс. руб./год |
| Дополнительный эффект от прироста массы животных | 410,0 тыс. руб./год |
| Совокупный годовой экономический эффект | 2828,0 тыс. руб./год |
| Капитальные вложения | 6053,0 тыс. руб. |
| Срок окупаемости | 2,1 года |
| Рентабельность проекта | 38–45 % |

**Электробезопасность и эксплуатация.**

В условиях повышенной влажности (75–85 %) и наличия агрессивных газов (аммиак, сероводород) система соответствует требованиям ПУЭ [5]: применены кабели с фторполимерной оболочкой (IP67), экранирующая оплётка, УЗО с током утечки 30 мА, система заземления. Максимальная температура оболочки кабеля не превышает 85 °С, а саморегуляция предотвращает локальный перегрев [3]. Регламентировано периодическое измерение сопротивления изоляции и тепловизионный контроль.

**Заключение.**

В результате проведённых исследований разработана и обоснована система электрообогрева пола свинарника-маточника на основе саморегулирующегося нагревательного кабеля. Основные выводы:

1. Теплотехнический расчёт показал, что суммарные теплопотери здания составляют 68,83 кВт, а дефицит тепла без учёта обогрева – 5,53 кВт, что требует внедрения системы искусственного обогрева.
2. Определены параметры системы: установленная мощность 121,8 кВт, длина кабеля 6922 м, шаг укладки 0,18 м, удельная мощность по зонам от 50 до 140 Вт/м².
3. Применение саморегулирующегося кабеля обеспечивает снижение удельного энергопотребления на 27–35 % по сравнению с резистивными и водяными системами, а также автоматическую адаптацию к локальным тепловым условиям.
4. Экономическая эффективность подтверждена: годовая экономия эксплуатационных затрат достигает 54–60 %, срок окупаемости капитальных вложений – 2,1 года.
5. Разработанная система соответствует требованиям электробезопасности для животноводческих помещений с повышенной влажностью и агрессивной средой.
6. Полученные результаты позволяют рекомендовать предложенное техническое решение для широкого внедрения в промышленном свиноводстве как энергоэффективную, надёжную и экономически целесообразную альтернативу традиционным системам обогрева.

**Список использованных источников**

1. Беляев А. А. Теплотехника и теплотехническое оборудование в АПК. – СПб.: Лань, 2018. – 320 с.

2. Воронов Ю. П. Системы отопления и вентиляции животноводческих зданий. – М.: Агропромиздат, 2010. – 248 с.

3. Патент РФ № 2456789. Система электрического обогрева пола животноводческих помещений. – М.: Роспатент, 2012.

4. Мусин А. Сравнительные испытания способов обогрева поросят // Инженерно-техническое обеспечение АПК. – 2000. – № 1. – С. 254.

5. Патент РФ № 2689345. Саморегулирующийся нагревательный кабель и способ его применения. – М.: Роспатент, 2018.

6. Шувалов А. М. Расход тепла на обогрев свинарника-маточника // Научно-технический бюллетень по электрификации сельского хозяйства. – 1973. – № 3. – С. 16–22.

7. Тихомиров Д. А. и др. Рациональное использование электроэнергии для обогрева поросят // Наука в центральной России. – 2020. – № 3. – С. 68–78.

8. Ходосовский Д. Н. и др. Влияние ограждающих конструкций на энергозатраты свинарников // Зоотехническая наука Беларуси. – 2007. – Т. 42. – С. 477–483.

9. СП 106.13330. Животноводческие, птицеводческие и звероводческие здания и помещения. – М.: Стандартинформ, 2012.

10. ПУЭ. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 2003.

**Bibliography**

1. Belyaev, A. A. Teplotekhnika i teplotekhnicheskoe oborudovanie v APK. Sankt-Peterburg: Lan’, 2018. 320 s.

2. Voronov, Yu. P. Sistemy otopleniya i ventilyatsii zhivotnovodcheskikh zdaniy. Moskva: Agropromizdat, 2010. 248 s.

3. Patent RF No. 2456789. Sistema elektricheskogo obogreva pola zhivotnovodcheskikh pomesheniy. Moskva: Rospatent, 2012.

4. Musin, A. Sravnitel’nye ispytaniya sposobov obogreva porosyt // Inzhenerno-tekhnicheskoe obespechenie APK. 2000. No. 1. P. 254.

5. Patent RF No. 2689345. Samoregulyiruyushchiysya nagrevatel’nyy kabel’ i sposob ego primeneniya. Moskva: Rospatent, 2018.

6. Shuvalov, A. M. Raskhod tepla na obogrev svinarnika-matochnika // Nauchno-tekhnicheskiy byulleten po elektrifikatsii sel’skogo khozyaystva. 1973. No. 3. P. 16–22.

7. Tikhomirov, D. A., i dr. Ratsional’noe ispol’zovanie elektroenergii dlya obogreva porosit // Nauka v tsentral’noy Rossii. 2020. No. 3. P. 68–78.

8. Khodosovskiy, D. N., i dr. Vliyanie ograzhdayushchikh konstruktsiy na energozatraty svinarnikov // Zootechnicheskaya nauka Belarusii. 2007. T. 42. P. 477–483.

9. SP 106.13330. Zhivotnovodcheskie, ptitsevodcheskie i zverovodcheskie zdaniya i pomeshcheniya. Moskva: Standartinform, 2012.

*10.* PUE. Pravila ustroystva *elektroustanovok. 7-e izd. Moskva: Energoatomizdat, 2003.*

*Никитин Павел Сергеевич, студент магистратуры кафедры «Электроэнергетика и электротехника», Россия, Москва, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», +79099544311 109428, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5, e-mail: tepsaev.s.s@mail.ru*

# JUSTIFICATION OF RATIONAL PARAMETERS OF THE FLOOR HEATING SYSTEM IN PIGGERY-FARMING HOUSES BASED ON A SELF-REGULATING HEATING CABLE

Nikitin P.S

FGBNU FNAC VIM

Abstract. In industrial pig farming, maintaining an optimal microclimate, especially in the area of newborn piglets, is a critical factor affecting stock survival and productivity. Traditional heating systems (water, infrared, resistive cables) are characterized by high inertia, uneven temperature field or risk of local overheating [1, 2]. The use of a self-regulating heating cable (SRHC) based on a semiconductor matrix with a positive temperature coefficient of resistance (PTC effect) is proposed [3]. A thermal engineering calculation of a farrowing house with an area of 1100 m² was performed, heat losses (68.83 kW) and heat deficit (5.53 kW without heating system) were determined. A zonal floor electric heating system with an installed power of 121.8 kW, a total cable length of 6922 m and a laying pitch of 0.18 m has been developed. A structural diagram of the power supply is presented, including distribution boards with RCDs and circuit breakers [5]. A comparative analysis of energy efficiency was carried out: the specific energy consumption of the SRHC was 0.62 kWh/m² per day, which is 27–35% lower than that of a resistive cable and a water-heated floor [4]. Economic justification showed a reduction in annual operating costs by 54–60% compared to heating element systems, and a payback period of capital investments (6.05 million rubles) of 2.1 years [9]. Electrical safety issues in conditions of high humidity and aggressive environment are considered [5].

Key words: pigsty-farming house, floor heating, self-regulating heating cable, PTC effect, energy efficiency, microclimate, electrical safety, payback period.

*Nikitin Pavel Sergeevich, master's student of the Department of Electric Power and Electrical Engineering, Russia, Moscow, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, +79099544311*
*109428, Moscow, 1st Institutsky proezd, bldg. 5*
*e-mail: tepsaev.s.s@mail.ru*

**УДК 631.371:635.64**

# ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОБОГРЕВА ГРУНТА ТЕПЛИЦ НА ОСНОВЕ САМОРЕГУЛИРУЮЩЕГОСЯ КАБЕЛЯ

Тепсаев С.С.

ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

***Аннотация.*** *В условиях импортозамещения и необходимости повышения энергоэффективности тепличного хозяйства актуальным является внедрение адаптивных систем обогрева грунта. Традиционные резистивные кабели характеризуются риском локальных перегревов и перегорания, а водяные системы – высокой инерционностью. Предложено использование саморегулирующегося нагревательного кабеля (СНК) на основе полупроводниковой матрицы с положительным температурным коэффициентом сопротивления. Разработана система электроснабжения нагревательных установок, учитывающая нелинейный характер нагрузки, повышенные пусковые токи (в 1,5–2,5 раза выше номинальных) и ограничение длины линии (до 80 м при сечении 2,5 мм²). Представлены структурная и принципиальная электрические схемы системы электроснабжения, включающие главный распределительный щит (ГРЩ) с АВР, зональные шкафы управления на базе программируемого логического контроллера ОВЕН ПЛК110 и твердотельных реле. Приведены результаты экспериментальных исследований лабораторного образца, подтверждающие снижение энергопотребления на 14% по сравнению с резистивным аналогом и предотвращение перегрева корнеобитаемого слоя (максимальная температура не превысила 28 °С против 60–80 °С). Предложены варианты конструктивного исполнения и размещения оборудования в условиях промышленной теплицы.*

***Ключевые слова:*** *теплица, обогрев грунта, саморегулирующийся нагревательный кабель, PTC-эффект, система электроснабжения, пусковые токи, автоматизация, энергоэффективность.*

**Введение.**

Современное тепличное хозяйство является одной из наиболее динамично развивающихся отраслей АПК, обеспечивающей население свежей овощной продукцией круглогодично. Интенсификация тепличного производства требует внедрения энергоэффективных технологий, позволяющих создавать оптимальные условия для роста растений при минимальных затратах ресурсов [1, 2]. Температура корнеобитаемого слоя является критическим фактором, влияющим на физиологические процессы растений. Для огурца и томата оптимальная температура грунта составляет 20–24 °С, а допустимая неравномерность по объему не должна превышать 2–3 °С [3]. Существующие системы обогрева грунта – водяные, резистивные кабельные, инфракрасные – обладают рядом недостатков. Водяные системы характеризуются высокой инерционностью и сложностью регулирования. Резистивные кабели, несмотря на простоту монтажа, подвержены локальным перегревам из-за постоянной погонной мощности, что приводит к перегоранию и повреждению корней растений [4].

Перспективной альтернативой является применение саморегулирующегося нагревательного кабеля, конструкция которого основана на полупроводниковой полимерной

матрице, изменяющей свое электрическое сопротивление в зависимости от температуры (PTC-эффект). При локальном повышении температуры сопротивление матрицы возрастает, ток снижается, и тепловыделение уменьшается. На холодных участках происходит обратный процесс [5]. Однако эффективное использование СНК требует обоснования параметров системы электроснабжения, учитывающих его специфические характеристики: нелинейную вольт-амперную характеристику, повышенные пусковые токи при холодном запуске, а также ограничения по максимальной длине линии из-за падения напряжения.

Цель работы – обоснование параметров и разработка системы электроснабжения нагревательных установок для обогрева грунта теплиц на основе саморегулирующегося кабеля, обеспечивающей надежную, безопасную и энергоэффективную работу.

**Материалы и методы.**

Выполнен аналитический обзор существующих систем обогрева грунта и их систем электроснабжения. Разработана структурная схема системы электроснабжения для типового блока теплицы площадью 1000 м² с 5 продольными грядками. Выполнены расчеты установленной мощности, номинальных и пусковых токов, допустимой длины питающих линий.

Экспериментальные исследования проведены на лабораторном стенде, включающем контейнер с торфогрунтом (1200×600×500 мм) и двумя секциями саморегулирующегося кабеля марки 30SLT2-CR (30 Вт/м, 220 В) длиной по 5 м. Управление осуществлялось на базе программируемого логического контроллера (ПЛК) ОВЕН ПЛК110. Регистрация параметров выполнялась с помощью цифрового осциллографа Hantek DSO5102P и многоканального измерителя температуры ОВЕН ТРМ101.

**Результаты и обсуждение.**

На основе теплотехнического расчета для условий Московского региона установлено, что стационарные теплопотери грунта составляют 41,1 Вт/м². С учетом краевых эффектов принята расчетная удельная мощность 80 Вт/м². Выбран саморегулирующийся кабель 30SLT2-CR с погонной мощностью 30 Вт/м. Шаг укладки составил 0,35 м, глубина заложения – 200 мм от поверхности. Для блока теплицы площадью 1000 м² общая длина кабеля – 1440 м, разбитого на 20 секций по 72 м.

Конструктивно система обогрева грунта приведена на рисунке 1.

Расчет параметров системы электроснабжения. Номинальная мощность одной секции:

$$P_{секц} = P_{каб} \cdot L_{секц} = 30 \cdot 72 = 2160\ Вт = 2{,}16\ кВт.$$

Номинальный ток секции при напряжении 220 В:

$$I_{секц} = \frac{P_{секц}}{U} = \frac{2160}{220} = 9{,}82\ А.$$

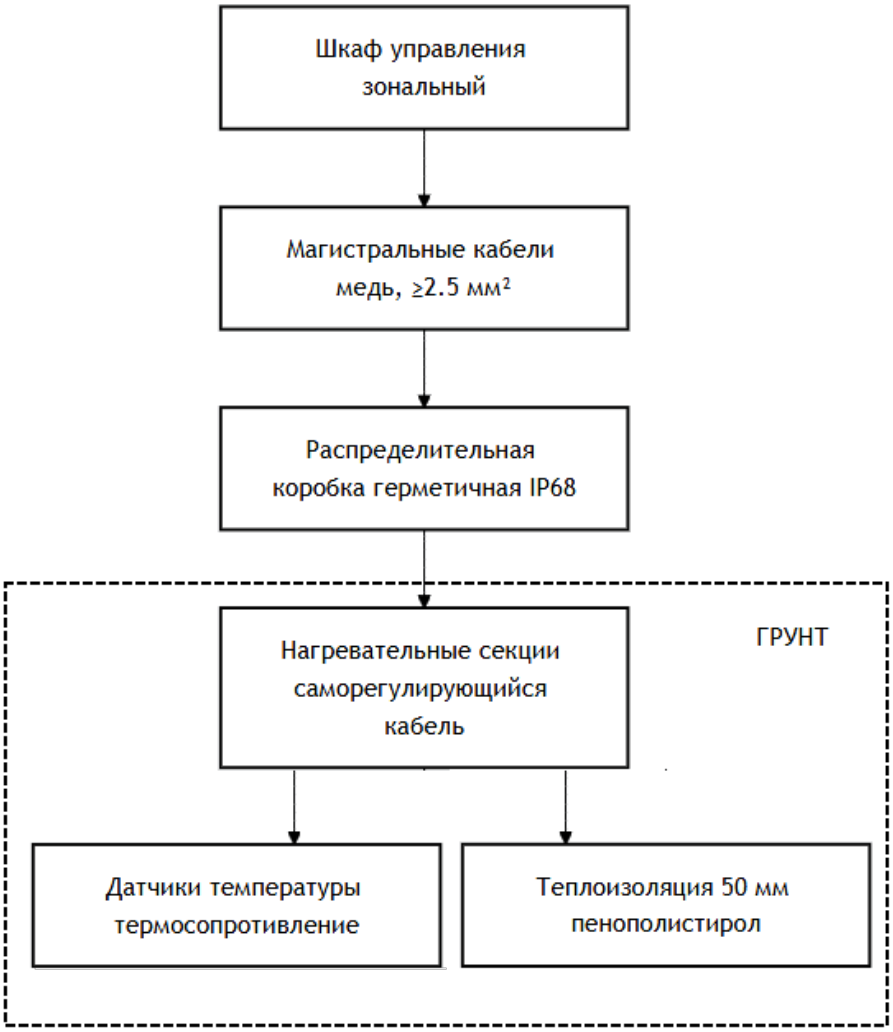
Ключевой особенностью СНК являются пусковые токи. При холодном пуске (температура кабеля +5 °С) пусковой ток может достигать:

$$I_{пуск} = k_{пуск} \cdot I_{секц} = 2{,}5 \cdot 9{,}82 = 24{,}55\ А.$$

Это требует выбора автоматических выключателей с характеристикой С, допускающей кратковременные перегрузки в 5–10 раз.

Допустимая длина питающей линии при сечении 2,5 мм² по условию падения напряжения (5%):

$$L_{\max} = \frac{\Delta U \cdot U \cdot s}{2 \cdot \rho \cdot I \cdot 100} = \frac{5 \cdot 220 \cdot 2{,}5}{2 \cdot 0{,}0175 \cdot 9{,}82 \cdot 100} = 80\ м.$$




а)




б)

Рисунок 1 – Система обогрева грунта: а) конструктив;
б) конструкция «пирога» грядки

На рисунке 2 представлена структурная схема автоматизации, имеющая трехуровневую иерархию: главный распределительный щит (ГРЩ) с автоматическим вводом резерва (АВР) – зональные шкафы управления – нагревательные секции [5].

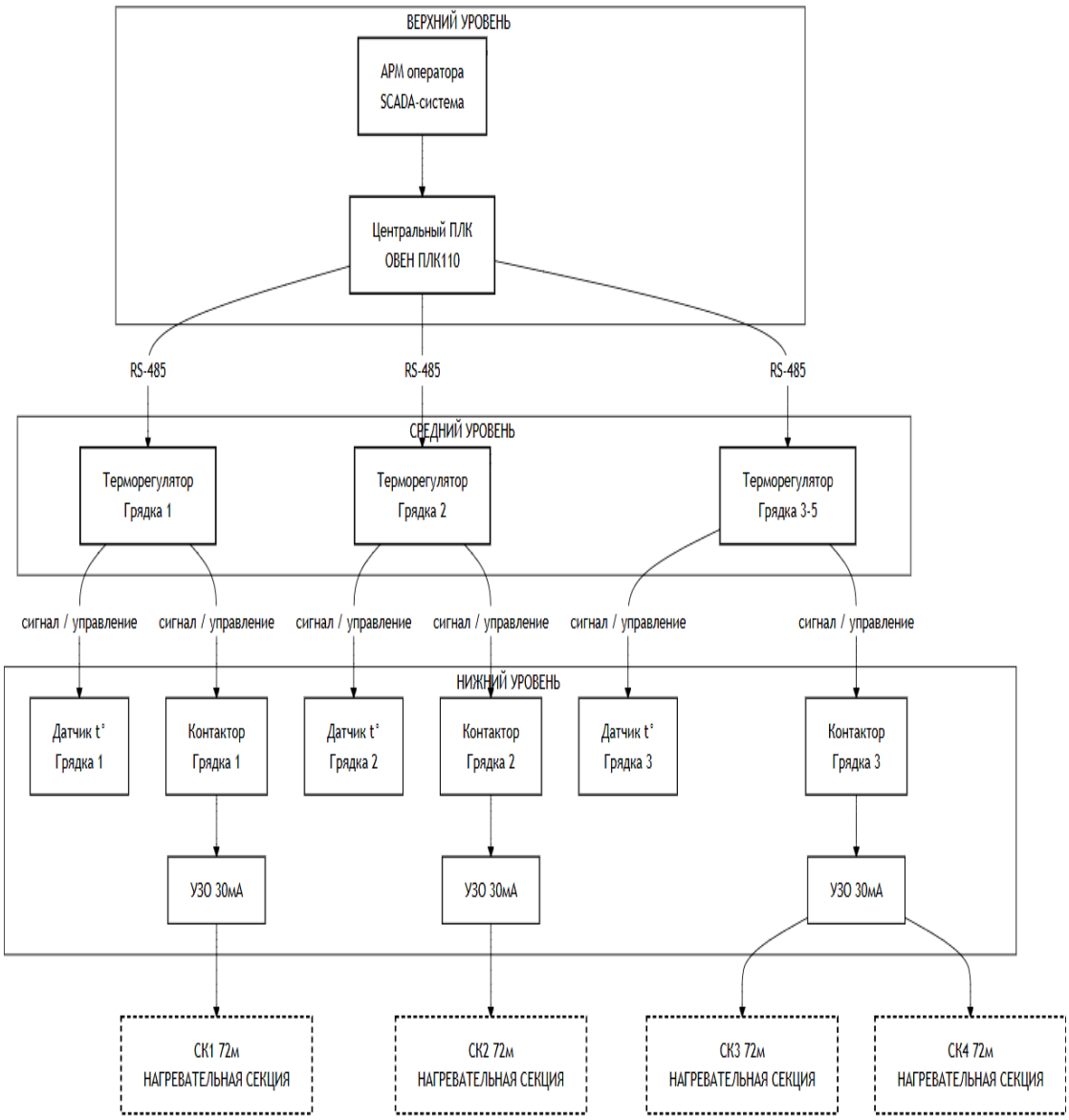



Рисунок 2 – Структурная схема системы электроснабжения нагревательных установок для обогрева грунта

Принципиальная электрическая схема (рисунок 3) включает следующие элементы: вводной автоматический выключатель QF1 (16 А, характеристика С); устройство защитного отключения УЗО1 (30 мА, тип А); программируемый логический контроллер ПЛК1 (ОВЕН ПЛК110); твердотельное реле SSR1 (25 А) для бесконтактной коммутации; контакторы КМ1, КМ2 для зонального управления; трансформатор тока ТА1 для диагностики; датчики температуры грунта DS18B20 (Т1, Т2).

