

На правах рукописи

Лаврик Александр Юрьевич



**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
КОМПЛЕКСОВ ПУТЕМ ОБОСНОВАНИЯ СОСТАВА И
РЕЖИМОВ РАБОТЫ С УЧЕТОМ ПРЕДИКТИВНЫХ
АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ НАГРУЗКОЙ**

*Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы
и системы*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Жуковский Юрий Леонидович

Официальные оппоненты:

Суслов Константин Витальевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», кафедра электроснабжения и электротехники, заведующий кафедрой;

Васьков Алексей Геннадьевич

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», институт гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Защита состоится 24 сентября 2021 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.14 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, ауд. 1171 а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 23 июля 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОПТЕВА
Александра Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Две трети территории России, на которых проживает свыше 10 млн. человек, не охвачено Единой энергетической системой. Для автономных объектов горнодобывающих и нефтегазовых предприятий, населённых пунктов, вахтовых посёлков, геологоразведочных станций и т.п. основным источником электроэнергии служат, как правило, дизельные электростанции (ДЭС). Несмотря на низкие капитальные затраты, простоту резервирования и эксплуатации, использование ДЭС в качестве единственного источника генерации имеет множество недостатков: высокую себестоимость электроэнергии, негативное воздействие на экологию, трудоёмкость мероприятий по сезонному завозу топлива и т.п. Характерной чертой большинства автономных ДЭС в России является высокий уровень морального устаревания и физического износа дизель-генераторных установок (ДГУ).

Решению обозначенных проблем способствует интеграция в указанные системы электроснабжения возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В последние годы в изолированных энергосистемах России получают распространение ветро-дизельные и солнечно-дизельные электротехнические комплексы (ЭТК), однако в мире распространена практика использования гибридных комплексов, включающих одновременно несколько видов ВИЭ, резервируемых ДЭС или системой накопления электроэнергии (СНЭ). Обоснование состава источников и накопителей электроэнергии должно осуществляться с учётом выбора оптимальных алгоритмов управления всеми компонентами автономного ЭТК, под которым понимается совокупность элементов генерации электроэнергии, СНЭ и активных потребителей, способных изменять график потребляемой мощности в зависимости от ситуации в системе электроснабжения.

Таким образом, актуальной задачей является разработка комплексной методики оптимизации состава автономных ЭТК с учётом предлагаемых алгоритмов их работы.

Степень проработанности темы исследования

Особенности организации электроснабжения децентрализованных территорий предопределили появление методик обоснования структуры, состава и режимов работы автономных ЭТК. Значительный вклад в этой области принадлежит профессору Б.В. Лукутину и профессору В.В. Елистратову,

рассматривавшим, главным образом, ветро-дизельные и солнечно-дизельные ЭТК. В исследованиях профессора Б.Н. Абрамовича освещены вопросы обеспечения электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса, в том числе с помощью гибридных ЭТК с ВИЭ. Оптимизация состава и режимов работы гибридных ЭТК с учётом активных потребителей электроэнергии рассматривалась в работах К.В. Сулова, проф. М.Г. Тягунова, А.Г. Васькова, С.А. Цырука. Исследования зарубежных авторов R. Dufo-Lopez, José L. Bernal-Agustín, F. Jurado охватывают широкий спектр вопросов оптимизации состава и режимов работы гибридных ЭТК с ВИЭ, выбора стратегий управления электрической нагрузкой.

Однако проработанность темы исследования остаётся недостаточной: не полностью изучены вопросы влияния учёта управления электрической нагрузкой на оптимальный состав ЭТК с ВИЭ; не решены многие вопросы оптимального управления источниками и накопителями энергии в гибридных ЭТК.

Объект исследования – автономный электротехнический комплекс с возобновляемыми источниками энергии и активными потребителями энергии.

Предмет исследования – параметрический синтез автономного электротехнического комплекса, его оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления.

Цель работы – повышение энергоэффективности автономных электротехнических комплексов путём выбора рационального состава и режимов работы с учётом предиктивных алгоритмов управления генерацией и потреблением электроэнергии.

Идея работы. Повышение энергоэффективности автономных электротехнических комплексов может быть достигнуто выбором оптимальных параметров генераторов и накопителей электроэнергии при учёте возможности корректировки графиков электрической нагрузки потребителей.

Основные задачи исследования:

1. Анализ факторов, влияющих на технические, экономические и экологические показатели работы автономных ЭТК, а также способов оптимизации состава источников и накопителей электроэнергии в таких комплексах. Анализ современного состояния технологий управления электрической нагрузкой.

2. Математическое и имитационное моделирование автономного ЭТК в различных режимах работы. Создание комплексной методики оптимизации состава источников и накопителей электроэнергии автономного ЭТК, а также создание программного комплекса для её численной реализации.

3. Разработка алгоритма управления электрической нагрузкой и проведение экспериментальных исследований, подтверждающих его работоспособность и возможность технической реализации.

4. Разработка алгоритма управления ДГУ и накопителями электроэнергии в автономных ЭТК с ВИЭ.

Научная новизна работы

Предложена методика обоснования состава источников и накопителей электроэнергии автономного электротехнического комплекса с учётом управления электрической нагрузкой, реализованная на базе оптимизационного метода покоординатного спуска.

Разработан алгоритм управления дизель-генераторными установками и накопителями электроэнергии в автономных электротехнических комплексах с возобновляемыми источниками энергии, отличающийся подключением к сети электроснабжения накопителей электроэнергии для предотвращения запуска очередной дизель-генераторной установки при высокой вероятности её непродолжительной работы на малую нагрузку.

Разработан способ управления электрической нагрузкой в автономных электротехнических комплексах с возобновляемыми источниками энергии, отличающийся применением эвристического алгоритма выбора интервалов работы электроприёмников.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты исследований могут быть использованы при проектировании новых или реконструкции существующих автономных электротехнических комплексов. Результаты могут быть использованы в учебном процессе при реализации специальных образовательных программ.

Методология и методы исследований

При выполнении исследований использовались методы анализа и обобщения данных, статистические методы обработки данных, методы математической оптимизации для задач с

ограничениями, методы нечёткой логики, методы математического моделирования. Экспериментальные исследования выполнялись с использованием имитационного моделирования в среде Simulink программного комплекса MATLAB, программирования на языке Python в среде Jupyter Notebook, а также низковольтных распределительных устройств в лаборатории Schneider Electric на базе Учебно-научного центра цифровых технологий Санкт-Петербургского горного университета.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Повышение энергоэффективности и улучшение технико-экономических и экологических показателей работы автономного электротехнического комплекса с возобновляемыми источниками энергии может быть достигнуто путём применения разработанной методики обоснования состава и режимов работы источников и накопителей электроэнергии с учётом управления электрической нагрузкой.

2. Применение разработанных предиктивных алгоритмов управления электропотреблением и управления генерацией позволит повысить энергоэффективность автономного электротехнического комплекса по техническим и экономическим критериям.

Степень достоверности результатов работы

Степень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным применением известных теорий и методов математического моделирования электротехнических комплексов, машинного обучения, а также результатами экспериментов.

Апробация результатов.

Основные положения обсуждались на заседаниях кафедры электроэнергетики и электромеханики Горного университета, докладывались на конференциях: Международном форуме горняков и металлургов на базе ТУ «Фрайбергская горная академия» (г. Фрайберг, Германия, 2018 г.), Международной научной конференции «Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития» (г. Томск, 2018 г.), Научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2019» (г. Санкт-Петербург, 2019 г.), Международной научной конференции на базе

Горно-геологического университета «Св. Иван Рильский» (г. София, Болгария, 2019 г.), Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020» (г. Санкт-Петербург, 2020 г.), Научной конференции студентов и молодых учёных «Полезные ископаемые России и их освоение» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.), XIX Всероссийской конференции-конкурсе студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.).

Личный вклад автора

Сформулированы цели, задачи исследований, защищаемые научные положения. Непосредственное участие во всех этапах исследований в рамках диссертационной работы. Предложена методика обоснования состава источников и накопителей электроэнергии автономного ЭТК, учитывающая возможность корректировки графиков электрической нагрузки потребителей. Разработан программный комплекс для оптимизации состава источников и накопителей электроэнергии в автономном ЭТК на основе оптимизационного метода покоординатного спуска. Разработан алгоритм предиктивного управления спросом на электроэнергию в автономном ЭТК с ВИЭ. Разработан алгоритм управления дизель-генераторными установками и накопителями электроэнергии в автономном ЭТК с ВИЭ.

Публикации

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 5 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus; получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из оглавления, введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 120 наименований. Диссертация изложена на 145 страницах машинописного текста, содержит 58 рисунков и 20 таблиц, 11 приложений.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность научному консультанту, доктору технических наук, профессору, профессору кафедры электроэнергетики и электромеханики Абрамовичу Б.Н. за помощь в подготовке и проведении научных исследований, а также кандидату технических наук, доценту, доценту кафедры электроэнергетики и электромеханики Бельскому А.А. за ценные замечания при подготовке статей и диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено общее описание работы, обоснована актуальность, сформулирована цель исследований.

В первой главе проанализированы варианты построения автономных ЭТК на основе ДЭС, ВИЭ, а также их совместного использования. Приведены основные преимущества и недостатки применения ДЭС в качестве единственного источника электроснабжения автономных ЭТК, обозначены пути решения проблем с помощью ВИЭ. Сформулированы задачи работы.

Проанализированы режимы работы автономных ЭТК с ВИЭ при превышении мощностью генерации ВИЭ мощности электрической нагрузки. Показано, что кроме полезного использования избыточной энергии для нужд теплоснабжения и её накопления в электрохимических или иных аккумуляторах, действенным методом повышения энергоэффективности ЭТК является управление электрической нагрузкой потребителей. При исчерпании возможностей данных механизмов или их отсутствии осуществляется уменьшение мощности генерации ВИЭ.

Предложено выполнять оптимизацию состава автономных ЭТК комплексно с учётом возможности управления электрической нагрузкой активных потребителей, т.е. потребителей, способных изменять своё электропотребление в ответ на определённые события в системе электроснабжения, в соответствии с алгоритмом, показанным на рисунке 1.



Рисунок 1 – Алгоритм комплексного обоснования состава и режимов работы ЭТК с ВИЭ и активными потребителями электроэнергии

Во второй главе рассмотрены подходы к оптимизации состава автономных ЭТК, составлена математическая модель гибридного ЭТК, состоящего из фотоэлектрической (ФЭС) и ветроэлектрической (ВЭС) станции, ДЭС и СНЭ.

В соответствии с принятой методикой выполнено численное моделирование усреднённой за час активной мощности в системе. В качестве исходных данных приняты почасовые значения скорости ветра, инсоляции и температуры на протяжении года, а также почасовые суточные графики электрической нагрузки, усреднённые для каждого месяца. Мощность в системе и метеопараметры считаются неизменными на протяжении каждого часового интервала.

В качестве основного критерия оптимизации состава выбрана чистая приведённая стоимость ЭТК (NPC) (1):

$$NPC = CAPEX + \sum_{T=1}^{T_{max}} OPEX \cdot (1+r)^T, \quad (1)$$

где $CAPEX$ – капитальные затраты на основное оборудование ЭТК, $OPEX$ – эксплуатационные затраты за год, T – год, T_{max} – срок службы автономного ЭТК (принят равным 25 годам), r – ставка

дисконтирования (принята равной 7%). Также отдельно была проведена оптимизация с дополнительным ограничивающим критерием – сроком окупаемости ($PВ$).