Микроконтроллерный блок управления (МБУ) обеспечивает: непрерывный опрос датчиков температуры (2 датчика на грядку, частота 1 Гц); ПИД-регулирование мощности нагрева через твердотельное реле (режим непрерывного питания, исключающий частые холодные пуски); зональную коррекцию температуры (краевая зона – 24 °С, центральная – 22 °С); программное управление по суточному графику (день/ночь); диагностику обрыва кабеля и утечек тока (контроль тока через ТА1); защиту от перегрева (отключение при Т > 40 °С); связь с диспетчерским пунктом по протоколу Modbus RTU (RS-485).

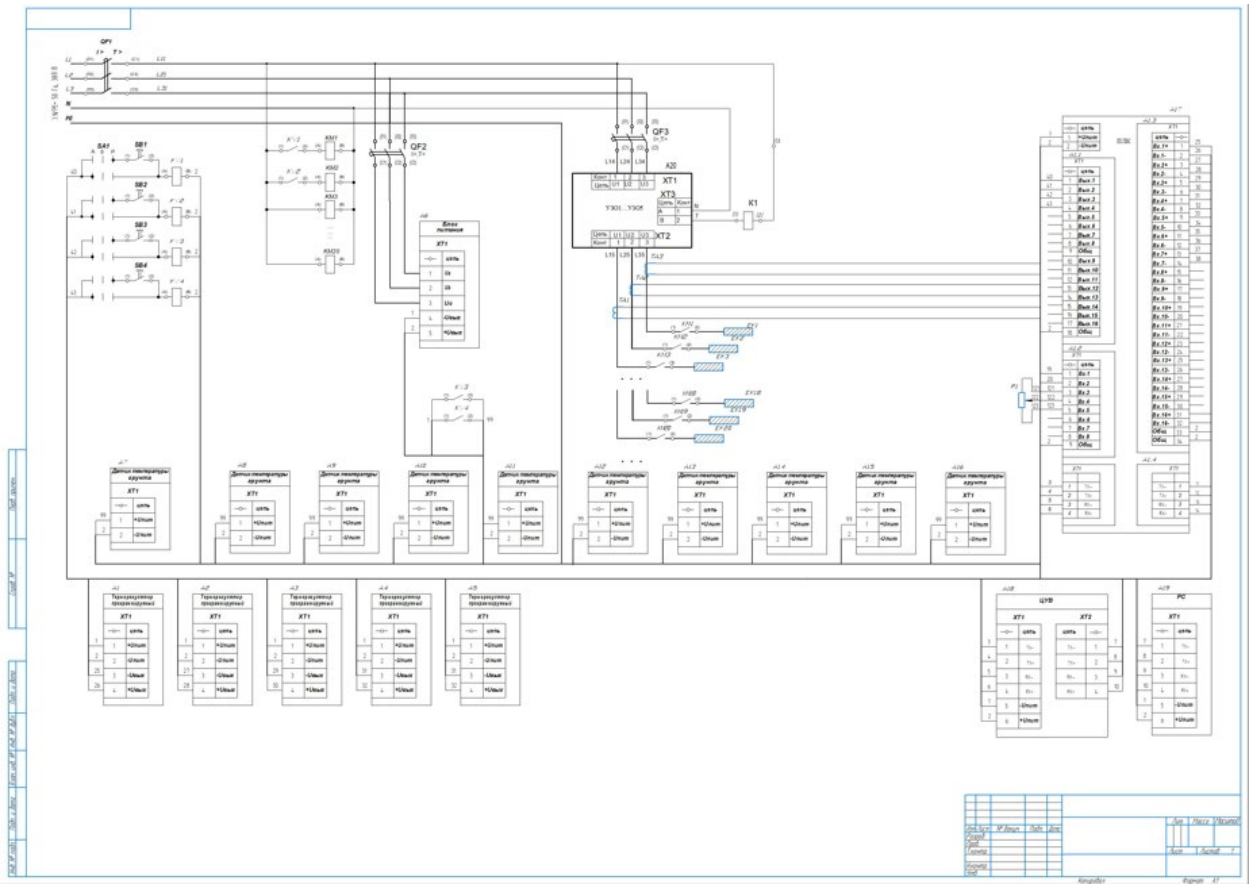


Рисунок 3 – Принципиальная электрическая схема

На лабораторном стенде (рисунок 4) были проведены испытания в трех сериях.

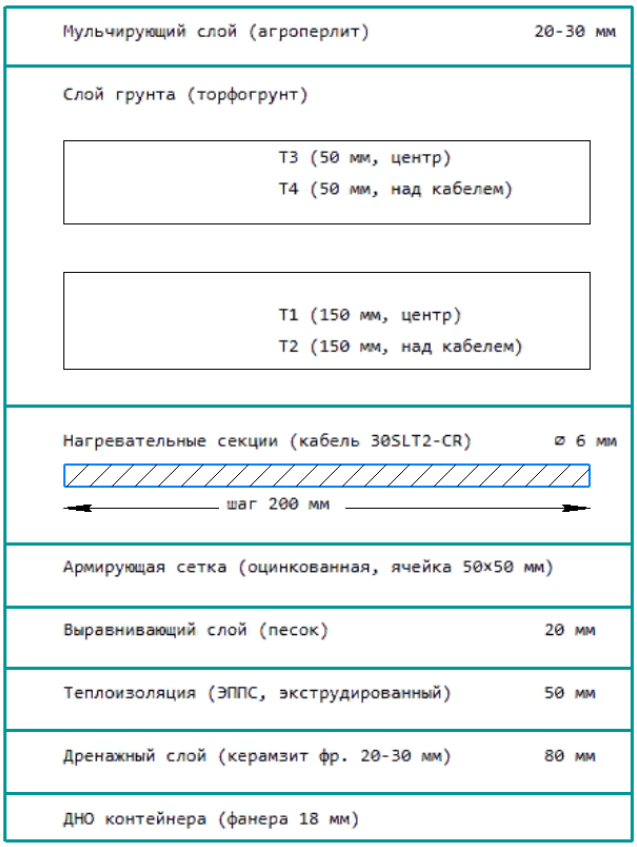



Рисунок 4 – Контейнер для имитации грядки

Серия 1 (холодный пуск) (рисунок 5). При начальной температуре кабеля +8 °С

пусковой ток составил $2{,}15 \cdot I_{ном}$ = 21,1 А, что находится в пределах теоретического диапазона. Время выхода на установившийся режим – 45 минут. Неравномерность температурного поля не превысила 1,8 °С.

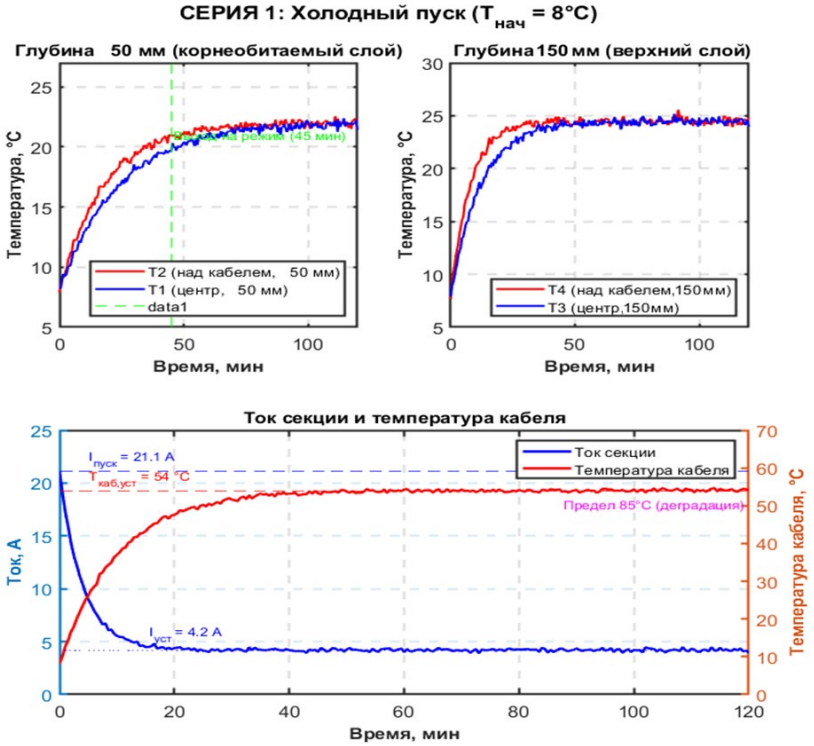



Рисунок 5 – Результаты серии 1 (холодный пуск)

Серия 2 (саморегуляция) (рисунок 6). При локальном пересыхании грунта мощность кабеля автоматически снизилась на 14%, а температура не превысила 28 °С (у резистивного аналога достигает 60–80 °С с последующим перегоранием). При локальном увлажнении мощность возросла на 14%, выравнивая температурное поле.

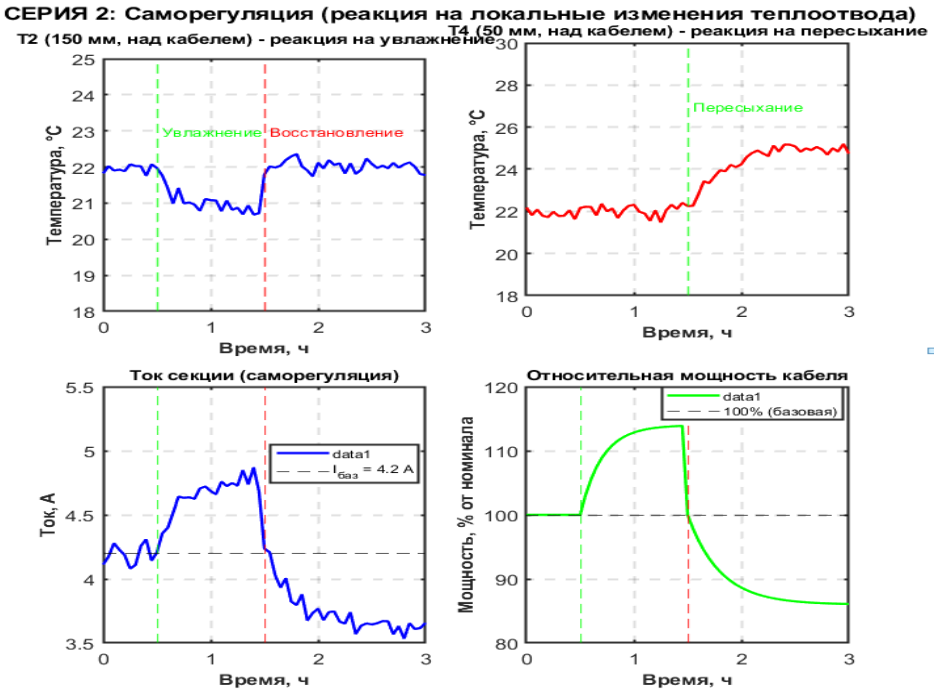



Рисунок 6 – Результаты серии 2 (саморегуляция)

Серия 3 (защиты) (рисунок 7). Защита от перегрева отключила секцию при достижении

40 °C за 0,5 с. УЗО сработало за 40 мс при утечке 22 мА.

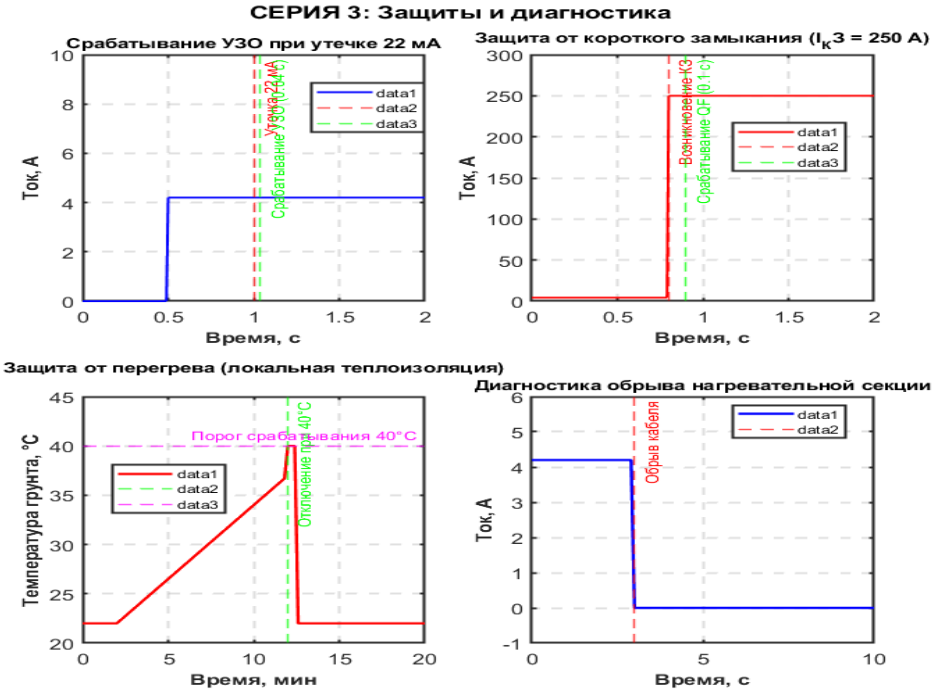



Рисунок 7 – Результаты серии 3 (защиты и диагностика)

Все графики построены в программной среде Matlab [6, 7]. В таблице 1 представлено сравнение основных параметров.

Таблица 1 – Сравнение расчетных и экспериментальных параметров

| Параметр | Расчетное значение | Экспериментальное значение | Отклонение |
|---|---|---|---|
| Пусковой ток (при +8 °С), А | 19,6–24,5 | 21,1 | +7,6% (в диапазоне) |
| Ток установившегося режима, А | 3,93–5,89 | 4,2 | - |
| Время выхода на режим, мин | 40–60 | 45 | - |
| Температура перегретой зоны (сухой грунт), °С | не более 40 | 28 | ниже |
| Неравномерность температурного поля, °С | 2–3 | 1,8 | лучше расчетного |
| Срабатывание УЗО при утечке, мс | < 100 | 40 | соответствует |
| Порог отключения по перегреву, °С | 40 | 40 | соответствует |

Отклонения находятся в пределах точности измерений и допущений теплофизической модели. Экспериментально подтверждена способность саморегулирующегося кабеля автоматически адаптировать мощность к локальным условиям теплоотвода.

Результаты испытаний позволяют рекомендовать разработанную систему электроснабжения для практического применения в тепличных хозяйствах с заменой резистивного кабеля на саморегулирующийся без существенного изменения конструктивных решений, но с обязательным учетом пусковых токов при выборе аппаратов защиты.

**Список использованных источников**

1. Белов, В.В. Тепличное устройство с обогревательными элементами / В.В. Белов, Е.Л. Белов. // Вестник Чувашской ГСХА. Научный журнал. № 3(10), 2019. – С. 85–89.

2. Белов, Е.Л. Автономная теплица с подогревом почвы / Е.Л. Белов // Перспективы развития технического сервиса в агропромышленном комплексе: Сборник материалов Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции, посвященной 55-летию создания кафедры технического сервиса (ремонта машин и технологии конструкционных материалов), Чебоксары, 05 декабря 2019 года. – Чебоксары: Чувашская государственная сельскохозяйственная академия, 2019. – С. 419–424.

3. Патент № 2723036 C1 Российская Федерация, МПК A01G 9/24. Тепличное устройство с обогревом почвы: № 2019114890: за явл. 12.05.2019: опубл. 08.06.2020 / В.В. Белов, Е.Л. Белов, С.В. Белов [и др.].

4. Свешников, А.Г. Исследование температурного режима в экспериментальной теплице / А.Г. Свешников, Е.Л. Белов, В.В. Белов // Перспективы развития механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства: Материалы II Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции, Чебоксары, 20 марта 2020 года. – Чебоксары: Чувашская государственная сельскохозяйственная академия, 2020. – С. 61–65.

5. Шорников, Е. Е. Проектирование автоматических систем: учебное пособие / Е. Е. Шорников. – Тула: ТулГУ, 2024. – 107 с.

6. Чуешев, А. В. Компьютерное проектирование процессов: учебно-методическое пособие / А. В. Чуешев. – Кемерово: КемГУ, 2024. – 255 с.

7. Бычкова, Математическое моделирование средствами Matlab : учебное пособие / Бычкова, В. Т. . — Брянск : Брянский ГАУ, 2025. — 104 с.

**Bibliography**

1. Belov V.V., Belov E.L. Teplichnoe ustrojstvo s obogrevatel'nymi ehlementami. – Vestnik CHuvashskoj GSHA. Nauchnyj zhurnal. № 3(10), 2019. – S. 85–89.

2. Belov E.L. Avtonomnaya teplica s podogrevom pochvy // Perspektivy razvitiya tekhnicheskogo servisa v agropromyshlennom komplekse: Sbornik materialov Nacional'noj (Vserossijskoj) nauchno-prakticheskoj konferencii, posvyashchennoj 55-letiyu sozdaniya kafedry tekhnicheskogo servisa (remonta mashin i tekhnologii konstrukcionnykh materialov), CHeboksary, 05 dekabrya 2019 goda. – CHeboksary: CHuvashskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyajstvennaya akademiya, 2019. – S. 419–424.

3. Patent № 2723036 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK A01G 9/24. Teplichnoe ustrojstvo s obogrevom pochvy: № 2019114890: zayavl. 12.05.2019: opubl. 08.06.2020 / V.V. Belov, E.L. Belov, S.V. Belov [i dr.].

4. Sveshnikov A.G., Belov E.L., Belov V.V. Issledovanie temperaturnogo rezhima v ehksperimental'noj teplice // Perspektivy razvitiya mekhanizacii, ehlektrifikacii i avtomatizacii sel'skokhozyajstvennogo proizvodstva: Materialy II Nacional'noj (Vserossijskoj) nauchno-prakticheskoj konferencii, CHeboksary, 20 marta 2020 goda. – CHeboksary: CHuvashskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyajstvennaya akademiya, 2020. – S. 61–65.

5. Shornikov E.E. Proektirovanie avtomaticheskikh system: uchebnoe posobie. – Tula: TulGU, 2024. – 107 s.

6. Chueshev A.V. Komp'yuternoe proektirovanie processov: uchebno-metodicheskoe posobie. – Kemerovo: KemGU, 2024. – 255 s.

7. Bychkova V.T. Matematicheskoe modelirovanie sredstvami Matlab: uchebnoe posobie. – Bryansk: Bryanskij GAU, 2025. – 104 s.

*Тепсаев Салман Саидович, студент магистратуры кафедры «Электроэнергетика и электротехника», Россия, Москва, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», +79099544311 109428, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5, e-mail: tepsaev.s.s@mail.ru*

## JUSTIFICATION OF THE POWER SUPPLY SYSTEM FOR HEATING UNITS FOR SOIL HEATING OF GREENHOUSES BASED ON SELF-REGULATING CABLE

Tepsaev S.S.

FGBNU FNAC VIM

Abstract. In the context of import substitution and the need to improve the energy efficiency of greenhouse farming, the implementation of adaptive soil heating systems is relevant. Traditional resistive cables are characterized by the risk of local overheating and burnout, while water systems are characterized by high inertia. The use of a self-regulating heating cable (SRHC) based on a semiconductor matrix with a positive temperature coefficient of resistance is proposed. A power supply system for heating units has been developed that takes into account the nonlinear nature of the load, increased inrush currents (1.5–2.5 times higher than rated ones) and line length limitation (up to 80 m with a cross-section of 2.5 mm²). Structural and schematic electrical diagrams of the power supply system are presented, including a main distribution board (MDB) with an automatic transfer switch (ATS), zone control cabinets based on an OWEN PLC110 programmable logic controller and solid-state relays. The results of experimental studies of a laboratory prototype are presented, confirming a 14% reduction in energy consumption compared to a resistive analogue and preventing overheating of the root zone (maximum temperature did not exceed 28 °C versus 60–80 °C). Design options and equipment placement in an industrial greenhouse are proposed.

Keywords: greenhouse, soil heating, self-regulating heating cable, PTC-effect, power supply system, inrush currents, automatic transfer switch (ATS), automation, energy efficiency.

*Tepsaev Salman Saidovich, master's student of the Department of Electric Power and Electrical Engineering, Russia, Moscow, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, +79099544311 109428, Moscow, 1st Institutsky proezd, bldg. 5, e-mail: tepsaev.s.s@mail.ru*

**УДК 621.314.222:621.311.1:378.147**

# ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И СПОСОБОВ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ИХ ПЕРЕГРУЗКИ

И.С. Фролов[1], А.В. Виноградов[1,2]

[1]ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева
[2]ФГБОУ ВО Орловский ГАУ

***Аннотация.*** *В статье выполнено обоснование структуры лабораторного стенда для изучения характеристик и способов предотвращения перегрузки силовых трансформаторов. Рассмотрены основные вопросы, подлежащие изучению при выполнении лабораторных работ на стенде, требования к составу учебно-исследовательского стенда и меры безопасности при работе с ним. В качестве изучаемого трансформатора для стенда предложен трехфазный сухой защищенный трансформатор ТСЗР-1,6УХЛ2 мощностью 1,6 кВА, имеющий доступные для учебных опытов уровни напряжения и мощности. Показано, что такой трансформатор не является прямым аналогом силового трансформатора 10/0,4 кВ по мощности, однако может использоваться как лабораторная физическая модель для исследования основных электромагнитных и нагрузочных процессов. Предложены функциональные блоки стенда, перечень лабораторных работ и способы предупреждения перегрузки: токовый контроль, температурный контроль, перераспределение фазной нагрузки и ступенчатое отключение неприоритетных нагрузок. Материалы статьи могут быть использованы при разработке технического задания, электрической принципиальной схемы и методического обеспечения лабораторного стенда.*

***Ключевые слова:*** *силовой трансформатор, лабораторный стенд, трансформатор ТСЗР, перегрузка, электрическая сеть 0,4 кВ, физическое моделирование, токовая защита, температурный контроль, методика лабораторных работ.*

## Введение

Силовые трансформаторы являются одним из основных элементов систем электроснабжения. В распределительных сетях 10/0,4 кВ трансформаторы работают в условиях переменного графика нагрузки, несимметрии фазных токов и напряжений, влияния аварийных режимов. Для сельских и коммунально-бытовых сетей указанные факторы особенно существенны, так как значительная часть нагрузки является однофазной и подключается неравномерно по фазам [1]. Это, среди прочего, повышает вероятность повреждения самих трансформаторов и к перерывам в электроснабжении потребителей, а также снижению качества поставляемой им электроэнергии. При этом как надёжность электроснабжения сельских потребителей, так и качество электроэнергии остаются невысокими [2-4]. Потери в трансформаторах также зависят от режимов и симметрии нагрузки [5, 6].

Перегрузка трансформатора сопровождается увеличением токов в обмотках, ростом потерь мощности, повышением температуры активных частей и ускоренным старением изоляции. При длительной работе в перегрузочном режиме возрастает риск повреждения обмоток, ухудшения сопротивления изоляции и отключения потребителей. Поэтому вопросы

контроля нагрузки и предупреждения перегрузки относятся не только к расчетным задачам, но и к практическим задачам эксплуатации электрооборудования.

В учебном процессе изучение силовых трансформаторов часто ограничивается расчетом коэффициента трансформации, опытами холостого хода и короткого замыкания. Такой подход позволяет изучить базовые характеристики, но не всегда формирует у обучающихся понимание связи между режимом нагрузки, электрическими параметрами, тепловым состоянием оборудования и работой защитных устройств. Кроме того, не анализируется работа трансформатора в несимметричных режимах, особенности схем соединения обмоток и применения трансформаторов с этими схемами. Усилить учебный процесс по изучению силовых трансформаторов и их применения в электрических сетях 10/0,4 кВ позволит разработка лабораторного стенда, позволяющего безопасно моделировать эксплуатационные режимы трансформатора. Среди вопросов, изучаемых с применением стенда должны быть режимы работы трансформатора с несимметричной нагрузкой, кратковременной перегрузкой, способы предотвращения таких режимов [7, 8].

Цель статьи заключается в обосновании структуры лабораторного стенда для изучения силовых трансформаторов и способов предотвращения их ненормальных режимов работы.

**Материалы и методы исследования**

В качестве материалов исследования использованы положения теории электрических машин, нормативные требования к трансформаторам, материалы обзора публикаций по вопросам надежности и режимов работы электрических сетей и силовых трансформаторов 10/0,4 кВ. также анализировались способы предотвращения перегрузки трансформаторов.

В качестве базового трансформатора для разработки стенда выбран трехфазный сухой защищенный трансформатор ТСЗР-1,6УХЛ2. По заводской табличке трансформатор имеет номинальную мощность 1,6 кВА, частоту 50 Гц, степень защиты IP20, массу 24 кг, номинальные напряжения 380-220/380 В и схему соединения обмоток Y-D/Y. Указанные параметры позволяют применять его в лабораторных условиях при соблюдении требований электробезопасности и ограничении перегрузочных режимов по времени. Также трансформатор позволяет изучать различные схемы соединения обмоток.

Методика обоснования стенда включает четыре последовательных этапа. На первом этапе определяется перечень режимов, которые должны быть реализованы на стенде. На втором этапе выбираются измеряемые параметры: фазные и линейные напряжения, токи, активная мощность, температура корпуса или обмоток, коэффициент загрузки. На третьем этапе формируется функциональная структура стенда. На четвертом этапе определяется методическое обеспечение, необходимое для выполнения лабораторных работ и обработки результатов.

При разработке стенда используются базовые зависимости теории трансформаторов: коэффициент трансформации, коэффициент загрузки, расчет токов по фазам, оценка потерь и контроль температурного режима. Для учебной модели принципиально важно не абсолютное совпадение мощности с промышленным трансформатором 10/0,4 кВ, а воспроизводимость физических закономерностей в безопасном диапазоне напряжений и токов.

Таблица 1 - Паспортные данные трансформатора, принятого в качестве основы лабораторного стенда

| Параметр | Значение по заводской табличке | Значение для стенда |
|---|---|---|
| Тип трансформатора | ТСЗР-1,6УХЛ2 | Физическая модель трансформатора для учебных исследований |
| Номинальная мощность | 1,6 кВА | Достаточна для подключения регулируемой лабораторной нагрузки |
| Частота | 50 Гц | Соответствует промышленной частоте сети |
| Номинальные напряжения | 380-220/380 В | Позволяют исследовать трехфазные режимы |
| Схема соединения | Y-D/Y | Используется при анализе влияния схем соединения обмоток |
| Степень защиты | IP20 | Требует размещения в закрытом стендовом корпусе |
| Масса | 24 кг | Позволяет выполнить переносной или стационарный учебный стенд |




Рисунок 1 – Трансформатор ТСЗР-1,6УХЛ2, выбранный для использования в лабораторном стенде

**Результаты и обсуждение.** Выбор трансформатора для лабораторного стенда учитывал одновременно три группы требований: электротехнические, методические и требования безопасности. Электротехнические требования связаны с возможностью воспроизведения основных режимов работы трансформатора. Методические требования связаны с наглядностью опытов и возможностью обработки результатов. Требования безопасности

определяют допустимые уровни напряжения, токов, нагрева и конструктивную защиту обучающихся.

Применение трансформатора ТСЗР-1,6УХЛ2 целесообразно по нескольким причинам. Во-первых, номинальная мощность 1,6 кВА достаточна для демонстрации изменения токов, напряжений и нагрева при изменении нагрузки. Во-вторых, сухое исполнение упрощает размещение трансформатора в учебной лаборатории по сравнению с масляными трансформаторами. В-третьих, трехфазное исполнение позволяет исследовать симметричную и несимметричную нагрузку при разных схемах соединения трансформатора, что важно для сетей 0,4 кВ с большим количеством однофазных потребителей.

При этом выбранный трансформатор необходимо рассматривать именно как физическую модель, а не как промышленный силовой трансформатор 10/0,4 кВ. Масштабирование результатов должно выполняться через коэффициенты подобия, которые связывают параметры лабораторной модели и прототипа.

Лабораторный стенд должен обеспечивать воспроизведение режимов, имеющих практическое значение для эксплуатации трансформаторов и одновременно пригодных для учебного эксперимента. К таким режимам относятся холостой ход, короткое замыкание при пониженном напряжении, нагрузочные режимы при симметричной и несимметричной нагрузке, в том числе однофазной, кратковременная контролируемая перегрузка.

Режим холостого хода используется для определения коэффициента трансформации, тока холостого хода и потерь в стали. В рамках лабораторной работы обучающиеся фиксируют напряжения на обмотках и ток холостого хода, после чего рассчитывают основные параметры трансформатора.

Режим короткого замыкания должен выполняться только при пониженном напряжении и с обязательным ограничением тока. Его назначение - определение напряжения короткого замыкания, эквивалентного сопротивления обмоток и характера изменения тока при малом сопротивлении нагрузки. Такой опыт должен проводиться под контролем преподавателя и с применением защитных аппаратов.

Нагрузочные режимы позволяют исследовать изменение выходного напряжения, токов и мощности при увеличении нагрузки. Отдельное значение имеет несимметричная нагрузка, так как она характерна для распределительных сетей 0,4 кВ и может приводить к дополнительному нагреву, перекосу напряжений фаз и ухудшению условий работы потребителей. В качестве наиболее показательного несимметричного режима следует рассмотреть однофазную нагрузку трансформатора.

Режим перегрузки должен рассматриваться как кратковременный учебный режим, а не как допустимый длительный режим эксплуатации. Цель опыта - показать, как изменяются токи, напряжения и температура при превышении номинальной нагрузки, а также как должны срабатывать предупреждение, ограничение нагрузки или автоматическое отключение. При этом также реализуются способы защиты от перегрузки, например [9], а также вновь разработанные.

Таблица 2 - Режимы работы трансформатора, рекомендуемые для включения в программу испытаний стенда

| Режим | Измеряемые параметры | Учебный результат | Меры безопасности |
|---|---|---|---|
| Холостой ход | Напряжение, ток холостого хода, активная мощность | Определение коэффициента трансформации и потерь холостого хода | Контроль напряжения питания |
| Короткое замыкание | Ток, напряжение КЗ, мощность | Оценка эквивалентного сопротивления обмоток | Пониженное напряжение, ограничение тока |
| Симметричная нагрузка | Токи фаз, напряжения, мощность | Построение внешней характеристики | Пошаговое увеличение нагрузки |
| Несимметричная нагрузка | Фазные токи и напряжения | Оценка перекоса фаз и влияния однофазной нагрузки | Контроль токов и напряжений по каждой фазе |
| Кратковременная перегрузка | Ток, коэффициент загрузки, температура | Анализ признаков перегрузки и работы защиты | Ограничение времени опыта, аварийное отключение |

Предлагаемый стенд представляет собой учебно-исследовательскую установку, в которой трансформатор ТСЗР-1,6УХЛ2 используется как центральный элемент силовой части. Стенд не является готовым промышленным изделием; в статье обосновывается его рекомендуемая структура для последующей разработки технического задания, электрической схемы, конструкции и методических указаний.

В состав стенда целесообразно включить вводной блок, трансформаторный модуль, блок регулируемой нагрузки, измерительный блок, блок температурного контроля, блок защиты и автоматики, а также панель управления. Такое построение позволяет объединить классические опыты по электрическим машинам с современными задачами мониторинга и предупреждения перегрузки.

Вводной блок должен обеспечивать подачу питания, защиту от короткого замыкания и аварийное отключение. В его состав целесообразно включить вводной автоматический выключатель, сигнальную индикацию наличия напряжения, кнопку аварийного отключения и клеммы защитного заземления.

Трансформаторный модуль должен включать сам трансформатор, защитный кожух, вентиляционные отверстия и маркированные выводы обмоток. Конструкция должна исключать случайное прикосновение к токоведущим частям и обеспечивать доступ к контрольным точкам только через безопасные измерительные гнезда.

Блок регулируемой нагрузки может быть выполнен на резистивных элементах с возможностью ступенчатого изменения нагрузки по каждой фазе. Для исследования несимметричных режимов необходимо предусмотреть независимое изменение нагрузки в

фазах L1, L2 и L3.

Измерительный блок должен обеспечивать регистрацию основных электрических величин. Минимальный вариант включает вольтметры, амперметры и ваттметр. Расширенный вариант может предусматривать цифровой многофункциональный измеритель, например, ТЭМП, или измерительный комплекс КОПиРР [10] интерфейс передачи данных и возможность сохранения результатов опыта для последующей обработки.

Блок защиты и автоматики должен выполнять две функции: предупреждение о приближении к перегрузке и отключение нагрузки при достижении аварийной уставки. Для учебных целей целесообразно предусмотреть регулируемые уставки по току и температуре, чтобы обучающиеся могли наблюдать влияние настройки защиты на работу стенда.

Таблица 3 - Функциональные блоки лабораторного стенда

| Блок стенда | Назначение | Основные элементы |
|---|---|---|
| Вводной блок | Подача питания и первичная защита | Автоматический выключатель, индикация, аварийная кнопка |
| Трансформаторный модуль | Размещение исследуемого трансформатора | ТСЗР-1,6УХЛ2, корпус, клеммные выводы, заземление |
| Регулируемая нагрузка | Создание симметричной, несимметричной и перегрузочной нагрузки | Резистивные ступени, коммутационные элементы |
| Измерительный блок | Контроль электрических параметров | Вольтметры, амперметры, ваттметр или цифровой анализатор |
| Температурный контроль | Контроль нагрева трансформатора | Датчики температуры, индикатор, журналирование |
| Защита и автоматика | Предупреждение и отключение при перегрузке | Токовые реле, температурное реле, сигнализация, контактор |

Предотвращение перегрузки трансформатора следует рассматривать как комплекс мероприятий, направленных на недопущение длительного превышения допустимого тока и опасного роста температуры. На лабораторном стенде эти мероприятия должны быть представлены в форме воспроизводимых опытов, позволяющих не только увидеть факт перегрузки, но и оценить результат действия конкретного способа защиты.

Первый способ - токовый контроль нагрузки. Он основан на сравнении измеренного фазного тока с установленной уставкой. При превышении предупредительной уставки стенд должен включать световую или звуковую сигнализацию, а при достижении аварийной уставки - отключать нагрузку. Такой способ прост для реализации и нагляден для обучающихся.

Второй способ - температурный контроль. Он позволяет показать, что перегрузка опасна не только по величине тока, но и по тепловому состоянию трансформатора. Для учебного стенда достаточно контролировать температуру корпуса или зоны, близкой к источнику нагрева. При этом необходимо учитывать инерционность тепловых процессов: температура изменяется медленнее, чем ток нагрузки.

Третий способ - перераспределение нагрузки по фазам. Он особенно актуален для сетей 0,4 кВ, где несимметрия однофазных потребителей может вызывать перегрузку отдельной фазы при относительно допустимой суммарной мощности. На стенде этот способ может быть реализован путем изменения сопротивлений нагрузочных ступеней по фазам.

Четвертый способ - ступенчатое отключение неприоритетных нагрузок, например, как в . В учебной модели нагрузки могут быть разделены на обязательные и отключаемые группы. При достижении предупредительной уставки отключается часть нагрузки, после чего обучающиеся фиксируют изменение тока и температуры. Такой опыт показывает принцип управления нагрузкой без полного отключения стенда.

Для наиболее рационален комбинированный вариант, включающий токовый контроль, температурный контроль и ступенчатое отключение нагрузки. Такой вариант позволяет изучить как быстрые электрические процессы, так и более медленные тепловые процессы, а также сформировать у обучающихся представление о комплексном подходе к защите трансформаторов.

Таблица 4 - Сравнение способов предотвращения перегрузки трансформатора

| **Способ** | **Контролируемый параметр** | **Преимущество** | **Ограничение** |
|---|---|---|---|
| Токовый контроль | Фазный ток | Быстрая реакция на перегрузку | Не отражает тепловую инерцию |
| Температурный контроль | Температура корпуса или обмотки | Связан с реальным тепловым состоянием | Имеет задержку срабатывания |
| Перераспределение нагрузки | Токи по фазам | Снижает перекос и перегрузку отдельной фазы | Требует анализа структуры нагрузки и автоматизации прераспределения |
| Ступенчатое отключение | Ток и приоритет нагрузки | Позволяет сохранить питание важных потребителей | Нужно разделение нагрузки по приоритетам |
| Комбинированный способ | Ток, температура, состояние нагрузки | Наиболее наглядный и комплексный вариант | Сложнее по схеме и настройке |

Разработка стенда должна сопровождаться подготовкой методического обеспечения. Без методических указаний лабораторный стенд остается набором технических средств и не обеспечивает достижение образовательного результата. Методическое обеспечение должно включать цели работ, краткие теоретические сведения, электрические схемы опытов, порядок выполнения, таблицы для записи результатов, расчетные формулы и контрольные вопросы.