В качестве метода оптимизации выбран итеративный метод Гаусса-Зейделя, или покоординатного спуска, т.к. при простоте реализации он демонстрирует, в отличие от, например, стохастических методов, интерпретируемость промежуточных результатов, и, с другой стороны, позволяет найти экстремум целевой функции, которая в рамках поставленной задачи является непрерывной. Метод заключается в циклической поочередной настройке каждого оптимизируемого параметра до тех пор, пока каждый из них не перестанет изменяться при настройке остальных параметров.

Уравнение энергетического баланса записывается следующим образом (2):

$$P_{\PhiЭС} + P_{ВЭС} + P_{СНЭ} - P_H = 0, \quad (2)$$

где $P_{\PhiЭС}$, $P_{ВЭС}$, $P_{СНЭ}$, P_H – мощность выработки ФЭС, ВЭС, выработки или потребления СНЭ, нагрузки соответственно.

Выработка электроэнергии ФЭС определяется формулой (3):

$$P_{\PhiЭС} = m_{PV} \cdot A_{PV} \cdot G_t \cdot \eta_{PV} \cdot (1 - P_H), \quad (3)$$

где m_{PV} – количество фотоэлектрических панелей (ФЭП), A_{PV} – площадь ФЭП, G_t – суммарная солнечная радиация, η_{PV} – КПД ФЭП, P_H – коэффициент снижения КПД ФЭП в результате нагрева, определяемый по формуле (4):

$$P_H = K_T \cdot (T_{amb} + 0,0256 \cdot G_t - 25) \cdot f_1, \quad (4)$$

где K_T – температурный коэффициент снижения максимальной мощности ФЭП, T_{amb} – температура окружающей среды, f_1 – бинарная переменная, $f_1 = 0$ при $T_{PV} \leq 25$, $f_1 = 1$ при $T_{PV} > 25$.

Выработка электроэнергии ВЭС определяется формулой (5):

$$P_{ВЭС} = \begin{cases} 0 & V < V_{вкл} \\ m_{ВЭУ} \cdot \eta_{ВЭУ} \cdot P_{н ВЭУ} \left(\frac{V^3 - V_{вкл}^3}{V_{ном}^3 - V_{вкл}^3} \right) & V_{вкл} < V < V_{ном} \\ m_{ВЭУ} \cdot \eta_{ВЭУ} \cdot P_{н ВЭУ} & V_{ном} < V < V_{откл} \\ 0 & V > V_{откл}, \end{cases} \quad (5)$$

где V – фактическая скорость ветра на высоте мачты; $V_{вкл}$, $V_{откл}$ и $V_{ном}$ – начальная, предельная и номинальная скорость ветра соответственно; $P_{н ВЭУ}$ – номинальная мощность ВЭУ; $\eta_{ВЭУ}$ – КПД ВЭУ.

Исходя из предположения о разряде и заряде рассматриваемых электрохимических аккумуляторных батарей (АБ) только номинальными токами, для АБ на основе паспортных данных определена номинальная мощность разряда и заряда (в кВт), минимальная и максимальная энергоёмкость (в кВт·ч). Принято, что АБ эксплуатируются при номинальной температуре; саморазряд 2–3% номинальной ёмкости в месяц не учитывается. Продолжительность жизненного цикла АБ ограничена как сроком службы, так и предельным числом эквивалентных полных циклов.

Расход дизельного топлива (ДТ) за интервал времени t в зависимости от номинальной мощности и загрузки ДГУ предлагается определять по формуле (6):

$$F_{ДГУ}(t) = a_1 \cdot P_{н ДГУ} + a_2 \cdot P_{ДГУ}(t), \quad (6)$$

где $P_{н ДГУ}$ – номинальная мощность ДГУ, $P_{ДГУ}(t)$ – текущая мощность нагрузки ДГУ, $a_1=0,0101$ л/кВт·ч и $a_2=0,2654$ л/кВт·ч – эмпирические коэффициенты, актуализированные для ДГУ с двигателями ЯМЗ аппроксимацией методом наименьших квадратов в программе математического моделирования GAMS.

Принято, что ресурс ДГУ до капитального ремонта составляет 25 000 ч.; стоимость технического обслуживания ДГУ определяется по удельному расходу масла 0,5 г/кВт·ч; стоимость капитального ремонта – 10% стоимости новой ДГУ; капитальные затраты на ДГУ задаются в виде квадратичной функции на основе анализа розничных цен; затраты на сооружение ДЭС приняты равными затратам на закупку и ввод в эксплуатацию ДГУ; каждый цикл пуска-останова ДГУ приводит к дополнительному расходу ресурса ДГУ.

Была осуществлена оптимизация состава автономного ЭТК в условиях населённого пункта Новиково Сахалинской области, энергосистема которого включает 2 ВЭУ Vestas V27 мощностью 225 кВт каждая и ДЭС. Для комплектования проектируемого ЭТК приняты ДГУ с двигателями ЯМЗ, ВЭУ Vestas V27, ФЭП гетероструктурного типа HVL-395/НТ и литий-ионные АБ ЛиоТех LFP270.

В качестве базовой конфигурации, с которой сравнивались другие конфигурации ЭТК, выбрана конфигурация с ДЭС.

Рассмотрены варианты ДЭС с 1, 2 и 3 ДГУ. Установленная мощность ДЭС принята равной 450 кВт, что на 20% превышает максимальную усреднённую за 1 час мощность нагрузки в течение года. Выбор резервных ДГУ не осуществлялся. Состав и технико-экономические показатели ЭТК базовой конфигурации приведены в таблице 1.