Первая лабораторная работа может быть посвящена изучению конструкции и паспортных данных трансформатора. Обучающиеся определяют назначение основных элементов, расшифровывают обозначение трансформатора, анализируют заводскую табличку и делают вывод о допустимых режимах работы.

Вторая лабораторная работа должна включать опыт холостого хода. В ходе работы

определяются коэффициент трансформации, ток холостого хода и потери холостого хода. Полученные результаты могут использоваться для сравнения с расчетными значениями и последующего пересчета на прототип.

Третья лабораторная работа должна быть направлена на исследование нагрузочного режима. Обучающиеся пошагово увеличивают нагрузку, фиксируют напряжения, токи и мощность, после чего строят внешнюю характеристику трансформатора.

Четвертая лабораторная работа может быть посвящена несимметричной нагрузке. На каждой фазе устанавливается различная нагрузка, после чего оцениваются фазные токи, отклонение напряжений и влияние перекоса на работу трансформатора.

Пятая лабораторная работа должна быть связана с предотвращением перегрузки. В ходе работы задается кратковременное превышение нагрузки, фиксируется коэффициент загрузки, наблюдается изменение температуры и проверяется действие токовой или температурной защиты.

Перечень лабораторных работ может быть расширен.

Таблица 5 - Предлагаемый перечень лабораторных работ

| № | Наименование лабораторной работы | Основной результат |
|---|---|---|
| 1 | Изучение конструкции и паспортных данных трансформатора | Определение допустимых режимов и параметров по заводской табличке |
| 2 | Опыт холостого хода | Расчет коэффициента трансформации и потерь холостого хода |
| 3 | Исследование нагрузочного режима | Построение внешней характеристики трансформатора |
| 4 | Исследование несимметричной нагрузки | Оценка влияния перекоса фаз на токи и напряжения |
| 5 | Исследование способов предотвращения перегрузки | Проверка действия токового и температурного контроля |

**Выводы**

Предлагаемый лабораторный стенд относится к учебно-исследовательскому оборудованию. Его основная задача - не имитация всех конструктивных особенностей промышленного трансформатора 10/0,4 кВ, а создание безопасной физической модели, на которой можно исследовать закономерности изменения электрических и тепловых параметров при различных режимах нагрузки.

Использование реального трансформатора в составе стенда имеет преимущество перед исключительно компьютерным моделированием. Компьютерная модель позволяет быстро изменять параметры схемы, однако не всегда формирует у обучающихся практические навыки измерений, коммутации, проверки защитных устройств и анализа погрешностей. Физический стенд позволяет совместить расчетную и экспериментальную подготовку.

Ограничением предложенного подхода является маломощное исполнение выбранного трансформатора. Тепловые процессы в трансформаторе ТСЗР-1,6УХЛ2 отличаются от процессов в распределительном трансформаторе 10/0,4 кВ большей мощности. Поэтому результаты лабораторных опытов должны использоваться как учебные и модельные, а не как прямые эксплуатационные данные для промышленного оборудования.

Практическая значимость предложенного подхода состоит в том, что он может быть положен в основу дальнейшей разработки ВКР: технического задания на стенд, структурной и электрической принципиальной схем, конструкции, паспорта стенда и методических указаний. Кроме того, предложенная структура позволяет в дальнейшем дополнить стенд цифровой регистрацией параметров и сравнением экспериментальных данных с математической моделью.

**Список использованных источников**

1. Анализ загрузки и распределения потерь электроэнергии в силовых трансформаторах напряжением 6-10 кВ / А. В. Виноградов, А. В. Виноградова, А. В. Букреев, А. А. Лансберг // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 6. – С. 67-75. – DOI 10.26897/2687-1149-2023-6-67-75. – EDN CZWQAV.

2. Виноградова А.В., Виноградов А.В. Анализ плановых и аварийных отключений в сельских электрических сетях 0,4 кВ // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2024. Т. 71, N 3(56). С. 59-68.

3. Лещинская, Т. Б. Электроснабжение сельского хозяйства. Конструкция и основные расчеты электрических сетей : Учебник / Т. Б. Лещинская, И. В. Наумов, А. В. Виноградов. – Старый Оскол : ООО "Тонкие наукоемкие технологии", 2026. – 384 с. – ISBN 978-5-94178-917-7. – EDN OSQCQB.

4. Рахимов, О. С. Экспериментальное исследование показателей качества и потерь электроэнергии в низковольтных сельских электрических сетях / О. С. Рахимов, Д. Н. Мирзоев, Е. И. Грачева // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 209-222. – DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222. – EDN NWISVC.

5. Самарин, Г. Н. Способы коррекции уровней напряжения и несимметрии напряжений в сетях 0,4 кВ / Г. Н. Самарин, В. А. Ружьев, М. Ю. Егоров // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2017. – № 49. – С. 279-286. – EDN YOKBAJ.

6. Костинский, С. С. Снижение сверхнормативных потерь в трансформаторах, установленных в распределительных сетях / С. С. Костинский // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. – № 1. – С. 132-133. – EDN PWPNWR..

7. Кацман М.М. Электрические машины: учебник для среднего профессионального образования. М.: Академия, 2020. 496 с.

8. Ганджа, С. А. Силовые трансформаторы и электрические машины : Учебное пособие для инженеров-электриков и студентов электротехнических специальностей / С. А. Ганджа, Г. Г. Лебедев ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Южно-Уральский государственный университет, Политехнический институт, Кафедра «Теоретические основы электротехники. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2022. – 159 с. – ISBN 978-5-696-05303-5. – EDN GJRLEK.

9. Патент № 2740396 C1 Российская Федерация, МПК H02H 5/04, H02J 3/46, H02J 13/00. Способ сохранения ресурса силовых трансформаторов двухтрансформаторной подстанции: № 2020131282: заявл. 23.09.2020: опубл. 14.01.2021 / А. В. Виноградов, Н. С. Сорокин, А. В. Виноградова [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ" (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ). – EDN BVPPXJ.

10. Букреев, А. В. Разработка технических средств обследования электрических сетей сельскохозяйственных объектов / А. В. Букреев, А. В. Виноградов. – Орёл: Общество с

ограниченной ответственностью полиграфическая фирма «Картуш», 2023. – 196 с. – ISBN 978-5-9708-1079-8. – EDN KFFOGK

**Bibliography**

1. Analysis of the loading and distribution of electricity losses in power transformers with a voltage of 6-10 kV / A.V. Vinogradov, A.V. Vinogradova, A.V. Bukreev, A. A. Lansberg // Agroengineering. – 2023. – Vol. 25, No. 6. – pp. 67-75. – DOI 10.26897/2687-1149-2023-6-67-75. – EDN CZWQAV.

2. Vinogradova A.V., Vinogradov A.V. Analysis of planned and emergency shutdowns in rural electrical networks of 0.4 kV // Electrical technologies and electrical equipment in the agro-industrial complex. 2024. Vol. 71, N 3(56). pp. 59-68.

3. Leshchinskaya, T. B. Power supply of agriculture. Construction and basic calculations of electrical networks: Textbook / T. B. Leshchinskaya, I. V. Naumov, A.V. Vinogradov. – Stary Oskol : Thin High–tech Technologies LLC, 2026. – 384 p. - ISBN 978-5-94178-917-7. – EDN OSQCQB.

4. Rakhimov O. S., Mirzoev D. N., Gracheva E. I. Experimental study of quality indicators and losses of electric power in low-voltage rural electric networks // News of higher educational institutions. Energy problems. – 2021. – Vol. 23, No. 3. – pp. 209-222. – DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222. – EDN NWISVC.

5. Samarin, G. N. Methods for correcting voltage levels and voltage asymmetry in 0.4 kV networks / G. N. Samarin, V. A. Ruzhev, M. Yu. Egorov // Proceedings of the St. Petersburg State Agrarian University. – 2017. – No. 49. – pp. 279-286. – EDN YOKBAJ.

6. Kostinsky, S. S. Reduction of excess losses in transformers installed in distribution networks / S. S. Kostinsky // News of higher educational institutions. Electromechanics. – 2013. – No. 1. – pp. 132-133. – EDN PWPNWR..

7. Katsman M.M. Electric machines: textbook for secondary vocational education. Moscow: Akademiya, 2020. 496 p.

8. Ganzha, S. A. Power transformers and electric machines : A textbook for electrical engineers and students of electrical engineering specialties / S. A. Ganzha, G. G. Lebedev ; Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, South Ural State University, Polytechnic Institute, Department "Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Chelyabinsk : SUSU Publishing Center, 2022. 159 p. ISBN 978-5-696-05303-5. EDN GJRLEK.

9. Patent No. 2740396 C1 Russian Federation, IPC H02H 5/04, H02J 3/46, H02J 13/00. Method of saving the resource of power transformers of a two-transformer substation: No. 2020131282: application 23.09.2020: published 14.01.2021 / A.V. Vinogradov, N. S. Sorokin, A.V. Vinogradova [et al.]; the applicant is the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Agroengineering Center of VIM" (FSBI FNATS VIM). – EDN BVPPXJ.

10. Bukreev, A.V. Development of technical means of inspection of electrical networks of agricultural facilities / A.V. Bukreev, A.V. Vinogradov. – Orel: Limited Liability Company printing company "Cartouche", 2023. – 196 p. – ISBN 978-5-9708-1079-8. – EDN KFFOGK

*Иван Сергеевич Фролов - магистрант РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, e-mail: ivanfrolov2112@mail.ru.*

*Александр Владимирович Виноградов, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение и теплоэнергетика», РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева,*

*127434, г. Москва, улица Тимирязевская, д.49; профессор кафедры «Электроснабжение» ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69; Тел. 8(920)2879024 e-mail: winaleksandr@gmail.com. ORCID 0000-0002-8845-9718*

# JUSTIFICATION OF THE STRUCTURE OF A LABORATORY BENCH FOR STUDYING POWER TRANSFORMER CHARACTERISTICS AND METHODS OF PREVENTING THEIR OVERLOAD

I.S. Frolov, A.V. Vinogradov

[1]Timiryazev Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
[2]Oryol State Agrarian University

Abstract. The article provides a justification for the structure of a laboratory stand to study the characteristics and methods of preventing overload of power transformers. The main issues to be studied when performing laboratory work on the stand, the requirements for the composition of the educational and research stand and safety measures when working with it are considered. A three-phase dry protected transformer TSZR-1,6UHL2 with a capacity of 1.6 kVA, having voltage and power levels available for training experiments, is proposed as the transformer under study for the stand. It is shown that such a transformer is not a direct analogue of a 10/0.4 kV power transformer in terms of power, however, it can be used as a laboratory physical model for the study of basic electromagnetic and load processes. The functional blocks of the stand, a list of laboratory work and overload prevention methods are proposed: current control, temperature control, phase load redistribution and stepwise shutdown of non-priority loads. The materials of the article can be used in the development of technical specifications, electrical schematic diagram and methodological support of the laboratory stand.

Keywords: power transformer, laboratory bench, TSZR transformer, overload, 0.4 kV electrical network, physical modeling, current protection, temperature monitoring, laboratory work methodology.

*Frolov Ivan Sergeevich - Master student, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, e-mail: ivanfrolov2112@mail.ru.*
*Alexander Vladimirovich Vinogradov, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor; Professor, Department of Power Supply and Heat Power Engineering, Timiryazev Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya Street, Moscow, 127434; Professor, Department of Power Supply, Oryol State Agrarian University, 69 General Rodina Street, Oryol, 302019; Tel. 8(920)2879024, e-mail: winaleksandr@gmail.com*
*ORCID 0000-0002-8845-9718*

**УДК. 631.331:631.5.**

# БЛОК-СХЕМА КОМБИНИРОВАННОГО СОШНИКА В СИСТЕМЕ СЕМЕНА-СОШНИК -ПОЧВА

Клюева К.Ю., Храмцова Е.Ю.

ФГБОУ ВО Тверская ГСХА

***Аннотация:*** *В работе представлена блок-схема, отражающая влияние управляемых и неуправляемых факторов на работу комбинированного сошника в системе «семена–сошник–почва» при посеве льна-долгунца — от входных параметров до выходных показателей. Анализ факторов позволяет оптимизировать процесс посева и повысить его эффективность. К неуправляемым факторам отнесены: тип почвы (глинистая, суглинистая и т.д.), её влажность, температура воздуха и почвы, рельеф поля, наличие растительных остатков. Эти условия заданы природно и требуют адаптации техники и технологии. Управляемые факторы включают: скорость движения агрегата, глубину заделки семян, норму высева, угол атаки сошника, давление сошника на почву, настройку дозирующей системы. Их целенаправленная корректировка обеспечивает достижение целевых показателей. Блок-схема наглядно демонстрирует причинно-следственные связи: как входные параметры через процесс работы сошника влияют на выходные показатели: равномерность распределения семян, глубину заделки, всхожесть, плотность стояния растений, сроки появления всходов, энергозатраты на гектар.Результаты работы применимы для агрономов и механизаторов при планировании и выполнении посева льна-долгунца, а также для конструкторов сельскохозяйственной техники при совершенствовании сошников.*

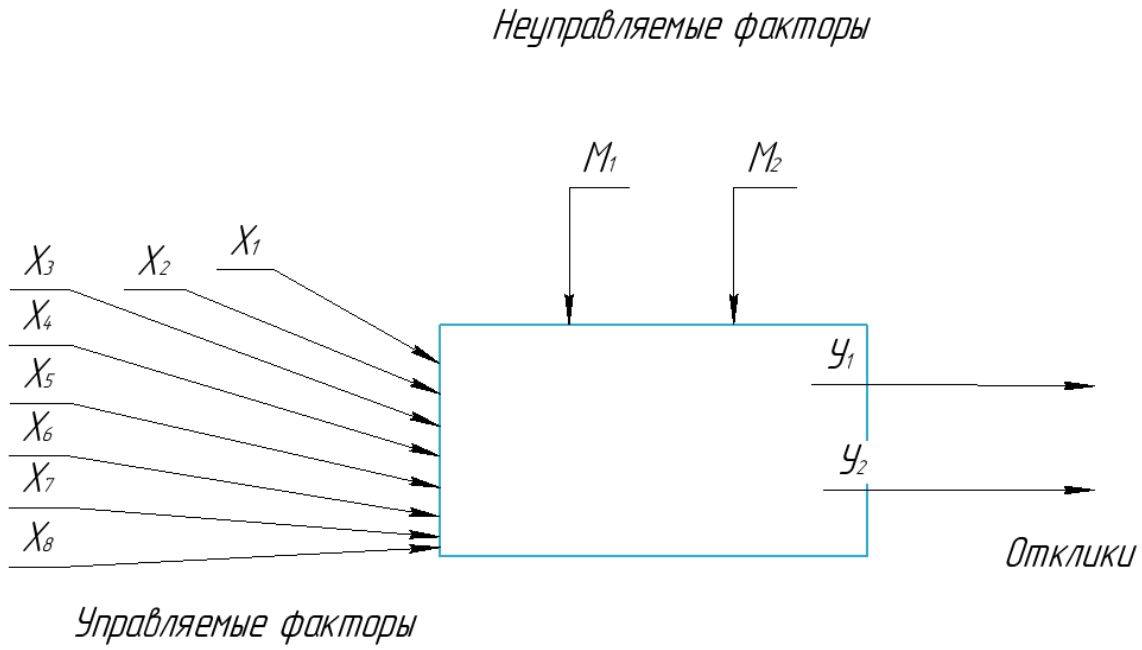
***Ключевые слова*** *схема, сошник, рабочий орган, мелкосеменные культуры, лен-долгунец.*

**Введение.** Блок-схема работы комбинированного сошника в системе «семена–сошник–почва» актуальна в связи с необходимостью повышения качества посевных работ — равномерности распределения семян, точности их заделки на заданную глубину, минимизации повреждений посевного материала и сохранения оптимальных условий для прорастания. Современные агротехнологии требуют комплексного подхода к совмещению операций (посев + внесение удобрений), снижения тягового сопротивления агрегатов, адаптации к разным типам почв. Комбинированные сошники позволяют решать эти задачи, однако их работа зависит от множества факторов: конструкции, скорости движения, влажности и структуры почвы, что требует детального анализа взаимодействия всех элементов системы. Разработка чёткой блок-схемы позволит оптимизировать настройки сеялки, сократить производственные потери и повысить урожайность [2].

Цель разработки блок-схемы — систематизировать технологический процесс работы комбинированного сошника, отобразив последовательность и взаимосвязь этапов: от входа семян в сошник до их заделки в почву с формированием семенного ложа.

**Материалы и методы исследования.** Эффективность посева мелкосеменных культур напрямую определяется качеством взаимодействия элементов цепочки «семена-сошник-почва». От качества выполнения этой операции зависит будущий урожай.

**Результаты исследования.** Для этого в данной работе была составлена схема, представленная на рис.1.




$M_1$-Тип почвы, в том числе гранулометрический состав, $M_2$ - абсолютная влажность почвы , $X_1$ - глубина заделки семян, $X_2$ - скорость движения агрегата, $X_3$ - угол вхождения сошника в почву, $X_4$ - конструкция семяпровода, $X_5$ - тип высевающей системы, $X_6$ - тип сошника, конструктивные особенности сошника, $X_7$ - прижимное усилие на сошник $X_8$ - норма высева семян

Рисунок 1 - Блок - схема влияния факторов на работу комбинированного сошника

Эффективность работы комбинированного сошника напрямую зависит от комплекса взаимодействующих факторов — как управляемых, так и неуправляемых [3]. Построение блок-схемы, отражающей эти взаимосвязи, позволяет формализовать процесс посева, выявить ключевые точки оптимизации и прогнозировать агротехнические результаты. В данной работе представлена структурная модель работы комбинированного сошника в виде блок-схемы с выделением входных параметров (факторов), центрального блока (процесса) и выходных показателей (откликов). Далее в таблице 1 представлена расшифровка каждого показателя [1].