В таблице 1 нормированная себестоимость электроэнергии определяется по формуле (7):

$$LCOE = \frac{NPC \cdot (1+r)^t}{\sum (E \cdot (1+r)^t)}, \quad (7)$$

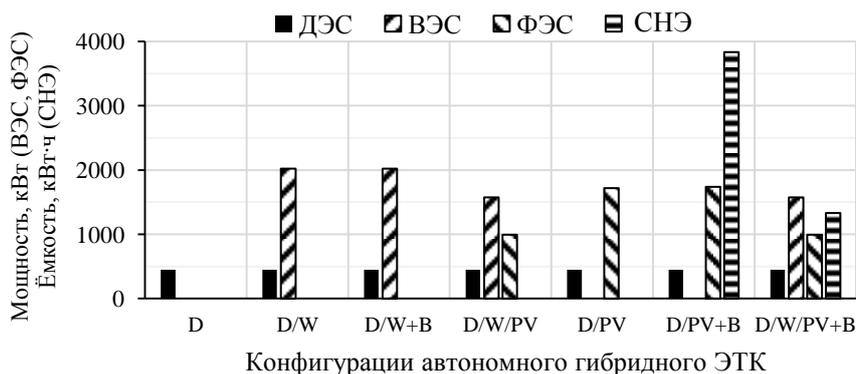
где E – выработанная за год электроэнергия.

Таблица 1 – Состав и показатели ЭТК базовой конфигурации

Состав ЭТК			Технико-экономические показатели				
Мощность ДГУ, кВт			CAPEX	ОРЕХ	NPC	LCOE	CO ₂
ДГУ1	ДГУ2	ДГУ3	млн. руб.	млн. руб./год	млн. руб.	руб./кВт·ч	т/год
450	–	–	6,2	45,5	2899,7	18,16	1610
310	140	–	5,0	44,9	2864,1	17,94	1591
240	140	70	4,5	44,7	2849,9	17,85	1583

В работе получено несколько оптимальных конфигураций состава ЭТК в зависимости от типа применяемых источников. Наличие в ЭТК ДЭС обозначается в названии конфигурации как D , ВЭС – W , ФЭС – PV , СНЭ – B . Конфигурации ЭТК с СНЭ получены путём выбора оптимального числа АБ для оптимизированного состава ЭТК без АБ. Установленные мощности ВЭС, ФЭС и ёмкость СНЭ для рассматриваемых конфигураций при оптимизации по критерию NPC показаны на рисунке 2.

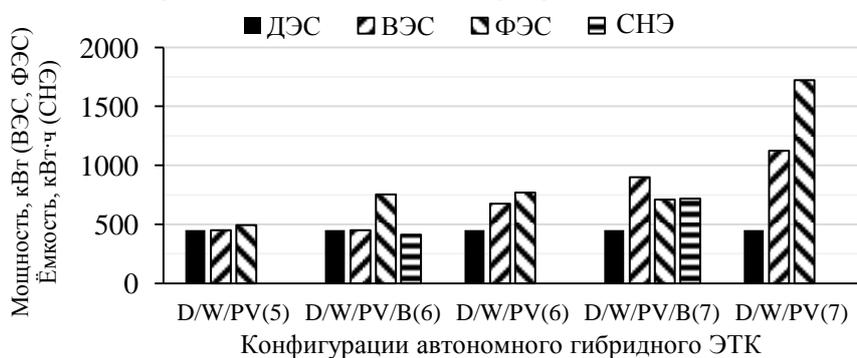
Увеличение ёмкости СНЭ в конфигурации $D/W+B$ только снижает недостаточно высокую интенсивность использования АБ, при этом увеличивается NPC . В связи с этим оптимальная конфигурация $D/W+B$ вырождается в конфигурацию D/W . В случае с конфигурацией $D/PV+B$ увеличение ёмкости СНЭ до определённого момента увеличивает NPC , однако это происходит, напротив, по причине чрезмерно высокой интенсивности использования АБ, что приводит к необходимости замены АБ в связи с достижением максимального числа циклов, а не в связи с достижением максимального срока службы. При определённой ёмкости СНЭ, показанной на рисунке 2, достигается минимум NPC .



Конфигурации автономного гибридного ЭТК

Рисунок 2 – Параметры ЭТК различных конфигураций

Установленные мощности ВЭС, ФЭС и ёмкость СНЭ для рассматриваемых конфигураций при оптимизации по критерию *NPС* и дополнительному ограничению по сроку окупаемости, составившему 5, 6 и 7 лет, показаны на рисунке 3.



Конфигурации автономного гибридного ЭТК

Рисунок 3 – Параметры ЭТК конфигураций с ВИЭ при учёте

дополнительного ограничивающего критерия – срока окупаемости

Пять показателей работы ЭТК – *CAPEX*, *OPEX*, *PВ*, *LCOE* и объём выбросов (CO_2) рассмотренных выше конфигураций приведены на рисунках 4(а) и 4(б), на которых все показатели выражены в относительных единицах и нормированы относительно наибольшего значения показателя среди всех приведённых на диаграмме конфигураций.

Таким образом, интеграция в ЭТК ВИЭ с целью минимизации NPC по сравнению с использованием только ДЭС позволяет существенно улучшить различные показатели работы системы. Повысилась энергоэффективность ЭТК: удельный расход ДТ в ЭТК сократился с 232 до 48 г/кВт·ч, а при ограничении по сроку окупаемости 5 лет – до 131 г/кВт·ч.

В третьей главе рассмотрены вопросы управления электрической нагрузкой в автономных ЭТК с ВИЭ.

Осуществлена оценка влияния технологии управления электрической нагрузкой на оптимальный состав гибридного ЭТК. Для этого предложено скорректировать исходный график электрической нагрузки в соответствии со следующим алгоритмом. Пусть дефицит активной мощности на интервале определяется по формуле (8):

$$D = P_H - P_{фЭС} - P_{фЭС} - P_{СНЭ}. \quad (8)$$

Тогда, если дефицит на рассматриваемом часовом интервале положителен, то при условии отрицательного дефицита на следующем интервале часть электрической нагрузки смещается на следующий интервал таким образом, чтобы на нём не возникло дефицита мощности. Также был рассмотрен аналогичный алгоритм со смещением электрической нагрузки на время до 2 часовых интервалов: если смещением части нагрузки на следующий интервал не удаётся ликвидировать дефицит на рассматриваемом интервале, то анализируется возможность смещения оставшейся части нагрузки на второй интервал после рассматриваемого. Результаты повторной оптимизации состава ЭТК конфигурации D/W/PV+B с модифицированным графиком нагрузки приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты повторной оптимизации состава ЭТК конфигурации D/W/PV+B с учётом смещения электрической нагрузки

Перенос нагрузки	Изменяющийся параметр ЭТК		Показатели работы гибридного ЭТК					
	Кол-во АБ	Ёмкость, кВт·ч	CAPEX, млн. руб.	ОPEX (1 год), млн. руб.	NPC, млн. руб.	LCOE, руб./кВт·ч	CO ₂ , т/год	PВ, лет
нет	1480	1332	357,9	16,6	1408,7	8,82	328	9,2
до 1 ч	1375	1238	353,8	16,5	1401,5	8,78	332	9,1
до 2 ч	1295	1166	350,7	16,5	1397,3	8,75	336	9,0
до 2 ч	Без изменений		357,9	16,4	1397,7	8,75	322	9,12

В таблице 2 не показаны параметры, не изменившиеся в результате повторной оптимизации: установленная мощность ДГУ (240, 140 и 70 кВт), установленная мощность ВЭС (1575 кВт) и ФЭС (995 кВт). В последней строке таблицы 2 показаны параметры ЭТК при отсутствии повторной оптимизации.

Таким образом, смещение электрической нагрузки на время до двух часовых интервалов не повлияло на оптимальный с точки зрения NPC состав ВЭС и ФЭС, однако позволило снизить ёмкость СНЭ, что привело к увеличению выбросов парниковых газов. Однако при сохранении размера СНЭ при внедрении системы управления нагрузкой можно добиться улучшения всех рассматриваемых показателей работы ЭТК, включая экологический.

Численное моделирование также было проведено для оценки энергоэффективности смещения нагрузки при ограничении доли переносимой нагрузки на уровне 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% и без ограничений. Зависимость относительного снижения мощности нагрузки, не покрываемой ВИЭ и СНЭ, от ограничения по величине переносимой мощности, показана на рисунке 5.

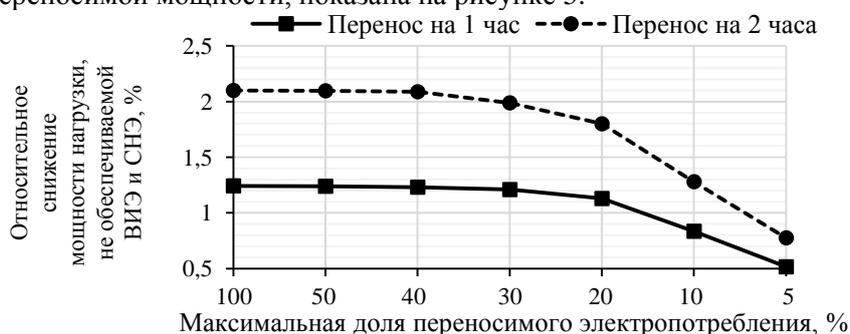


Рисунок 5 – Зависимость относительного снижения мощности нагрузки, не покрываемой ВИЭ и СНЭ, от ограничения по величине переносимой мощности для двух алгоритмов смещения нагрузки

Применение алгоритма без последующего сокращения ёмкости СНЭ позволяет снизить не покрываемую ВИЭ и СНЭ мощность нагрузки на 1,25 % для алгоритма с переносом времени работы устройств на 1 час, и на 2,1 % для алгоритма с переносом времени работы устройств на время до 2 часов. Наибольший эффект наблюдается при возможности переноса не менее 30% нагрузки, в то

время как возможность смещения 40% и более нагрузки практически не приводит к увеличению эффекта от технологии.

Рассмотрены вопросы практической реализации управления спросом на электроэнергию. В автономных ЭТК удалённых объектов России выбор явного управления спросом представляется более целесообразным, чем выбор неявного управления спросом, предполагающего изменение цен на электроэнергию в режиме реального времени. Активные потребители в таких ЭТК имеют электрооборудование, которое можно классифицировать на не участвующее в управлении нагрузкой, а также на оборудование с непрерываемым и прерываемым циклом работы.

Согласно предложенному способу управления нагрузкой в автономных ЭТК, осуществляется прогнозирование суммарной мощности электрической нагрузки, мощности генерации ВИЭ, а также мощности нагрузки электроприёмников (ЭП), участвующих в управлении спросом и находящихся в работе при возникновении дефицита мощности.

При возникновении дефицита активной мощности центральный контроллер с помощью генетического алгоритма (ГА) определяет оптимальные интервалы работы ЭП, участвующих в программе управления нагрузкой и находящихся в работе. Для ЭП, цикл работы которого длится τ интервалов, ГА случайным образом формирует поколение, состоящее из x индивидов. Индивид представляет собой возможный вариант работы ЭП в формате $x=[T_1, T_2, \dots, T_x]$, где T – порядковый номер интервала времени. Для каждого индивида рассчитывается целевая функция – дефицит активной мощности. Из первого поколения выбирается набор лучших индивидов, из которого формируются x новых индивидов второго поколения. В течение нескольких поколений ГА находит индивида с лучшим значением целевой функции.

На рисунке б(а) показан график мощности ЭП с прерываемым циклом работы, а на рисунке б(б) – оптимальное распределение интервалов работы ЭП ГА с учётом суммарного графика нагрузки других ЭП и графика мощности генерации ВИЭ. После включения, фиксируемого измерительным преобразователем в питающей линии ЭП, ГА определяет оптимальные интервалы работы ЭП. Необходимо отметить, что поиск решений методом прямого перебора не реализуем ввиду большого количества возможных

вариантов распределения интервалов для ЭП с прерываемым циклом работы, а распределение интервалов работы ЭП на интервалы с прогнозируемым профицитом активной мощности не даёт минимума целевой функции и приводит к повышенному расходу ДТ на обеспечение работы всех ЭП.