Таблица 1

| Показатели | Кодовый номер | Суть и роль фактора | Диапазон варьирования | Управляемость |
|---|---|---|---|---|
| Тип почвы, в том числе гранулометрический состав | $M_1$ | Определяет водопроницаемость, аэрацию, несущую способность и температурный режим почвы. Гранулометрический состав влияет на сцепление частиц, | Классифицируется по типам: песчаные, супесчаные, суглинистые (лёгкие, средние, тяжёлые), глинистые. Доля | Неуправляемый (природно-обусловленный) |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | липкость, удельное сопротивление при обработке. | физической глины (< 0,01 мм): 0–10 % (пески) до > 50 % (тяжёлые глины). | |
| Глубина заделки семян | $X_1$ | Влияет на доступность влаги и кислорода для прорастания, температуру среды, силу прорастания и полевую всхожесть. | Мелкосемянные (лён, рапс) — 1–3 см; На лёгких почвах глубже, на тяжёлых — мельче. | Управляемый (настройка сеялки) |
| Скорость движения агрегата | $X_2$ | Определяет стабильность работы рабочих органов, равномерность заделки, качество крошения и уплотнения почвы. | 4–8 км/ч при точной пунктирной посадке | Управляемый (регулируется трактористом и трансмиссией) |
| Угол вхождения сошника в почву | $X_3$ | Влияет на усилие резания, глубину хода, степень рыхления и образование борозды. | 15–45 (зависит от конструкции сошника и плотности почвы). | Управляемый |
| Конструкция семяпровода, в том числе диаметр | $X_4$ | Определяет траекторию и скорость падения семени, вероятность заклинивания, равномерность распределения по рядку. | Диаметр: 10–20 мм. Материалы: пластик, металл, комбинированные. | Управляемый (выбор при комплектации сеялки под культуру) |
| Тип высевающей системы | $X_5$ | Влияет на точность дозирования, равномерность распределения, возможность работы с разными фракциями семян. | Механические (катушечные, дисковые); пневматические (центробежные, вакуумные); точновысевающие (пневмомеханические) | Управляемый (выбор при покупке/модернизации сеялки) |
| Тип сошника, конструктивные особенности сошника | $X_6$ | Определяет способ образования борозды, контакт с почвой, степень её уплотнения, возможность работы по мульче. | анкерные; долотообразные; дисковые (одно- и двухдисковые); комбинированные. | Управляемый (замена в зависимости от технологии посева и почвы) |
| Прижимное усилие на сошник | $X_7$ | Обеспечивает стабильный контакт сошника с почвой, поддержание заданной глубины, преодоление уплотнённых участков | 50–500 Н (зависит от массы секции, типа почвы и конструкции подвески). | Управляемый (регулируется пружинами, гидроцилиндрами или балластом) |
| Абсолютная влажность почвы | $M_2$ | Влияет на липкость, сопротивление обработке, способность к крошению и уплотнению. Определяет оптимальные сроки посева. | 8–30 % (массовая доля воды). Ниже 10 % — пересушено, выше 25 % — переувлажнено. | Неуправляемый (зависит от осадков и испарения) |
| Норма высева семян | $X_8$ | Определяет густоту стояния растений, конкуренцию за ресурсы, потенциальную урожайность. | Лен-долгунец — 100–120 кг/га | Управляемый (установка настройкой высевающих аппаратов) |

Центральный блок (чёрный ящик) представляет собой совокупность технологических процессов, реализуемых сошником

1. открытие борозды (культиваторная лапа, анкер) — формирование посевного ложа;
2. внесение удобрений (тукопровод, направитель) — точная подача удобрений на заданную глубину;
3. укладка семян (семяпровод, направитель) — равномерное распределение по борозде;
4. заделка семян и удобрений (естественное осыпание, уплотнители) — покрытие посевного материала почвой;
5. формирование семенного ложа (уплотнители, щитки-отвалы) — создание оптимальных условий для прорастания.

Отклики ($Y_1$, $Y_2$) отражают эффективность работы сошника и качество посева

- $Y_1$ — глубина заделки семян;
- $Y_2$ — всхожесть семян;
- $Y_3$ — глубина заделки удобрений;
- $Y_4$ — гребнистость;
- $Y_5$ — отклонение от средней линии посева.

Блок-схема реализует следующую последовательность

- Вход неуправляемые факторы ($M_1$, $M_2$) и управляемые факторы ($X_1$–$X_8$) поступают в центральный блок.
- Процесс в блоке происходит взаимодействие всех параметров — управляемые факторы адаптируются под условия, заданные неуправляемыми факторами.
- Выход система выдаёт отклики ($Y_1$, $Y_2$ $Y_3$, $Y_4$, $Y_5$), отражающие качество и эффективность работы комбинированного сошника в соответствии с агротехническими требованиями на посев.

Данная схема демонстрирует интеграцию различных факторов в единый технологический процесс посева. Оптимизация работы сошника с учётом типа почвы, культуры и агрометеорологических условий и д.р. позволяет добиться равномерного посева, повысить всхожесть семян и обеспечить высокий урожай [4]. Схема может быть использована для анализа и совершенствования технологий посева, выбора оптимальных типов сошников и настройки сеялок под конкретные условия. Далее, исходя из полученного результата, составляется алгоритм процесса посева льна-долгунца, который представлен на рисунке 2.

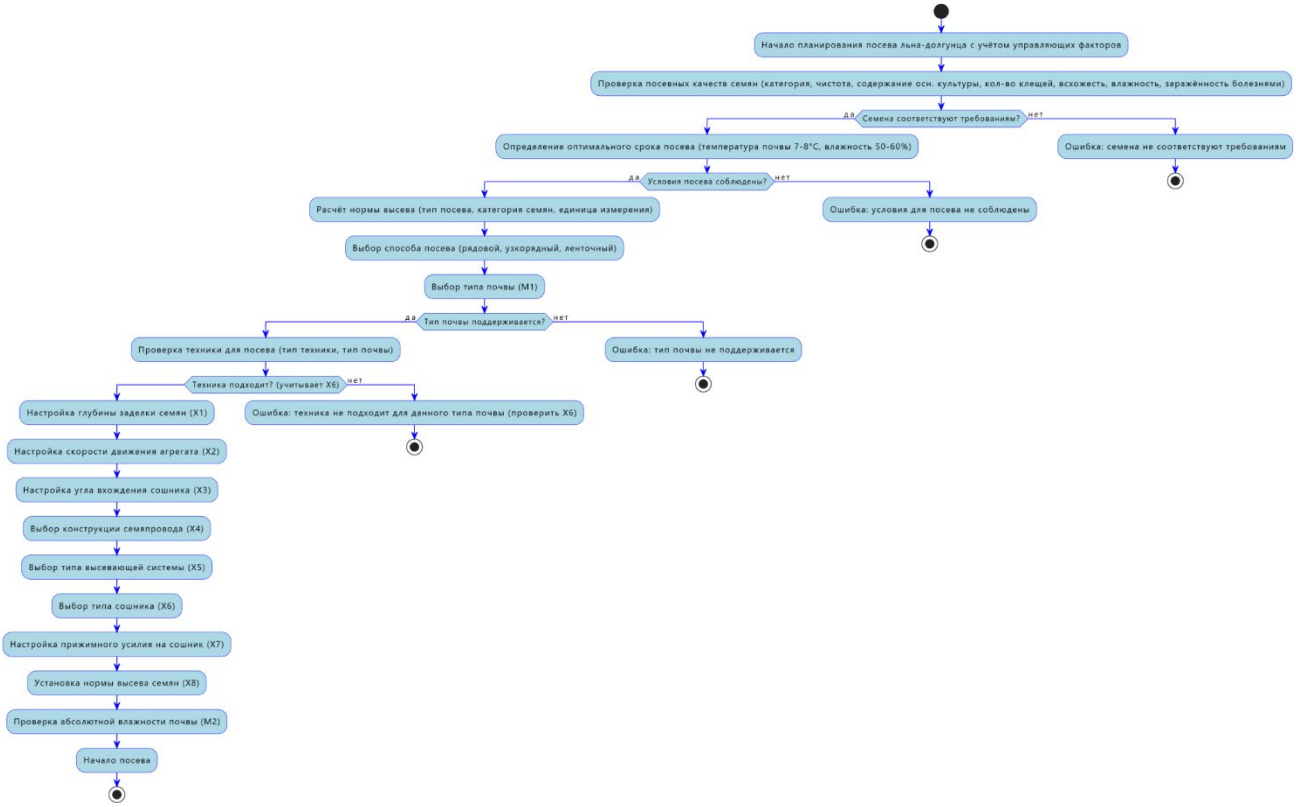



Рис.2.Алгоритм процесса посева льна-долгунца

Далее представлен алгоритм процесса посева льна-долгунца.

*Этап 1. Инициализация планирования посева*

Начальный этап включает анализ управляющих факторов, влияющих на посев:

1) тип почвы (M1) — природно обусловленный параметр;
2) глубина заделки семян (X1);
3) скорость движения агрегата (X2);
4) угол вхождения сошника в почву (X3);
5) конструкция семяпровода (X4);
6) тип высевающей системы (X5);
7) тип сошника и его конструктивные особенности (X6);
8) прижимное усилие на сошник (X7);
9) абсолютная влажность почвы (M2) — природно обусловленный параметр;
10) норма высева семян (X8).

*Этап 2. Проверка посевных качеств семян*

Проводится комплексная оценка семян по следующим критериям: чистота; содержание основной культуры; количество клещей; всхожесть; влажность; заражённость болезнями.

Результат: при несоответствии семян установленным требованиям процесс прекращается с фиксацией ошибки: «Семена не соответствуют требованиям».

*Этап 3. Оценка агроклиматических условий посева*

Анализируются текущие параметры почвы: температура почвы: целевой диапазон 7–8 °C; влажность почвы: целевой диапазон 50–60%.

Результат: при несоответствии условий процесс прекращается с фиксацией ошибки: «Условия для посева не соблюдены».

*Этап 4. Расчёт нормы высева*

Определяется оптимальная норма высева семян: 20–24 млн всхожих семян на гектар.

Норма корректируется с учётом: сорта льна; типа почвы; устойчивости растений к полеганию; климатических условий региона.

*Этап 5. Выбор способа посева*

Рекомендован узкорядный способ посева с шириной междурядий 6,25–7,5 см. Данный метод обеспечивает: равномерное распределение семян; оптимальное использование питательных веществ и влаги; снижение риска полегания растений.

*Этап 6. Проверка технической оснащённости*

Проводится верификация используемой техники с акцентом на тип сошника (X6). Критерии оценки:

1) соответствие конструкции сошника агротехническим требованиям;
2) возможность регулировки параметров посева;
3) совместимость с выбранным способом посева.

Результат: при несоответствии техники требованиям процесс прекращается с фиксацией ошибки: «Техника не подходит для условий посева».

*Этап 7. Подготовка участков под комбайновую уборку*

Мероприятия включают:

- формирование полос между загонами;
- создание краевых поворотных полос;
- расчёт ширины загона.

Параметр скорости движения агрегата (X2) учитывается при планировании технологических проездов.

*Этап 8. Анализ типа почвы*

Проводится детальная оценка типа почвы (M1) с проверкой её соответствия:

- выбранной технике;
- способу посева;
- агротехническим требованиям льна-долгунца.

Результат: при несоответствии типа почвы процесс прекращается с фиксацией ошибки: «Техника не подходит для данного типа почвы».

*Этап 9. Настройка глубины заделки семян (X1)*

Устанавливается оптимальная глубина заделки с учётом:

1) типа почвы (на связных суглинистых почвах — 1,5–2 см, на лёгких супесчаных — до 3 см) ;
2) размера и массы семян;
3) влажности почвы.

*Этап 10. Регулировка угла вхождения сошника (X3)*

Настройка угла обеспечивает:

1) качественное формирование борозды;
2) оптимальный контакт семян с почвой;
3) равномерную глубину заделки.

*Этап 11. Настройка прижимного усилия (X7)*

Регулируется прижимное усилие на сошник с использованием: пружин; гидроцилиндров; балласта.

Цель: обеспечение необходимой глубины заделки и оптимальной плотности почвы над семенами.

*Этап 12. Калибровка высевающих аппаратов (X8)*

Производится точная настройка высевающих аппаратов для соблюдения рассчитанной нормы высева (20–24 млн семян/га). Параметры калибровки:

1) равномерность подачи семян;
2) точность дозирования;
3) синхронизация с скоростью движения агрегата.

*Этап 13. Реализация посева*

После завершения всех подготовительных и настроечных этапов осуществляется непосредственный посев. Критерии успешного завершения: соблюдение всех агротехнических параметров; равномерность распределения семян; соответствие глубины заделки рекомендованным значениям; отсутствие технологических ошибок.

**Выводы.** В результате проведённой работы разработана блок-схема работы комбинированного сошника в системе «семена–сошник–почва», систематизирующая взаимодействие входных параметров (управляемых, таких как глубина заделки семян ($X_1$), скорость движения агрегата ($X_2$), угол вхождения сошника в почву ($X_3$), и неуправляемых — тип почвы ($M_1$), абсолютная влажность почвы ($M_2$)), центрального блока (технологические операции: открытие борозды, внесение удобрений, укладка семян, заделка семян и удобрений, формирование семенного ложа) и выходных показателей эффективности (откликов: глубина заделки семян ($Y_1$), всхожесть семян ($Y_2$), глубина заделки удобрений ($Y_3$), гребнистость ($Y_4$), отклонение от средней линии ($Y_5$)); создан алгоритм процесса посева льна-долгунца из 14 этапов (от планирования посева и проверки качества семян до реализации посева), решены задачи оптимизации настроек сеялки, повышения равномерности распределения семян (узкорядный способ посева с шириной междурядий 6,25–7,5 см), обеспечения заданной глубины заделки (1,5–3 см), минимизации повреждений посевного материала, сохранения оптимальных условий для прорастания, снижения тягового сопротивления агрегатов.

**Список использованных источников:**

1. Рула, Д. М. Обоснование параметров и режимов работы комбинированного сошника при возделывании мелкосеменных культур специальность 05.20.01Технологии и средства механизации сельского хозяйства автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Рула Денис Михайлович. – Москва, 2008. – 16 с. – EDN NKMFWR.

2. Фирсов, А. С. Параметры и режимы работы пневматического высевающего аппарата для льна специальность 05.20.01Технологии и средства механизации сельского хозяйства диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Фирсов Антон Сергеевич, 2016. – 142 с. – EDN PJIWBB.

3. Белякова, Е. С. Обоснование параметров и режимов работы сошника для мелкосеменных культур специальность 05.20.01Технологии и средства механизации сельского хозяйства диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Белякова Елена Сергеевна, 2021. – 210 с. – EDN BXIRZD.

4. Отраслевой регламент. Возделывание и уборка льна-долгунца. Типовые технологические процессы / РУП «Институт льна»; руководитель разработки: И. А. Голуб, академик НАН Беларуси; представители государственных заказчиков разработки: П. П. Казакевич, В. В. Гракун. — Минск: РУП «Институт льна», 2018. — 35 с. — УДК 633.521(083.74).

5. Фирсов, А. С. Методика и результаты лабораторных испытаний

льнотеребильной секции льноуборочного комбайна / А. С. Фирсов, А. В. Виноградов //Образование, инновации, цифровизация: взгляд регионов : сборник научных трудов по материалам Всероссийской (национальной) научно практическойконференции (Тверь, 2022). — Тверь : Издательство Тверской ГСХА, 2022 — С. 321–324. — УДК 631.358:633.521.

6. Firsov, A. S. Results of Testing a Disc Pneumatic Seed Drill for Flax / A. S. Firsov, M. V. Nikiforov, A. V. Kudryavtsev, A. S. Vasiliev, A. V. Dichensky, V. V. Golubev // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. — 2018 — Vol. 9, No. 11 — P. 1917–1925.

7. Никифоров, М. В. Выравнивающий рабочий орган сеялки : патент на полезную модель RU 181973 U1 / М. В. Никифоров, В. В. Голубев, А. С. Фирсов, А. В. Кудрявцев ; заявл. 02.04.2018 ; опубл. 30.07.2018

**Bibliography:**

1. Rula, D. M. Justification of parameters and modes of operation of a combined coulter in the cultivation of small-seed crops. Speciality 05.20.01 Technologies and means of agricultural mechanization. Abstract of the thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences / Rula Denis Mikhailovich. – Moscow, 2008. – 16 p. – EDN NKMFWR.

2. Firsov, A. S. Parameters and Operating Modes of a Pneumatic Seeding Apparatus for Flax. Speciality 05.20.01 Technologies and Means of Agricultural Mechanization. Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences / Firsov Anton Sergeevich, 2016. – 142 p. – EDN PJIWBB.

3. Belyakova, E. S. Justification of the parameters and modes of operation of the coulter for small-seeded crops. Speciality 05.20.01 Technologies and means of agricultural mechanization. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Belyakova Elena Sergeevna, 2021. – 210 p. – EDN BXIRZD.

4. Industry regulations. Cultivation and harvesting of flax. Standard technological processes / RUE "Flax Institute"; development manager: I. A. Golub, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus; representatives of the state customers of the development: P. P. Kazakevich, V. V. Grakun. — Minsk: RUE "Institute of Flax", 2018. — 35 p. — UDC 633.521(083.74).

5. Firsov, A. S. Methodology and results of laboratory tests of the flax-threshing section of a flax harvester / A. S. Firsov, A. V. Vinogradov //Education, Innovation, Digitalization: A Regional Perspective : Collection of Scientific Papers based on the materials of the All-Russian (National) Scientific and Practical Conference (Tver, 2022). Tver : Publishing House of the Tver State Agricultural Academy, 2022 — pp. 321-324. — UDC 631.358:633.521.

6. Firsov, A. S. Results of Testing a Disc Pneumatic Seed Drill for Flax / A. S. Firsov, M. V. Nikiforov, A.V. Kudryavtsev, A. S. Vasiliev, A.V. Dichensky, V. V. Golubev // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. — 2018 — Vol. 9, No. 11 — P. 1917–1925.

7. Nikiforov, M. V. Leveling Working Body of a Seeder : Patent for a Useful Model RU 181973 U1 / M. V. Nikiforov, V. V. Golubev, A. S. Firsov, A. V. Kudryavtsev ; applied on 02.04.2018 ; published on 30.07.2018

*Клюева Карина Юрьевна соискатель кафедры ТТМиК, преподаватель кафедры ФМДиИТ, ФГБОУ ВО Тверская ГСХА, carina.2h@yandex.ru, студентка 1 курса направления: Агроинженерия профиль: Технические системы в агробизнесе ФГБОУ ВО Тверская ГСХА, Kkhramtzova@yandex.ru*

# BLOCK DIAGRAM OF A COMBINED SOWER IN THE SEED-SOWER-SOIL SYSTEM

Klyueva K.Yu., Khramtsova E.Yu.

Abstract: The paper presents a block diagram reflecting the influence of controlled and uncontrolled factors on the operation of the combined coulter in the seeds–coulter–soil system when sowing flax – from input parameters to output indicators. The analysis of factors allows to optimize the sowing process and increase its efficiency. The uncontrolled factors include: the type of soil (clay, loamy, etc.), its humidity, air and soil temperature, field relief, and the presence of plant remains. These conditions are naturally set and require adaptation of equipment and technology. Controllable factors include: the speed of movement of the unit, the depth of seed embedding, the seeding rate, the angle of attack of the coulter, the coulter pressure on the soil, and the setting of the metering system. Their targeted adjustment ensures that the targets are achieved. The flowchart clearly demonstrates the cause-and-effect relationships: how the input parameters affect the output indicators through the process of the lancet operation: uniformity of seed distribution, depth of embedding, germination, plant density, time of emergence of seedlings, energy consumption per hectare. The results of the work are applicable for agronomists and machine operators in planning and performing the sowing of flax, as well as for agricultural machinery designers in improving lancets.

Keywords: flowchart, lancet, working body, small-seed crops, flax.