Проведён анализ возможного применения данного алгоритма в условиях входной базы «Унчи» компании Полиметалл в Хабаровском крае. В соответствии с составом технологического оборудования и режимами его работы, порядка 10% суточного электропотребления может смещаться в пределах 5 часов (ЭП с прерываемым циклом работы). В летние месяцы потенциал смещения составляет порядка 90 кВт·ч/сут. В результате численного моделирования установлено, что применение алгоритма для данной нагрузки позволяет сократить расход ДТ на 6 кг/сут. в летние месяцы.

Работоспособность предложенного способа управления нагрузкой была подтверждена в ходе физического эксперимента в лаборатории Schneider Electric. Выбор оптимальных интервалов осуществлялся ГА, программный код которого реализован на языке Python. В качестве ЭП с прерываемым циклом работы выступила лабораторная шахтная печь, автоматическое прерывание питания осуществлялось с помощью выключателя с дистанционным управлением. Найденное оптимальное распределение интервалов работы ЭП показано на рисунке 7.

В четвёртой главе приведены результаты имитационного моделирования в программе MATLAB Simulink работы автономного гибридного ЭТК п. Новиково при конфигурации D/W/PV(6). Суточный график активной мощности автономного ЭТК для одного из дней показан на рисунке 8. Анализ графиков на рисунке 8 позволяет сделать вывод о том, что энергетический баланс обеспечивается выбранным набором оборудования.

Предложен алгоритм управления ДГУ и АБ в автономных ЭТК с ВИЭ, предполагающий подключение к сети электроснабжения отдельного блока АБ для предотвращения запусков очередной ДГУ при высокой вероятности её непродолжительной работы на малую нагрузку после включения. Предложен вариант, при котором решение о включении данных АБ в работу принимается контроллером на основе алгоритма нечёткой логики. Входными данными для контроллера является информация

о текущей скорости ветра, о текущей инсоляции и прогнозируемом дефиците мощности, а выходной величиной – индекс целесообразности включения аккумуляторов (ИЦВА). Имитационное моделирование работы гибридного ЭТК с предложенным алгоритмом для условий п. Новиково на о. Сахалин осуществлено в программе MATLAB Simulink. На рисунке 9 показано 4 диаграммы: 1) статус работы ДГУ без предложенного алгоритма, 2) мощность нагрузки ДГУ, 3) ИЦВА (ИЦВА \geq 0,5 – АБ включаются при возможности разряда, ИЦВА $<$ 0,5 – АБ не включаются в работу), 4) статус работы ДГУ с предложенным алгоритмом. На диаграммах, показывающих статус работы ДГУ, 0 соответствует выключенной ДГУ, 1 – включенной ДГУ.

Применение предложенного алгоритма позволяет продлить срок службы ДГУ до очередного капитального ремонта за счёт уменьшения количества пусков ДГУ с последующей непродолжительной работой на малую нагрузку.

Также рассмотрены вопросы комплектования подстанций ДЭС автономных ЭТК устройствами компенсации реактивной мощности (УКРМ). Установлено, что в условиях с. Гыда Ямало-Ненецкого АО установка нерегулируемого УКРМ 22 *квар* позволяет уменьшить ток статора генератора ДГУ при загрузке 100% от номинальной мощности (325 кВт), снизив потери с 5 кВт до 4,68 кВт. Себестоимость электроэнергии при закупочной стоимости ДТ 50 000 руб./т. снизится на 0,013 руб./кВт·ч. Срок окупаемости, в зависимости от модели УКРМ, составит 1–2 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научно-технической задачи повышения энергоэффективности автономных ЭТК путем обоснования их состава и интеграции предиктивных алгоритмов, в том числе – управления электрической нагрузкой.

1. Разработаны математические и имитационные модели ДЭС, ВЭС, ФЭС и СНЭ автономного ЭТК, позволяющие исследовать различные алгоритмы управления источниками и накопителями электроэнергии в ЭТК.

2. Сформированы подходы к обоснованию состава и режимов работы источников и накопителей электроэнергии в автономных ЭТК. Выполнена оптимизация состава автономного ЭТК населённого пункта Новиково на о. Сахалин по критерию *NPC*, а также по критерию *NPC* с учётом дополнительного критерия *PВ*. Интеграция ВИЭ в автономный ЭТК позволило при сохранении срока окупаемости на приемлемом уровне (6 лет) более чем в 2 раза продлить срок службы ДГУ и на 40% снизить себестоимость электроэнергии.

3. Выявлены закономерности, связывающие корректировку графика электрических нагрузок и результат решения оптимизационной задачи выбора источников и накопителей электроэнергии. В частности, установлено, что возможность переноса не менее 30% электропотребления на 1–2 следующих часовых интервала позволяет достичь относительного снижения мощности нагрузки, не обеспечиваемой ВИЭ и СНЭ, на 1,3–2,1%, а также улучшения экономических и экологических показателей.

4. Разработан предиктивный способ управления ДГУ и накопителями электроэнергии в гибридном ЭТК с ВИЭ, позволяющий увеличить ресурс ДГУ за счёт сокращения числа пусков агрегатов с последующей непродолжительной (не более 1 часа) работой на малую нагрузку.

5. Разработан предиктивный способ управления электрической нагрузкой в автономных ЭТК с ВИЭ, отличающийся применением эвристического алгоритма выбора интервалов работы ЭП, позволяющий повысить энергоэффективность ЭТК за счёт повышения КИУМ ВИЭ и снижения расхода ДТ. Работоспособность алгоритма проверена в ходе экспериментальных исследований в лаборатории низковольтного оборудования Schneider Electric.

6. Рассмотрены вопросы прогнозирования скорости ветра, необходимого для работы предиктивных алгоритмов управления в ЭТК с ВЭС, а также вопросы установки УКРМ на шинах подстанций автономных ЭТК.