*Klyueva Karina Yurievna, Applicant of the Department of TTM and K, Lecturer of the Department of FM and IT, Tver State Agricultural Academy, carina.2h@yandex.ru, 1st year student of the Department of Agroengineering, profile: Technical Systems in Agrobusiness, Tver State Agricultural Academy, Kkhramtzova@yandex.ru*

**УДК 512**

# РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ МЕТОДОМ ЦЕПНЫХ ДРОБЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И ЯЗЫКА Python

В.В. Фриск[1], А.В. Виноградов[2,3]

[1]ФГБОУ ВО Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ)
[2]ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А, Тимирязева
[3]ФГБОУ ВО Орловский ГАУ

***Аннотация.*** *В работе рассматривается подход к решению квадратных уравнений с помощью метода цепных дробей, реализованный на языке Python с использованием технологий искусственного интеллекта. Предложенный алгоритм позволяет не только находить корни уравнений, но и анализировать их структуру, выявляя закономерности в зависимости от коэффициентов уравнения. Интеграция ИИ обеспечивает адаптивность метода, автоматический выбор стратегии вычислений и визуализацию процесса решения. Практическая реализация на Python демонстрирует эффективность подхода, открывая новые возможности для образовательных и исследовательских задач в области математики и информатики. Цель настоящей работы состоит в разработке компьютерной программы на языке Python, реализующей алгоритм перевода исходного квадратного уравнения в соответствующую цепную дробь. Эта программа должна уметь автоматически находить рациональные приближения корней уравнения путём анализа элементов цепной дроби. Алгоритм включает этап предварительной обработки уравнения, получение необходимой формы представления и применение цепных дробей для нахождения корней.*

***Ключевые слова:*** *квадратное уравнение, кубическое уравнение, коэффициенты уравнения, корни квадратного уравнения, теорема Виета, приведённое квадратное уравнение, цепная дробь Python, подходы к обучению, закономерности, формы представления информации, обучение.*

**Введение.** Решение уравнений, в том числе квадратных, кубических, является одной из базовых областей математики. Умение нахождения корней позволяет решать практические задачи анализа функций, например, искать корни регрессионных уравнений статистических зависимостей. Поэтому в процессе обучения школьников и студентов этому уделяется большое внимание, ведётся поиск новых методик обучения, новых подходов к решению уравнений [1, 2, 3]. Развитие методов машинного обучения, искусственного интеллекта, программных средств позволяет автоматизировать процесс решения многих практических задач в разных сферах [5]. В качестве языка программирования часто применяется Python ввиду достаточной его простоты и широкой функциональности [4]. Электротехника, теория электрических цепей является областью, требующей навыков решения уравнений, так как изучает множество различных зависимостей, в том числе степенных [6, 7, 8]. Даже известный всем закон Ома в свете применения методов программирования, искусственного интеллекта может предстать в новом свете [9].

Новые подходы могут обнаруживаться и в решении таких классических задач, как решение квадратных, кубических и других степенных уравнений. Одним из классических способов нахождения решений квадратных уравнений является использование формулы дискриминанта и выделение полных квадратов. Однако существует альтернативный путь, связанный с представлением уравнения в виде цепной дроби. Методы цепных дробей известны в целом и применяются в различных задачах математики [10, 11]. Как покажет материал данной статьи, метод цепных дробей позволит решать некоторые классы уравнений необычным способом, сочетающим методы алгебры и теории чисел.

Цель настоящей работы состоит в разработке компьютерной программы на языке Python, реализующей алгоритм перевода исходного квадратного уравнения в соответствующую цепную дробь. Эта программа должна уметь автоматически находить рациональные приближения корней уравнения путём анализа элементов цепной дроби. Алгоритм включает этап предварительной обработки уравнения, получение необходимой формы представления и применение цепных дробей для нахождения корней.

Особое внимание уделяется применению методов машинного обучения для оптимизации процесса вычисления, повышения точности результатов и минимизации вычислительных затрат.

**Материалы и методы исследования.** В качестве материала исследования рассмотрено представление приведённых квадратных уравнений в традиционной форме. В качестве методов исследования использованы методы программирования в среде Python, методы разложения в цепную дробь.

**Результаты и обсуждение.** Рассмотрим общий вид приведённого a=1 квадратного уравнения (1).

$$x^2+bx+c=0, \quad (1)$$

где $b$ и $c$ -коэффициенты квадратного уравнения (1), целые числа, $a$=1, $x$>0. Предположим, что корни уравнения являются целыми числами.

Метод цепных дробей основан на том, что каждому решению такого уравнения можно поставить в соответствие простую дробь вида A/B и если эту дробь разложить в цепную дробь, то её коэффициенты будут числено равны корням данного квадратного уравнения.

Так что коэффициенты этой дроби будут совпадать с корнями уравнения. Для примера решим уравнение:

$$x^2+4x-4=0. \quad (2)$$

Корень этого уравнения найдём с помощью программы №1, хотя их можно легко найти и в ручной, применив теорему Виета [12] (x1=2, x2=2), однако рассмотрим автоматизацию процесса на примере программного кода.

***Программа 1: Метод выделения квадрата двучлена***

```
# Решение квадратного уравнения:
#Online Python
import mat1
def solve_quadratic(a, b, c):
   # Вычисляем дискриминант
   D = b**2 - 4*a*c
      if D >= 0:
      # Корни уравнения
      root1 = (-b + math.sqrt(D)) / (2 * a)
      root2 = (-b - math.sqrt(D)) / (2 * a)
```

```
        return root1, root2
    else:
        print("Нет действительных корней.")
        return None, None
# Пример уравнения
a = 1
b = -4
c = 4
root1, root2 = solve_quadratic(a, b, c)
print(f"Корни уравнения {a}x^2 + ({b})x + {c} = 0:")
if root1 is not None and root2 is not None:
print(f"Корень 1: {root1}, Корень 2: {root2}")
```

**Ответ:**

Корни уравнения 1x^2 + (-4)x + 4 = 0:

Корень 1: 2.0, Корень 2: 2.0

Мы убедились, что корни кратные. Применённая программа решает заданное уравнение традиционным способом, находя корни посредством стандартной формулы. Ниже мы покажем, как реализовать решение методами цепных дробей. Для лучшего понимания проведем визуализацию, построив график (рисунок 1) решённого квадратного уравнения (2).

***Программа 2 График квадратичной функции***

```
 # График, корни кратные
 #Online Python
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
# Исходные данные
a = 1       # Коэффициент при x^2
b = -4      # Коэффициент при x
c = 4       # Свободный член
# Диапазон изменения x от 0 до 4
x = np.linspace(0, 4, 400)
# Формула функции
y = a * x**2 + b * x + c
# Нахождение корней уравнения
roots = np.roots([a, b, c])
real_roots = roots[np.isreal(roots)].real  # Только вещественные корни
# График функции
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.title(f'График и исходные данные: a={a}, b={b}, c={c}', fontsize=14)
# Парабола
plt.plot(x, y, label=f'$y(x) = {a}x^2 + {b}x + {c}$')
# Обработка корней
if len(real_roots) >= 1:
    sorted_roots = np.sort(real_roots)  # Сортируем корни по возрастанию
        # Создаем список точек и соответствующих аннотаций
    points_to_plot = []
    labels = []
```

```
        if len(sorted_roots) == 1 or sorted_roots[0] == sorted_roots[-1]:
        # Если корни одинаковы (кратный корень)
        points_to_plot.append((sorted_roots[0], 0))  # Одну точку ставим прямо на ось
        labels.append("x1   x2")             # Одна метка для общего корня
    else:
        # Если два разных корня
        for idx, root in enumerate(sorted_roots):
            points_to_plot.append((root, 0))  # Ставим точки прямо на оси
            labels.append(rf'$\mathbf{{{x_{idx+1}}}}$')  # Подпись зависит от индекса корня

    # Рисуем точки и аннотации
    for point, label in zip(points_to_plot, labels):
        plt.scatter(point[0], point[1], color="red", s=80, zorder=5)
        plt.text(point[0], 0.5, label, ha='center', va='bottom', size=14, weight='bold', color='red')
# Оформление графика
plt.axhline(y=0, color='black')   # Горизонтальная ось
plt.axvline(x=0, color='black') # Вертикальная ось
plt.grid(True)                  # Включаем сетку
plt.xlabel('$x$', fontsize=12)
plt.ylabel('$y(x)$', fontsize=12)
plt.legend(loc='upper right')   # Легенда сверху справа
plt.xlim(0, 4)                # Границы по оси X
plt.ylim(-1, 5)               # Границы по оси Y
 plt.show()
```

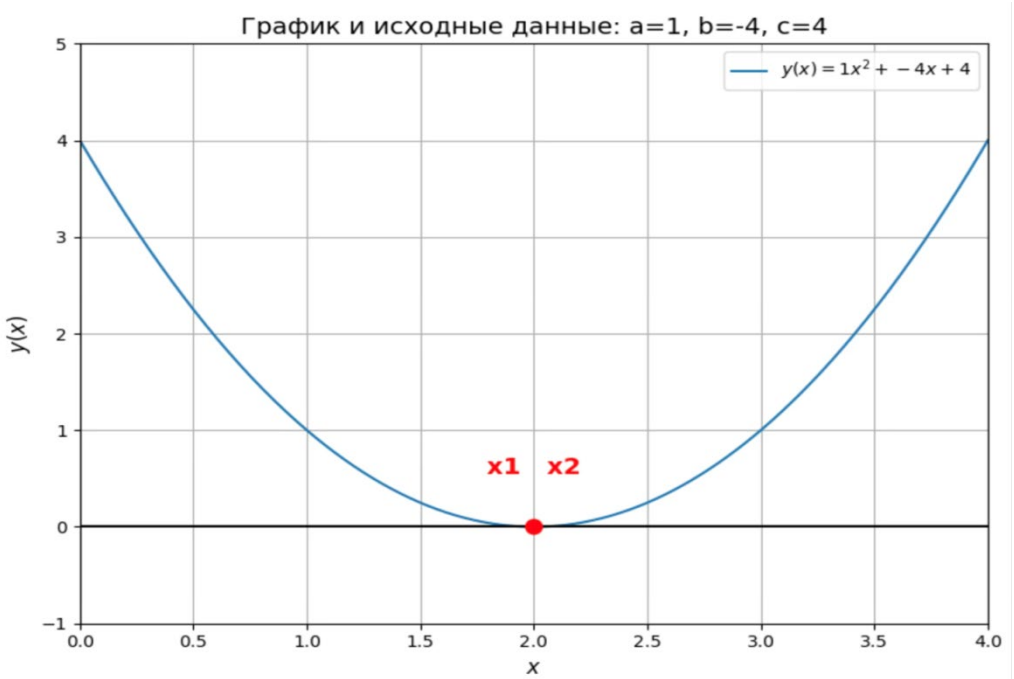



Рисунок 1 – График функции с совпадающими корнями.

Из графика видно, что корни в этом случае кратные. На графике показана точка касания параболы с осью икс. Можно сказать, что точки корней наложились друг на друга поскольку корни равны по величине между собой.

Изменим коэффициент уравнения на c=3. Получим следующее решение:

***Ответ при c=3***

Корни уравнения 1x^2 + (-4)x + 3 = 0:

Корень 1: 3.0, Корень 2: 1.0

Этот расчёт показал, что корни разные.

**Метод цепной дроби**

Для решения приведённых квадратных уравнений воспользуемся методом цепной дроби.

Найдём корни уравнения (1) методом цепной дроби и сравним их с ранее полученными по программе №1.

***Программа 3 Метод цепной дроби***

```
# Решение методом цепной дроби
# Python

import math
# Коэффициенты приведённого квадратного уравнения
a = 1.     # Всегда =1
b = -4
c = 4
# Второй корень (>=) приведённого квадратного уравнения
x2 = 2
# Метод цепной дроби
A = int(c + 1)к
B = int(x2)
# Коэффициенты Цепной дроби
a0 = A//B
a1 = B
X = [a0, a1]
print(". Исходное приведённое квадратное уравнение")
print("x^2 + (", b, ")x +", c, " = 0")
print()
print("  Решение методом цепной дроби:")
print()
print("A =", A)
print("B =", B)
print()
print("  Простая дробь в соответствие квадратному уравнению")
print("A/B =",A,"/",B)
print()
# Цепная дробь
print("  Разложение в цепную дробь")
print("A/B =", a0, "+ 1/", a1)
print()
print("  Коэффициенты цепной дроби")
print("a0 =", a0)
print("a1 =", a1)
# Итоговый ответ
```

```
print("\n     Ответ:")
print("Корни квадратного уравнения:")
print("     [x1; x2] =", X
)
print()
```

**Ответ:**

Исходное приведённое квадратное уравнение

x^2 + ( -4 )x + 4 = 0

Решение методом цепной дроби:

A = 5

B = 2

Простая дробь в соответствие квадратному уравнению: A/B = 5 / 2.

Разложение в цепную дробь: A/B = 2 + 1/ 2.

Коэффициенты цепной дроби: a0 = 2; a1 = 2.

Ответ: Корни квадратного уравнения: [x1; x2] = [2, 2].

Вывод: Корни уравнения (1) полученные разными методами, совпадают.

Заменим величину свободного члена уравнении (1) на c=3.

Получим уравнение (2):

$$1x^2 - 4x + 3 = 0. \qquad (2)$$

Коэффициенты уравнения будут иметь вид: a = 1; b = -4; c = 3; x2=3.

В результате получим расчёт корней данного уравнения (2) методом цепной дроби.

***Ответ:***

Исходное приведённое квадратное уравнение:

x^2 + ( -4 )x + 3 = 0.

Решение методом цепной дроби: A = 4, B = 3.

Простая дробь в соответствие квадратному уравнению: A/B = 4 / 3.

Разложение в цепную дробь: A/B = 1 + 1/ 3

Коэффициенты цепной дроби: a0 = 1; a1 = 3.

Корни квадратного уравнения: [x1; x2] = [1, 3].

Корни, полученные разными методами, совпали.

С помощью программы №4 построим график квадратичной функции решённого уравнения (2) (рисунок 2).

***Программа 4***

```
 # Парабола с разными корнями
 #Online Python

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
# Исходные данные
a = 1       # Коэффициент при x^2
b = -4      # Коэффициент при x
c = 3       # Свободный член
# Диапазон изменения x от 0 до 4
x = np.linspace(0, 4, 400)
# Формула функции
y = a * x**2 + b * x + c
```

```
# Нахождение корней уравнения
roots = np.roots([a, b, c])
real_roots = roots[np.isreal(roots)].real  # Только вещественные корни

# График функции
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.title(f'График и исходные данные: a={a}, b={b}, c={c}', fontsize=14)
# Формируем правильное выражение в легенде
legend_label = f'$y(x) = {a}x^2'
if b != 0:
    sign_b = '+' if b > 0 else '-'
    abs_b = abs(b)
    legend_label += f' {sign_b} {abs_b}x'
if c != 0:
    sign_c = '+' if c > 0 else '-'
    abs_c = abs(c)
    legend_label += f' {sign_c} {abs_c}'
legend_label += '$'
# Парабола
plt.plot(x, y, label=legend_label)
# Обработка корней
if len(real_roots) >= 1:
    sorted_roots = np.sort(real_roots)  # Сортируем корни по возрастанию

    # Создаем список точек и соответствующих аннотаций
    points_to_plot = []
    labels = []

    if len(sorted_roots) == 1 or sorted_roots[0] == sorted_roots[-1]:
        # Если корни одинаковые (двойной корень)
        points_to_plot.append((sorted_roots[0], 0))  # Одну точку ставим прямо на ось
        labels.append("x1   x2")                  # Одна метка для общего корня
    else:
        # Если разные корни
        for idx, root in enumerate(sorted_roots):
            points_to_plot.append((root, 0))  # Ставим точки прямо на оси
            labels.append(rf'$\mathbf{{x_{idx+1}}}$')  # Подпись зависит от индекса корня

    # Рисуем точки и аннотации
    for point, label in zip(points_to_plot, labels):
        plt.scatter(point[0], point[1], color="red", s=80, zorder=5)
        plt.text(point[0], 0.5, label, ha='center', va='bottom', size=14, weight='bold', color='red')
# Оформление графика
plt.axhline(y=0, color='black')   # Горизонтальная ось
plt.axvline(x=0, color='black') # Вертикальная ось
```

```
plt.grid(True)                  # Включаем сетку
plt.xlabel('$x$', fontsize=12)
plt.ylabel('$y(x)$', fontsize=12)
plt.legend(loc='upper right')   # Легенда сверху справа
plt.xlim(0, 4)                  # Границы по оси X
plt.ylim(-1, 5)                 # Границы по оси Yplt.show()
 plt.show()
```

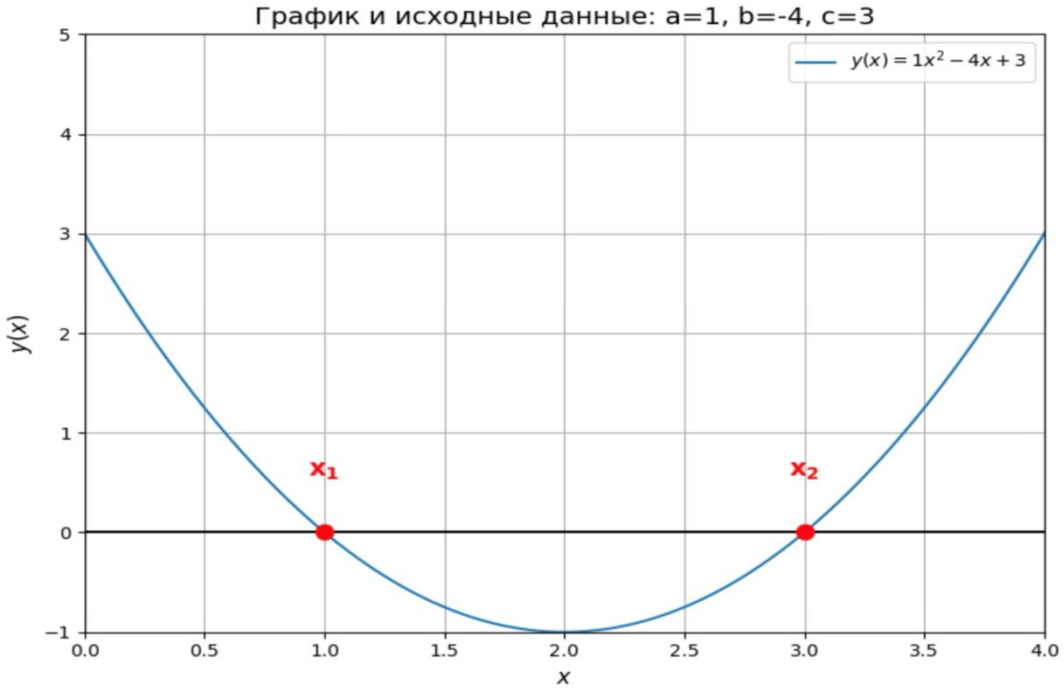



Рисунок 2 – График квадратного уравнения с разными корнями

**Кубическое уравнение**

Покажем, что метод цепной дроби можно распространить и на кубические уравнения. Рассмотрим пример. Найдём корни кубического уравнения (3).

$$1x^3 + (-6)x^2 + (11)x + (-6)) = 0. \quad (3)$$

***Программа 5. Решеение кубического приведённого уравнения методом цепной дроби***

```
# Цепная дробь и кубическое уравнение
# Python

import math
# Коэффициенты приведённого квадратного уравнения
a = 1    # Всегда =1
b = -6
c = 11
d = -6
# Второй корень (>=) приведённого квадратного уравнения
x1 = 1
x2 = 2
# x3 = 3

# Метод цепной дроби
A = int(-d - b - x2)
```

```
B = int(-d/x1 + 1)

# Коэффициенты Цепной дроби
a0 = A//B
a1 = B//(A%B)
a2 = (A - a0 * B) // (B - a1 * (A - a0 * B))

X = [a0, a1, a2]

print(". Исходное приведённое кубическое уравнение")
print(f"{a}x³ + ({b})x² + ({c})x + ({d}) = 0")

print()
print("  Решение методом цепной дроби:")
print()
print("A =", A)
print("B =", B)
print()
print("  Простая дробь в соответствие кубическому уравнению")
print("A/B =",A,"/",B)
print()
# Цепная дробь
print("  Разложение в цепную дробь")

print("A/B=", a0, "+ 1/(", a1, " + 1/", a2)
print()
print("  Коэффициенты цепной дроби")
print("a0 =", a0)
print("a1 =", a1)
print("a2 =", a2)
# Итоговый ответ
print("    Ответ:")
print("Корни кубического уравнения:")
print("     [x1; x2; x3] =", X)
print()
```

***Ответ:***

Исходное приведённое кубическое уравнение: $1x^3 + (-6)x^2 + (11)x + (-6) = 0$.

Решение методом цепной дроби: A = 10; B = 7.

Простая дробь в соответствие кубическому уравнению: A/B = 10 / 7.

Разложение в цепную дробь: A/B= 1 + 1/2  + 1/ 3.

Коэффициенты цепной дроби: a0 = 1; a1 = 2; a2 = 3.

Корни кубического уравнения: [x1; x2; x3] = [1, 2, 3]

Для визуальной проверки расчёта корней методом цепной дроби построим график (рисунок 3) кубической функции решённого уравнения.

***Программа 6***

```
# График кубической функции
#  Online Python
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# 1. Задаём функцию
def y(x):
    return x**3 - 6*x**2 + 11*x - 6

# 2. Создаём массив значений x
x = np.linspace(0, 4, 400)

# 3. Вычисляем значения y
y_values = y(x)

# 4. Определяем корни уравнения (аналитически: 1, 2, 3)
roots = [1, 2, 3]
y_roots = [y(r) for r in roots] # все равны 0

# 5. Строим график
plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.plot(x, y_values, label='$y = x^3 - 6x^2 + 11x - 6$', color='blue')

# 6. Отмечаем корни большими красными точками
plt.scatter(roots, y_roots, color='red', s=100, zorder=5, label='Корни уравнения')

# 7. Добавляем текстовые подписи над точками
for i, x_root in enumerate(roots):
    plt.text(x_root, 0.5, f'$x_{i+1}$',
             fontsize=12,
             color='red',
             ha='center',
             va='bottom')

# 8. Оформление графика
plt.title('График функции $y = x^3 - 6x^2 + 11x - 6$')
plt.xlabel('x')
plt.ylabel('y')
plt.grid(True, which='both', linestyle='--', linewidth=0.5)
plt.axhline(0, color='black', linewidth=0.8)
plt.axvline(0, color='black', linewidth=0.8)
plt.legend(loc='upper left')

# 9. Показываем график
plt.show()
```

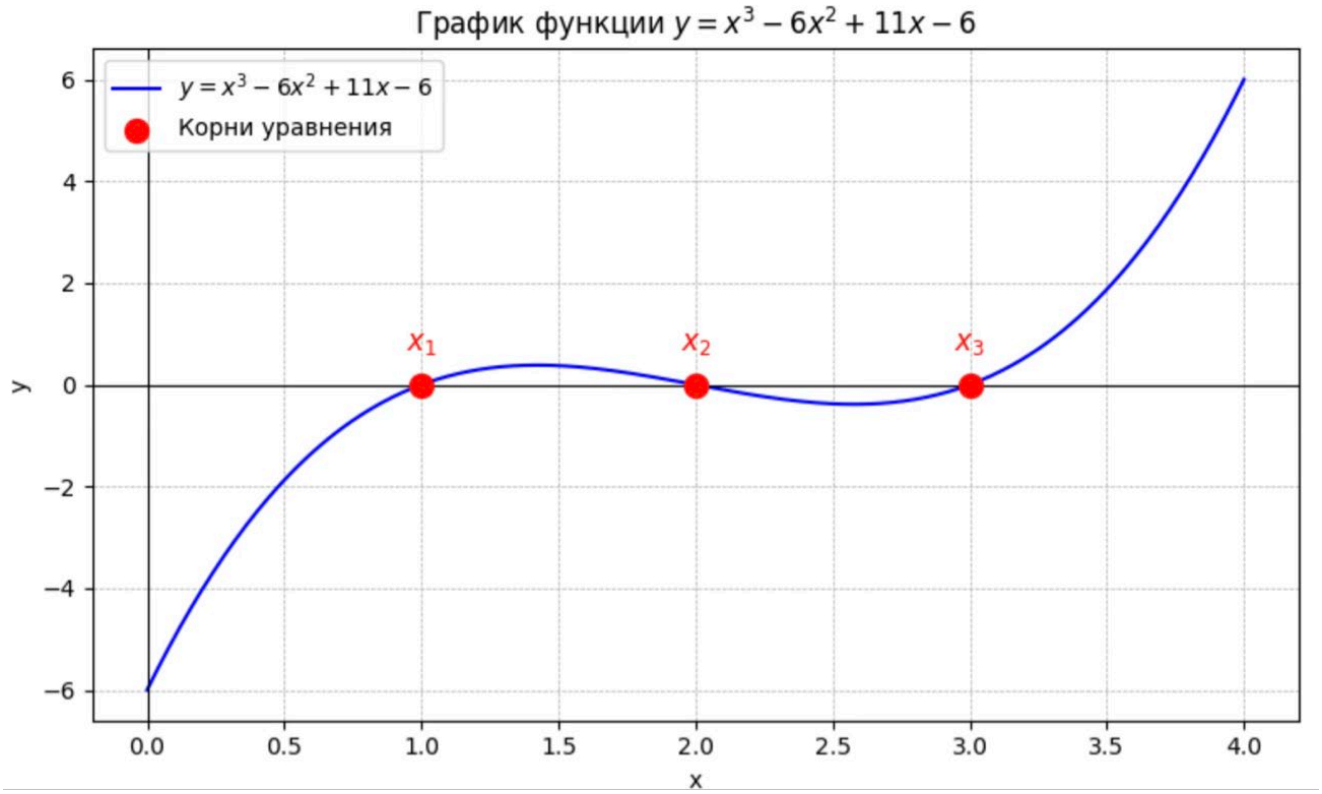



Рисунок 3 – График кубического уравнения с разными корнями

На рисунке 4 показан метод решения уравнений методом цепной дроби в виде направленного графа.

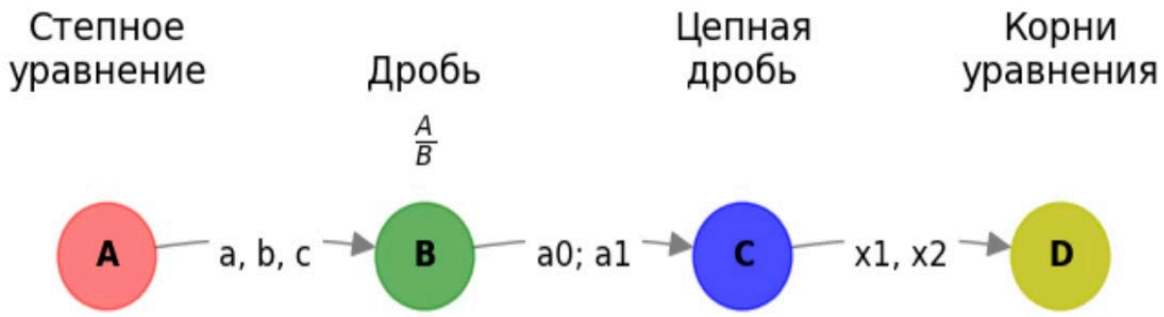



Рисунок 4 – Алгоритм метода цепной дроби для решения квадратных уравнений в виде графа

**Заключение.**

Подача материала при обучении и решении конкретных задач может быть различной и может влиять на ожидаемый результат. Предлагаемый подход применения цепной дроби для нахождения корней квадратных и кубических уравнений позволяет в одном вычислительном процессе сразу вычислить все корни уравнения. Представленный подход демонстрирует новый взгляд на решение квадратных уравнений, расширяя традиционные методики добавлением новых инструментов теории чисел и возможностей современного программирования. Применение

цепных дробей позволяет получать точные приближения даже сложных иррациональных корней, повышая точность вычислений и открывая перспективы для дальнейшего развития теоретико-математического аппарата.

Использование искусственного интеллекта и специализированных библиотек Python значительно повышает удобство реализации и доступность предлагаемого метода для широкого круга пользователей.

**Список использованных источников:**


1. Ващенко, Г. В. Вычислительная математика. Основы конечных методов решения систем линейных алгебраических уравнений / Г. В. Ващенко // Современные проблемы науки и образования. – 2009. – № 1. – С. 54. – EDN JUBJRY.
2. Комили, А. Ш. К вопросу решения задач методом составления квадратных уравнений / А. Ш. Комили, М. Хакимов // Наука и образование: новое время. – 2016. – № 6(17). – С. 91-95. – EDN XIRFNN.
3. Галимова, А. А. О нестандартных методах решения квадратных уравнений / А. А. Галимова // Педагогический форум. – 2024. – № 1(13). – С. 26-30. – EDN WIPYKM.
4. Шакин В . Н ., Загвоздкина А . В ., Мацкевич А . Г. Символьные математические вычисления средствами SymPy Python. Учебное пособие для вузов. - М .: Горячая линия Телеком , 2024. - 320 с.
5. Деникин, А. А. Человеко-машинные взаимодействия и искусственный интеллект: к новому пониманию алгоритмических коммуникаций / А. А. Деникин // Социология науки и технологий. – 2024. – Т. 15, № 4. – С. 67-82. – DOI 10.24412/2079-0910-2024-4-67-82. – EDN WYOYUX.
6. Фриск В. В. Основы теории цепей. – М.: РадиоСофт, 2002. – 288 с.
7. Смирнов Н. И., Фриск В. В. Теория электрических цепей. Учебник для вузов. – М.: Горячая линия - Телеком, 2019. – 286 с..
8. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи.: учебник / 11-е изд., перераб. и доп. —М.: Гардарики, 2007. — 701 с.
9. Фриск В.В., Виноградов А.В. Крутые повороты закона Ома в свете естественного и искусственного интеллекта. Агротехника и энергообеспечение. – 2026. – №1 (50). – С. 91-101.
10. Ерохов, И. В. Метод Гаусса и решение систем уравнений с помощью цепных дробей / И. В. Ерохов // Синтез, анализ и диагностика электронных цепей : международный сборник научных трудов / Ульяновский государственный технический университет. Том Выпуск 13. – Ульяновск : Ульяновский Государственный Технический Университет, 2016. – С. 236-244. – EDN XVPHNF.
11. Парфенов, И. И. Цепные дроби - перспективный математический аппарат анализа и синтеза человеко-машинной системы / И. И. Парфенов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2006. – № 12. – С. 45-51. – EDN KVFFLH.
12. Полозов, Я. В. Усовершенствование теоремы Виета. «Схема Полозова» / Я. В. Полозов // Научное обозрение. Серия 2: Гуманитарные науки. – 2024. – № 9. – С. 146-158. – DOI 10.26653/2076-4685-2024-09-15. – EDN DGFGFT.


**Bibliography:**


1. Vashchenko, G. V. Computational mathematics. Fundamentals of finite methods for solving systems of linear algebraic equations / G. V. Vashchenko // Modern problems of science

and education. – 2009. – No. 1. – P. 54. – EDN JUBJRY.

2. Komili, A. S. On the issue of solving problems by the method of composing quadratic equations / A. S. Komili, M. Khakimov // Science and education: modern times. – 2016. – № 6(17). – Pp. 91-95. – EDN XIRFNN.

3. Galimova, A. A. On non-standard methods for solving quadratic equations / A. A. Galimova // Pedagogical Forum. – 2024. – № 1(13). – Pp. 26-30. – EDN WIPYKM.

4. Shakin V. N., Zagozdkina A. V., Matskevich A. G. Symbolic mathematical calculations using SymPy Python. Textbook for universities. Moscow: Telecom Hotline , 2024. 320 p .

5. Denikin, A. A. Human-machine interactions and artificial intelligence: towards a new understanding of algorithmic communications / A. A. Denikin // Sociology of Science and Technology. – 2024. – Vol. 15, No. 4. – PP. 67-82. – DOI 10.24412/2079-0910-2024-4-67-82. – EDN WYOYUX.

6. Frisk V. V. Fundamentals of circuit theory. Moscow: RadioSoft, 2002. 288 p.

7. Smirnov N. I., Frisk V. V. Theory of electrical circuits. Textbook for universities. Moscow: Hotline - Telecom, 2019. 286 p.

8. Bessonov, L. A. Theoretical foundations of electrical engineering. Electrical circuits.: textbook / 11th ed., revised. and add. —M.: Gardariki, 2007. — 701 p.

9. Frisk V.V., Vinogradov A.V. Sharp turns of Ohm's law in the light of natural and artificial intelligence. Agricultural machinery and energy supply. – 2026. – №1 (50). – Pp. 91-101.

10. Erokhov, I. V. The Gauss method and the solution of systems of equations using continued fractions / I. V. Erokhov // Synthesis, analysis and diagnostics of electronic circuits : an international collection of scientific papers / Ulyanovsk State Technical University. Volume Issue 13. – Ulyanovsk : Ulyanovsk State Technical University, 2016. – pp. 236-244. – EDN XVPHNF.

11. Parfenov, I. I. Chain fractions - a promising mathematical apparatus for the analysis and synthesis of a human-machine system / I. I. Parfenov // Mechatronics, automation, control. - 2006. – No. 12. – pp. 45-51. – EDN KVFFLH.

12. Polozov, Ya. V. Improvement of Vieta's theorem. "Polozov's scheme" / Ya. V. Polozov // Scientific review. Series 2: Humanities. – 2024. – No. 9. – pp. 146-158. – DOI 10.26653/2076-4685-2024-09-15. – EDN DGFGFT.

***Фриск Валерий Владимирович**, Россия, кандидат технических наук, Московский технический университет связи и информатики, e-mail: frisk@mail.ru,*
*Виноградов Александр Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение и теплоэнергетика», РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 127434, г. Москва, улица Тимирязевская, д.49; профессор кафедры «Электроснабжение» ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69; Тел. 8(920)2879024 e-mail: winaleksandr@gmail.com.* ORCID 0000-0002-8845-9718

SOLVING EQUATIONS USING CONTINUED FRACTIONS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND PYTHON

V.V. Frisk[1], A.V. Vinogradov[2,3]

[1]FGBOU HE Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI)
[2]FGBOU HE RGAU-Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev
[3]FGBOU IN Oryol State Agrarian University

Annotation. The paper considers an approach to solving quadratic equations using the method of continued fractions, implemented in Python using artificial intelligence technologies. The proposed algorithm allows not only to find the roots of the equations, but also to analyze their structure, revealing patterns depending on the coefficients of the equation. The integration of AI ensures the adaptability of the method, automatic selection of the calculation strategy and visualization of the solution process. The practical implementation in Python demonstrates the effectiveness of the approach, opening up new opportunities for educational and research tasks in the field of mathematics and computer science. The purpose of this work is to develop a Python computer program that implements an algorithm for translating an initial quadratic equation into a corresponding continued fraction. This program should be able to automatically find rational approximations of the roots of an equation by analyzing the elements of a continued fraction. The algorithm includes a stage of preprocessing the equation, obtaining the necessary form of representation and using continued fractions to find the roots. Keywords: quadratic equation, cubic equation, coefficients of the equation, roots of the quadratic equation, Vieta's theorem, reduced quadratic equation, Python continued fraction, learning approaches, patterns, forms of information representation, learning.

*Frisk Valery Vladimirovich, Russia, Candidate of Technical Sciences, Moscow Technical University of Communications and Informatics, e-mail: frisk@mail.ru,*
*Vinogradov Alexander Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of "Electricity Supply and Thermal Power Engineering", K.A. Timiryazev Russian State Agricultural Academy, 127434, Moscow, Timiryazevskaya Street, 49; Professor of the Department of "Electricity Supply", Oryol State Agrarian University, 69 Generala Rodina str., Orel, 302019; Tel. 8(920)2879024 e-mail: winaleksandr@gmail.com, ORCID 0000-0002-8845-9718*

**УДК 349.6:621.316**

# ЮРИДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕДАЧИ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО ХОЗЯЙСТВА САДОВОДЧЕСКИХ НЕКОММЕРЧЕСКИХ ТОВАРИЩЕСТВ В ТЕРРИТОРИАЛЬНЫЕ СЕТЕВЫЕ ОРГАНИЗАЦИИ

Алимов Р.Р.

ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия

***Аннотация.*** *Цель исследования – системный анализ правового режима имущества общего пользования садоводческих некоммерческих товариществ (СНТ) и юридических механизмов передачи объектов электросетевого хозяйства (ОЭСХ) в территориальные сетевые организации (ТСО) с оценкой тарифных последствий. Методология основана на формально-юридическом и сравнительно-правовом методах, а также анализе правоприменительной практики. Передача ОЭСХ возможна исключительно добровольно. Для сетей в долевой собственности членов СНТ недостаточно решения общего собрания – требуется согласие всех сособственников либо предварительная консолидация права на товарищество. ТСО обязана соответствовать критериям Постановления № 184 (трансформаторная мощность от 10 МВА, линии не менее двух уровней напряжения). После передачи расходы на эксплуатацию изношенных сетей включаются в тариф на передачу и распределяются на всех потребителей региона, прекращая бремя содержания для членов СНТ. Сделан вывод о необходимости совершенствования механизма консолидации прав на сети в СНТ.*

***Ключевые слова:*** *садоводческое некоммерческое товарищество, территориальная сетевая организация, объекты электросетевого хозяйства, имущество общего пользования, безвозмездная передача, тарифное регулирование.*

## Введение

Объекты электросетевого хозяйства садоводческих некоммерческих товариществ (СНТ) на протяжении длительного времени находятся в неудовлетворительном техническом состоянии. Отраслевые исследования показывают, что доля сетей СНТ с уровнем износа свыше 60% достигает 40–45%, что создаёт значительные риски технологических нарушений и аварийных отключений. Указанное обстоятельство обусловлено объективными факторами: электросетевое хозяйство товариществ создавалось в советский и постсоветский периоды по остаточному принципу, не получало систематического технического обслуживания и достаточного финансирования на капитальный ремонт. По данным отраслевой статистики, более 50% аварийных отключений в сельских электрических сетях вызвано повреждениями на оборудовании, находящемся в зоне ответственности потребителей, что косвенно подтверждает критическое состояние внутрисадовых сетей.

Кроме технических проблем, существуют и сложности правового характера. По данным Минэнерго России, из более чем 70 тыс. СНТ, действующих на территории Российской Федерации, лишь незначительная часть смогла осуществить успешную передачу своих объектов электросетевого хозяйства в собственность профессиональным сетевым организациям. Основным препятствием, как указано в обобщении практики Минэнерго от 17 мая 2024 г. № СЦ-7719/07 [4], являются сложности, связанные с оформлением прав на

имущество общего пользования, в особенности при долевой собственности членов товарищества, а также отсутствие единой воли всех заинтересованных лиц.