Направлением дальнейших исследований является усовершенствование методики комплексной оптимизации состава источников и накопителей электроэнергии в автономных ЭТК, а также развитие алгоритмов и способов технической реализации управления электрической нагрузкой.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Лаврик, А.Ю. Определение оптимального состава резервируемой гибридной ветро-солнечной электростанции / А.Ю. Лаврик, Ю.Л. Жуковский, Н.А. Максимов // Промышленная энергетика. – 2019. – № 10. – С. 47-53.

2. Лаврик, А.Ю. Особенности выбора оптимального состава ветро-солнечной электростанции с дизельными генераторами / А.Ю. Лаврик, Ю.Л. Жуковский, А.Ю. Лаврик, А.Д. Булдыско // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – № 1. – С. 10-17.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Lavrik, A.Y. Features of the optimal composition determination of energy sources during multi-criterial search in the Russian arctic conditions / Lavrik A.Y., Zhukovskiy Y.L., Buldysko A.D. // Proceedings of the 2nd 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2020, DOI: 10.1109/REEPE49198.2020.9059215 – 2020. – 9059215.

4. Zhukovskiy, Y.L. Potential for electric consumption management in the conditions of an isolated energy system in a remote population / Zhukovskiy Y.L., Lavrik A.Y., Vasilkov O.S., Semenyuk A.V. // Sustainable development of mountain territories, DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-583-591. – 2020. – Vol. 12(4). – P.583-591.

5. Zhukovskiy, Y.L. Energy demand side management in stand-alone power supply system with renewable energy sources / Zhukovskiy Y.L., Lavrik A.Y., Buldysko A.D. // Journal of Physics: Conference Series, DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012059. – 2021. – Vol. 1753(1). – 012059.

Патент:

6. Патент № 2726943 Российская Федерация, МПК H02J 9/08 (2006.01), H02P 9/00 (2006.01). Способ снижения расхода топлива дизель-генераторными установками в гибридной электростанции с возобновляемыми источниками энергии: 2020100842: заявл. 09.01.2020: опубл. 17.07.2020 / Лаврик А.Ю., Жуковский Ю.Л.; заявитель СПбГУ. – 16 с.: ил. – Текст: непосредственный.

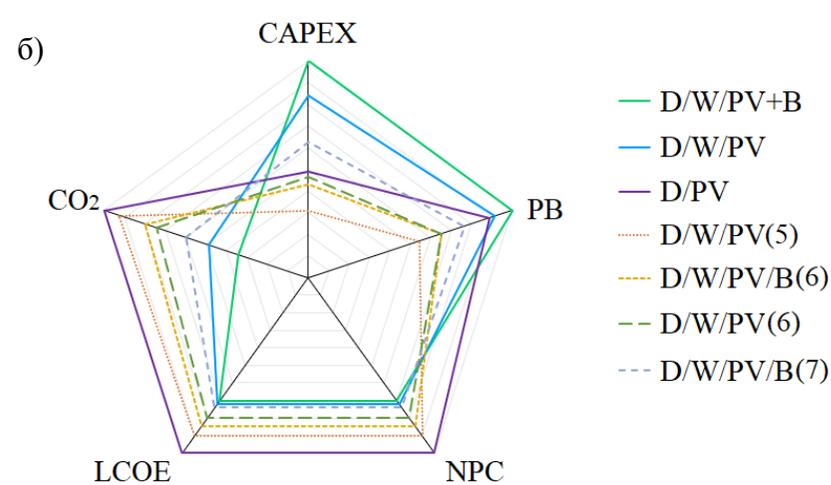
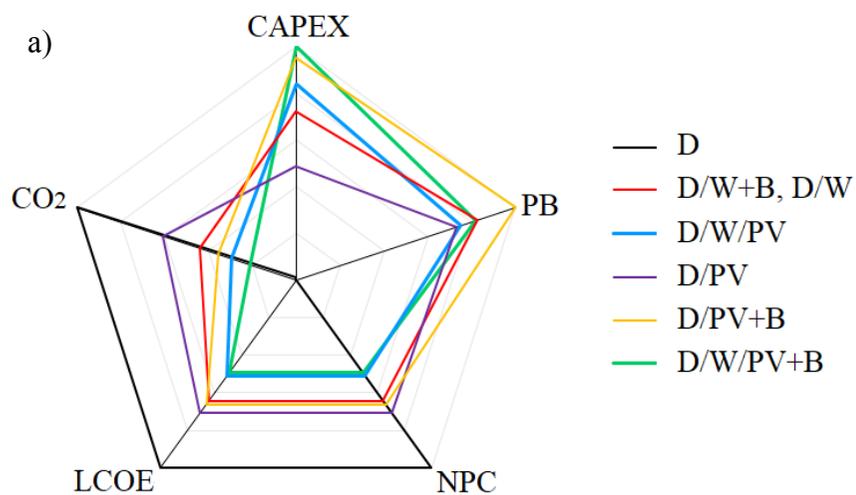


Рисунок 4 – Показатели работы ЭТК: а – для конфигураций, состав которых приведён на рисунке 2, б – для конфигураций, состав которых приведён на рисунке 3

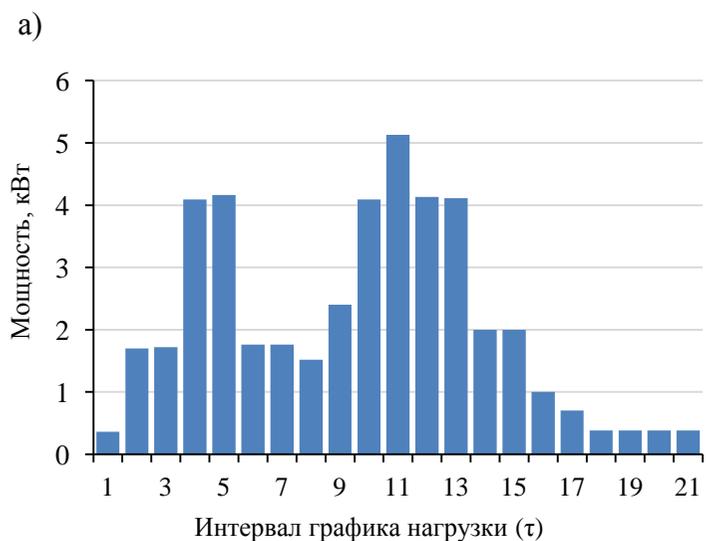


Рисунок 6 – а: индивидуальный график нагрузки ЭП с прерываемым циклом работы, б – оптимальное распределение интервалов работы ЭП генетическим алгоритмом в условном рассмотренном примере

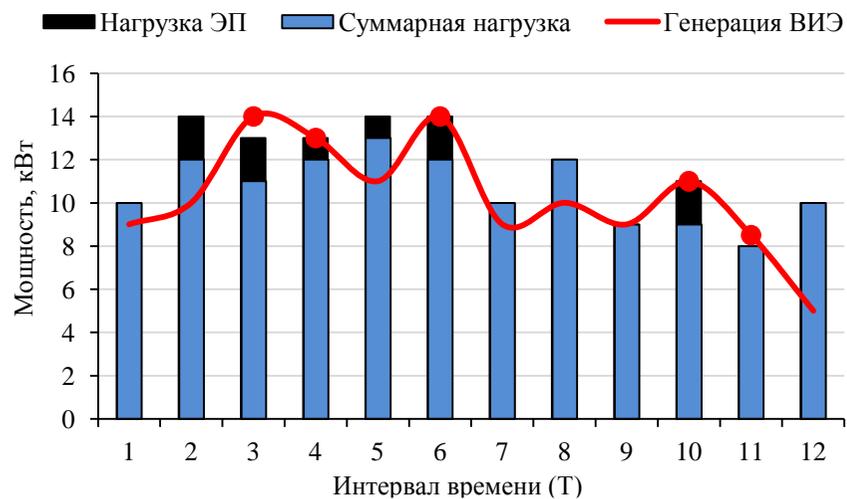


Рисунок 7 – Оптимальное распределение интервалов работы ЭП генетическим алгоритмом, полученное в ходе эксперимента

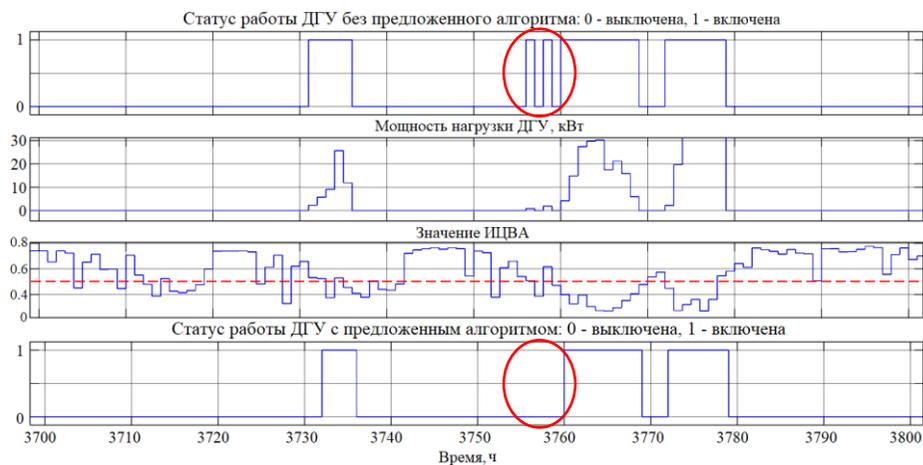


Рисунок 9 – Устранение двух непродолжительных включений ДГУ на часовых интервалах 3756..57 и 3758..59

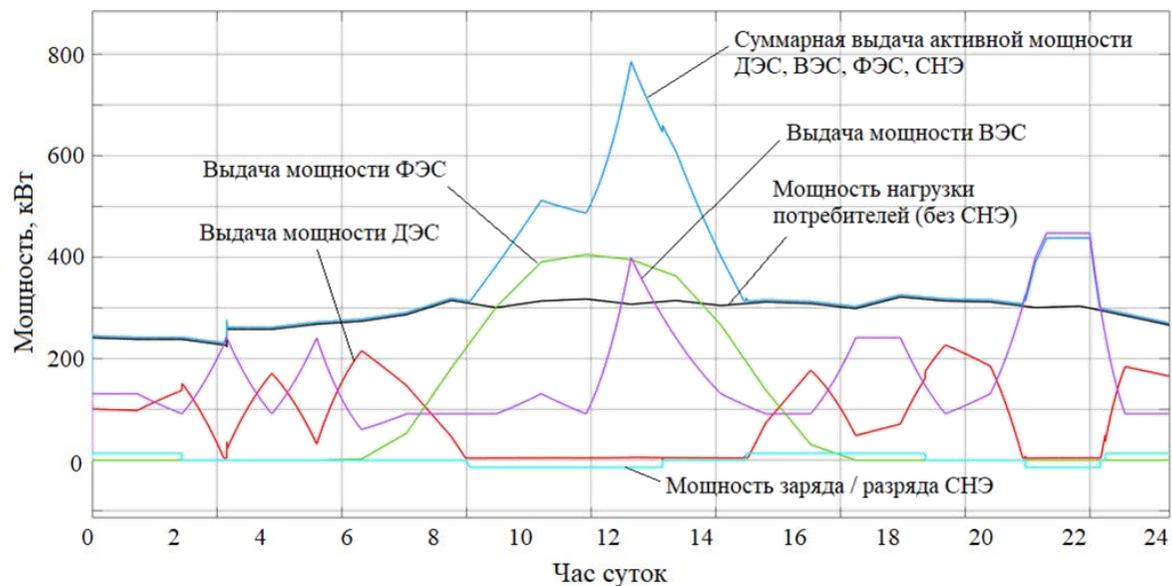


Рисунок 8 – Имитационное моделирование работы автономного ЭТК в течение суток