Между тем законодателем последовательно создаётся правовой механизм, направленный на консолидацию электросетевых активов и передачу объектов СНТ профессиональным участникам рынка. Федеральный закон № 217-ФЗ от 29.07.2017 [5] прямо предусматривает такую возможность, а Правительство РФ устанавливает критерии, которым должна соответствовать принимающая организация (Постановление № 184 [7]). Минэнерго России выпустило развёрнутые рекомендации по порядку передачи сетей – сначала в 2017 году (письмо № АН-9414/09 [9]), а затем в 2024 году (письмо № СЦ-7719/07 [4]), которые существенно детализировали процедуру.

Настоящая работа посвящена комплексному анализу правового режима имущества общего пользования СНТ, этапов передачи ОЭСХ в ТСО и тарифных последствий такой передачи, а также выявлению основных правовых барьеров и способов их преодоления.

**Обзор литературы**

Проблема передачи электросетевого имущества СНТ в профессиональные сетевые организации практически не получила отражения в отечественной научной литературе. Тем не менее отдельные смежные аспекты рассматриваются в работах исследователей из сферы агроинженерии и электроэнергетики.

Так, в работах Виноградова А.В., Лансберга А.А., Виноградовой А.В. дан анализ конфигурационных характеристик сельских электрических сетей 0,4 кВ [1], изучены причины и структура аварийных отключений в сетях СНТ [2, 3]. Авторы установили, что подавляющее большинство технологических нарушений связано с физическим износом оборудования и сетей, а также с возросшим уровнем электропотребления в садоводческих товариществах. Эти данные подчёркивают необходимость передачи сетей на баланс профессиональных эксплуатирующих организаций.

Исследования Виноградовой А.В. и Виноградова А.В. [2, 3] посвящены анализу надёжности сельских электросетей и систематизации причин отключений. Как отмечают авторы, значительная часть аварий происходит из-за ненадлежащего технического состояния линий и трансформаторных подстанций, что подтверждает вывод о необходимости консолидации сетей СНТ в руках сетевых компаний, способных обеспечить должный уровень эксплуатации и капитального ремонта.

Отдельные публикации в отраслевых журналах содержат информацию о практических кейсах. Так, в новостном материале журнала «Электроэнергия. Передача и распределение» за 2023 г. [10] описывается успешная передача электроустановок СНТ «Маяк» и «Рябинушка» на баланс АО «Мособлэнерго» с последующей заменой трансформаторного оборудования и повышением надёжности электроснабжения.

Письмо Минэнерго России от 17.05.2024 № СЦ-7719/07 [4] содержит обобщение практики и включает в себя порядок действий региональных органов власти, ТСО, органов правления СНТ, гарантирующих поставщиков, а также рекомендуемый перечень документов, необходимых для передачи. Этот документ является ключевым практическим руководством для всех участников процесса.

Вопрос о добровольности передачи и недопустимости принудительного изъятия сетей СНТ рассматривается в Определении Верховного Суда РФ от 12.11.2021 № 309-ЭС21-11340 [11], который подтвердил, что безвозмездная передача от некоммерческой организации коммерческой не является запрещённым дарением.

Таким образом, проблема правового оформления передачи сетей СНТ остаётся недостаточно проработанной в научной литературе, что обусловливает актуальность и практическую значимость настоящей работы.

**Материалы и методы**

Нормативную базу исследования составили: Федеральный закон от 29.07.2017 № 217-ФЗ [5], Гражданский кодекс РФ (ст. 209, 246–247), Постановления Правительства РФ от 27.12.2004 № 861 [6], от 28.02.2015 № 184 [7], от 10.09.2024 № 1229 [8]. Кроме того, проанализированы Письма Минэнерго России от 25.08.2017 № АН-9414/09 [9] и от 17.05.2024 № СЦ-7719/07 [4], а также Определение Верховного Суда РФ от 12.11.2021 № 309-ЭС21-11340 [11].

Методологически работа базируется на формально-юридическом анализе нормативных правовых актов, сравнительно-правовом методе (сопоставлении режимов имущества по Законам № 66-ФЗ и № 217-ФЗ), а также моделировании пошагового алгоритма передачи ОЭСХ на основе рекомендаций Минэнерго [4, 9].

**Результаты и обсуждение**

**1. Правовой режим имущества общего пользования: формы собственности**

Федеральный закон № 217-ФЗ [5] в ч. 9 ст. 25 допускает передачу имущества общего пользования в собственность сетевых организаций. Однако реализация этого права напрямую зависит от формы принадлежности сетей.

Проведённое исследование позволило выделить два типичных правовых режима.

Если ОЭСХ находятся в собственности товарищества как юридического лица (что соответствует целевой модели Закона № 217-ФЗ), решение о передаче принимает общее собрание членов СНТ квалифицированным большинством на основании ст. 209 ГК РФ. Передача в этом случае является добровольной для обеих сторон.

Если сети принадлежат членам СНТ на праве общей долевой собственности – что характерно для товариществ, созданных до 2019 года, поскольку ранее действовавший Закон № 66-ФЗ допускал создание инфраструктуры на целевые взносы с возникновением общей долевой собственности членов – распоряжение объектами требует соглашения всех участников в силу ст. 246 ГК РФ. Общее собрание не вправе замещать волю сособственников. Алгоритм Минэнерго [9] в таких случаях неприменим без предварительной консолидации прав: либо товарищество приобретает сети в состав имущества общего пользования с согласия всех дольщиков, либо каждый сособственник даёт нотариально удостоверенное согласие на отчуждение. Без этого сделка может быть признана недействительной.

**2. Механизмы передачи объектов электросетевого хозяйства в ТСО**

Первый порядок передачи изложен в Письме Минэнерго № АН-9414/09 [9] и включает следующие этапы: предложение СНТ в ТСО, инвентаризация и оценка технического состояния объектов, оформление правоустанавливающих документов, принятие решения ТСО, заключение договора. Письмо № СЦ-7719/07 [4] расширило состав участников (региональные органы власти, муниципалитеты, гарантирующие поставщики) и детализировало дорожную карту.

Важно подчеркнуть, что Постановление № 1229 [8] о передаче публичного имущества к частным сетям СНТ не применяется. Для них сохраняет силу добровольный механизм,

основанный на решении общего собрания и рекомендациях Минэнерго [4, 9].

Принимающая ТСО должна соответствовать критериям Постановления № 184 [7]: владеть силовыми трансформаторами суммарной мощностью от 10 МВА и линиями электропередачи не менее двух уровней напряжения. Это требование отсекает организации, не имеющие ресурсов для эксплуатации.

Безвозмездный характер передачи мог бы вызвать сомнения с точки зрения ст. 575 ГК о запрете дарения между коммерческими организациями. Однако Верховный Суд в Определении от 12.11.2021 № 309-ЭС21-11340 [11] подтвердил: передача сетей СНТ в собственность ТСО не нарушает данный запрет, так как товарищество является некоммерческой организацией.

**3. Тарифные последствия приёма изношенных объектов**

С момента регистрации перехода права СНТ утрачивает статус владельца сетей. Прекращаются коллективные расчёты по общему прибору учёта, и каждый владелец участка вправе заключить прямой договор с гарантирующим поставщиком. Товарищество освобождается от налога на имущество, банковского обслуживания счёта для сбора и транзита платежей за электроэнергию, а также от ответственности председателя за техническое состояние сетей (исключение составляют уличное освещение, скважинные насосы и помещения охраны).

Расходы ТСО на эксплуатацию и реконструкцию принятых сетей СНТ учитываются в тарифе на передачу (Письмо № СЦ-7719/07 [4]). Сверхнормативные потери, ранее оплачивавшиеся товариществом, после передачи закладываются в тариф ТСО. Выгода членов СНТ складывается из прекращения трат на содержание, ремонт и компенсацию технологических потерь.

**Выводы**

Таким образом, правовой режим имущества СНТ требует чёткой дифференциации в зависимости от формы собственности на сети:

1. решение общего собрания правомочно только при единоличной собственности товарищества на сети;

2. при долевой собственности членов необходимо единогласное согласие всех сособственников либо предварительная консолидация прав – в противном случае передача недействительна.

Добровольный механизм Минэнерго не может быть подменён принудительным изъятием, и Постановление № 1229 [8] к частным сетям СНТ неприменимо. Принимающая организация обязана соответствовать критериям ТСО [7], что гарантирует способность эксплуатировать принятые объекты. В случае успешной передачи сети на баланс ТСО для товарищества прекращаются коллективные расчёты, бремя содержания и оплата сверхнормативных потерь, а расходы сетевой организации на эксплуатацию и реконструкцию включаются в тариф [4].

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой типовой модели консолидации прав на сети в СНТ, созданных до 2019 года, а также с оценкой экономической эффективности передачи изношенных сетей для различных категорий потребителей электроэнергии.

**Список использованных источников:**


1. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Виноградова А.В. Анализ конфигурации электрических сетей 0,4 кВ Орловской области // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2023. Т. 70, №4(53). С. 22-29. DOI 10.22314/2658-4859-2023-70-4-22-29. EDN: LHIRSK.
2. Виноградова А.В., Виноградов А.В. Анализ плановых и аварийных отключений в сельских электрических сетях 0,4 кВ // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2024. Т. 71, №3(56). С. 44-51. DOI 10.22314/2658-4859-2024-71-3-44-51. EDN: VRFTOI.
3. Виноградова А.В. Причины отключений в сельских электрических сетях и их структурирование // Агротехника и энергообеспечение. 2024. №4(45). С. 12-19. EDN: FYMIMZ.
4. Письмо Минэнерго России от 17.05.2024 № СЦ-7719/07 «О направлении обобщенной практики порядка передачи ОЭСХ в собственность ТСО». 2024.
5. Федеральный закон от 29.07.2017 № 217-ФЗ «О ведении гражданами садоводства и огородничества для собственных нужд и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» // Собрание законодательства РФ. 2017.
6. Постановление Правительства РФ от 27.12.2004 № 861 «Об утверждении Правил недискриминационного доступа к услугам по передаче электрической энергии и оказания этих услуг…» // Собрание законодательства РФ. 2004.
7. Постановление Правительства РФ от 28.02.2015 № 184 «Об отнесении владельцев объектов электросетевого хозяйства к территориальным сетевым организациям» // Собрание законодательства РФ. 2015.
8. Постановление Правительства РФ от 10.09.2024 № 1229 «Об утверждении Правил передачи в безвозмездное владение и пользование системообразующей территориальной сетевой организации или территориальной сетевой организации объектов электросетевого хозяйства, находящихся в собственности субъектов Российской Федерации или муниципальных образований» // Собрание законодательства РФ. 2024.
9. Письмо Минэнерго России от 25.08.2017 № АН-9414/09 «О единых рекомендациях по порядку передачи объектов электросетевого хозяйства СНТ на баланс ТСО». 2017.
10. АО «Мособлэнерго» повысило надежность электроснабжения двух СНТ в Талдомском городском округе // Электроэнергия. Передача и распределение. 2023. 27 июня. URL: https://eepir.ru/new/ao-mosoblenergo-povysilo-nadezhnost-elektrosnabzheniya-dvuh-snt-v-nbsp-taldomskom-gorodskom-okruge/ (дата обращения: 02.06.2026).
11. Определение Верховного Суда РФ от 12.11.2021 № 309-ЭС21-11340 по делу № А71-2789/2020 // СПС «КонсультантПлюс». 2021.



*Алимов Р.Р., магистрант кафедры «Электроснабжение и электротехника имени академика И.А. Будзко» ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» (РГАУ-МСХА), 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49, e-mail: 9689933537@mail.ru.*

# LEGAL ASPECTS AND MECHANISMS FOR TRANSFERRING ELECTRIC GRID FACILITIES OF HORTICULTURAL NON-PROFIT PARTNERSHIPS TO LOCAL GRID ORGANIZATIONS

Alimov, R.R.

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (RSAU-MTAA), Moscow, Russia

Abstract. The purpose of this study is a systematic analysis of the legal regime for common property in gardening non-profit partnerships (SNTs) and the legal mechanisms for transferring electric grid facilities (EGF) to territorial grid organizations (TSOs), assessing the tariff implications. The methodology is based on formal legal and comparative legal methods, as well as an analysis of law enforcement practice. The transfer of EGF is strictly voluntary. For networks in shared ownership by SNT members, a general meeting resolution is insufficient; the consent of all co-owners or prior consolidation of rights to the partnership is required. The TSO is required to meet the criteria of Resolution No. 184 (transformer capacity from 10 MVA, lines of at least two voltage levels). After the transfer, the operating costs of worn-out networks are included in the transmission tariff and distributed to all consumers in the region, ending the maintenance burden on SNT members. This study concludes that it is necessary to improve the mechanism for consolidating rights to networks in SNTs. Key words: gardening non-profit partnership, territorial grid organization, electric grid facilities, common property, gratuitous transfer, tariff regulation.

*Alimov R.R., Master's student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering named after Academician I.A. Budzko, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy" (RSAU-MTAA), 127434, Moscow, Timiryazevskaya St., 49, e-mail: 9689933537@mail.ru.*

## Реклама в нашем журнале

**ВНИМАНИЕ!**

Редакция **ЖУРНАЛА «АГРОТЕХНИКА И ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ»**
приглашает Вас к сотрудничеству.

Мы предлагаем разместить Вашу рекламу на страницах нашего журнала.
Наши читатели (Россия и зарубежье) — учебные и научные учреждения, предприятия следующих отраслей деятельности:

- сельскохозяйственные предприятия;
- предприятия тяжелой и легкой, перерабатывающей промышленности;
- энергокомпании;
- отраслевые НИИ;
- научно-производственные объединения;
- учебные заведения;
- библиотеки.

**Каждый из номеров журнала распространяется более чем 500 адресатам.**

**Информацию о возможности размещения рекламной продукции и ценах Вы можете узнать в редакции журналов, а также у главного редактора.**

**Телефоны: 8202879024; 8(4862) 76-44-69.**
**Тел. (факс): 8(4862) 76-11-07**

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – доктор технических наук, доцент
**Александр Владимирович Виноградов**
**E-mail: winaleksandr@yandex.ru**

**Адрес:** 302019, г. Орел, ул. Ген. Родина, 69, Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, факультет агротехники и энергообеспечения, ауд. 2-211.

**ФГБОУ ВО «ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.В. ПАРАХИНА»**

Отдел сельскохозяйственного консультирования и развития сельских территорий ВНИИ социального развития села ФГБОУ ВО Орловский ГАУ принимает заявки на оказание консультационных услуг по следующим направлениям:

- в области агробизнеса и экологии;
- в области биотехнологий и ветеринарной медицины;
- в области экономики;
- в сфере социального и экономического развития сельских территорий;
- в области агротехники и энергообеспечения;
- в сфере строительства, эксплуатации и управления недвижимостью, ландшафтного дизайна;
- в сфере охраны труда и пожарной безопасности и др.

Более подробная информация об оказываемых услугах размещена на странице отдела по адресу:
http://www.orelsau.ru/science/institute-of-social-development-of-the-village/

Телефон: 8 (4862) 43-30-81
E-mail: vniisrs.orelsau@mail.ru

**Кафедры «Электроснабжение и теплоэнергетика имени академика И.А. Будзко» ФГБОУ Во РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева и «Электроснабжение» ФГБОУ ВО Орловским ГАУ организуют проведение постоянного научно-практического семинара «Энергообеспечение АПК»**

**Формат проведения:** видеосвязь, очно.

**Периодичность:** по мере поступления заявок на проведение.

**Темы:**

-всё, что связано с вопросами энергообеспечения АПК, электротехнологиями и электрооборудованием в АПК;

-вопросы цифровизации и роботизации в АПК и системах его энергообеспечения;

-современное сельскохозяйственное производство, проблемы и пути их решения, новые технологии;

-предварительное обсуждение кандидатских и докторских диссертаций;

-обсуждение совместных проектов, грантов;

- другие тематики.

**Для участия, предложения тематики обсуждения:**

написать письмо на электронную почту (в названии указать «семинар Энергообеспечение АПК»)

**Почта:** winaleksandr@gmail.com

**Телефон:** 89202879024 – Виноградов Александр Владимирович

При поступлении заявки на участие, адрес обратившегося вносится в рассылку и он уведомляется о теме и сроках проведения семинара.

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
ИЗДАТЕЛЬСТВО
**«ТОНКИЕ НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

309516, Белгородская область, г. Старый Оскол, м-н Макаренко, д.40 Б, помещение 4
тел./факс (4725) 32-25-29, 42-35-39, 42-35-29
ИНН/КПП 3128033245/312801001 р/с 40702810000990008671 в ПАО АКБ "Металлинвестбанк" г. Москва
БИК 044525176, к/с 30101810300000000176
e-mail: st_tnt-press@mail.ru

## Уважаемые коллеги!




Сообщаем Вам, что издательством «ТНТ» подготовлен учебник **Т. Б. Лещинской**, **И. В. Наумова** и **А. В. Виноградова «Электроснабжение сельского хозяйства. Конструкция и основные расчёты электрических сетей».**

Объём 384 стр.
Цена 1360 руб.
УДК 631.172:621.31(075)
ББК: 31.27я73:40.76я7
ISBN: 978-5-94178-917-7

В книге изложены основные требования к надежности электроснабжения сельских потребителей и качеству поставляемой им электроэнергии. Приведены основные сведения о влиянии надежности электроснабжения и качества электроэнергии на сельскохозяйственных потребителей, показаны методы расчета и меры по сокращению числа и продолжительности перерывов в электроснабжении, поддержанию нормативных уровней показателей качества электроэнергии. Рассмотрены методики технико-экономической оценки эффективности систем электроснабжения и обоснования мероприятий по повышению надежности электроснабжения. Приведены сведения о мерах по снижению потерь электроэнергии и ее рациональному использованию. Большое внимание уделено режимам нейтрали, конструктивному исполнению электрических сетей разного класса напряжения, внутренних электропроводок. Изложены методы определения нагрузок в электрических сетях по вероятностным характеристикам и с помощью коэффициентов одновременности, рассмотрены вопросы прогнозирования электропотребления. Приведены методы расчета оборудования, проводов, режимов работы электрических сетей разной конфигурации; падения и потерь напряжения; регулирования напряжения в сельских электрических сетях. Даны пояснения по механическому расчету воздушных линий и расчету токов короткого замыкания, замыканий на землю.

Учебник предназначен для студентов, обучающихся по направлению подготовки «Агроинженерия», может использоваться и обучающимися на других направлениях подготовки, например, «Электроэнергетика и электротехника», при изучении вопросов электроснабжения сельского хозяйства, конструкции сельских электрических сетей.

Учитывая Вашу заинтересованность в использовании учебной литературы, прошу дать заявку на количество необходимых книг для Вашего вуза.

*Рады сотрудничеству!*
*С уважением, издательство «ТНТ»*

Телефон/факс (4725) 42-35-39, 42-35-29, 32-25-29
Электронный адрес: st_tnt-press@mail.ru
Веб-сайт: www.tntpress.ru