

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Веников В.А., Глазунов А.А., Жуков Л.А. и др.** Электрические системы. Электрические сети. — М.: Высшая школа, 1998.
2. **Каложный А.Х.** Управление потоками мощности в электрических сетях с помощью фазоповоротных трансформаторов. — Электричество, 1986, № 11.
3. **Моделирование** управляемых шунтирующих реакторов: <http://forum.regimov.net/index.php?t=msg&goto=5527&rid=0>
4. **Демчук А.Т., Жуков А.В., Лавров С.В.** Система управления режимами Тюменской энергосистемы с использованием технологии векторного измерения параметров. — Материалы междунаrod. конф. «Релейная защита и автоматика современных электроэнергетических систем»: http://www.energo-info.ru/images/pdf/Rele/Session_4/S4-5.pdf
5. **Методические** указания по устойчивости энергосистем. — Приказ Минэнерго России от 30.06.2003 № 277.

Авторы: Вайнштейн Роберт Александрович окончил электроэнергетический факультет (ЭЭФ) ТПИ в 1960 г. В 1965 г. защитил кандидатскую диссертацию. Доцент кафедры электроэнергетических систем и сетей ТПУ.

Кац Илья Маркович окончил электротехнический институт (ЭЛТИ) ТПУ в 2005 г. В 2009 г. защитил кандидатскую диссертацию. Доцент кафедры электроэнергетических систем и сетей ТПУ.

Коломиец Наталья Васильевна окончила ЭЭФ ТПИ в 1968 г. В 1975 г. защитила кандидатскую диссертацию. Доцент кафедры электроэнергетических систем и сетей ТПУ.

Лоцман Дмитрий Сергеевич окончил ЭЭФ ТПУ в 2002 г. Начальник отдела устойчивости, противоаварийной и режимной автоматики ОДУ Сибири.

Приходько Сергей Николаевич окончил ЭЛТИ ТПУ в 2010 г. Специалист службы энергетических режимов, балансов и развития Томского РДУ.

Русол Дмитрий Александрович окончил ЭЛТИ ТПУ в 2000 г. Директор ООО «Нефтьэнергопроект».

Шестакова Вера Васильевна окончила ЭЭФ ТПИ в 1990 г. В 1999 г. защитила кандидатскую диссертацию. Доцент кафедры электроэнергетических систем и сетей ТПУ.

* * *

Применение буферных накопителей энергии для повышения энергоэффективности ветродизельных электростанций¹

ЛУКУТИН Б.В., ОБУХОВ С.Г., ШУТОВ Е.А., ХОШНАУ З.П.

Представлены результаты анализа режимов работы ветродизельных электростанций с буферными системами накопления энергии. Предложен и описан алгоритм управления рабочими режимами автономных систем электроснабжения, построенных на базе ветроэнергетических установок и дизельных электростанций.

Ключевые слова: ветроэнергетические установки, дизельные электростанции, буферные накопители энергии, автономные системы электроснабжения

Повышение надежности и энергетической эффективности автономных систем электроснабжения децентрализованных потребителей является важнейшей задачей развития энергетики России, без успешного решения которой невозможно социально-экономическое развитие многих регионов РФ. По данным Минэнерго России из 50000 электростанций на территории России, 49000 относятся

Results obtained from a study aimed at analyzing the operating modes of wind-diesel power stations equipped with buffer energy storage systems are presented. An algorithm for controlling the working modes of independent power supply systems constructed on the basis of wind power installations and diesel power stations is proposed and described.

Key words: wind power installations, diesel power stations, buffer energy storages, power supply systems

к малым. Их суммарная установленная мощность составляет 17 тыс. МВт (около 8% общей установленной мощности всех электростанций), а годовая выработка электрической энергии достигает 50 млрд кВт·ч при расходе топлива 17 млн т.у.т. Основу малой энергетики России составляют дизельные электростанции (ДЭС), общее число которых превышает 47 тыс., что составляет около 96% общего числа малых энергетических установок.

Наряду с очевидными достоинствами ДЭС имеют ряд серьезных технических недостатков:

значительная доля топливной составляющей (до 85%) в себестоимости вырабатываемой электроэнергии;

высокий удельный расход топлива в режиме малых нагрузок;

¹ Исследования выполнены в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2012 годы» по направлению «Проведение проблемно-ориентированных поисковых исследований в области создания эффективных накопителей электрической энергии для нужд централизованной и автономной энергетики».

тяжелые эксплуатационные режимы дизелей (приводят к снижению ресурса) при нагрузках менее 25 и более 80% их номинальной загрузки двигателя;

невысокий уровень надежности электроснабжения потребителей, питающихся от ДЭС, построенных на базе 1–2 силовых агрегатов (характерно для ДЭС небольшой мощности).

Использование ветродизельных электростанций (ВДЭС) в системах электроснабжения децентрализованных потребителей позволяет успешно решить большую часть этих проблем. Дополнение ВДЭС ветроэнергетическими установками (ВЭУ) позволяет снизить долю топливной составляющей в себестоимости электроэнергии за счет замещения части органического топлива, повысить надежность электроснабжения потребителей путем введения в систему дополнительного генерирующего источника, увеличить ресурс дизельных двигателей за счет обеспечения шадящих эксплуатационных режимов. Использование в составе ВДЭС буферных накопителей энергии (БНЭ) также позволяет снизить долю топливной составляющей за счет замещения энергии, вырабатываемой ДЭС, энергией, запасенной в накопителе при работе ВЭУ; значительно увеличить ресурс дизелей путем оптимизации их рабочих режимов; повысить уровень надежности электроснабжения потребителей за счет введения в систему по сути бесперебойного источника питания; улучшить показатели качества генерируемой электрической энергии в динамических режимах.

Обобщенная структурная схема ВДЭС приведена на рис. 1, где силовые электрические соединения показаны сплошными линиями, управляющие каналы обозначены штриховыми линиями.

В общем случае в состав ВДЭС входят два генерирующих источника: синхронный генератор *СГ* с приводом от дизельного двигателя *ДД* и ветрогенератор *ВГ* с приводом от ветротурбины *ВТ*. При использовании стандартной общепромышленной системы управления *СУ* дизельной электростанцией частота вращения *ДД* жестко стабилизирована; переменное напряжение частотой 50 Гц от *СГ* подается на сборные шины *СШ* потребителя. В качестве *ВГ* могут применяться различные типы электрических машин: синхронные с обмоткой возбуждения или магнитоэлектрические, а также асинхронные с возбуждением от *СГ* или от конденсаторных батарей. Однако в большинстве промышленных схем построения ВЭУ малой мощности частота вращения *ВТ* не стабилизируется и частота переменного тока *ВГ* изменяется в широких пределах. Для приведения параметров выходного напряжения *ВГ* к стандартным в состав ВЭУ обязательно входят выпрямитель *В* и автономный инвертор *АИ*. Излишки энергии, вырабатываемой *ВГ* при сильных ветрах и малой нагрузке, поглощаются, как правило, балластной нагрузкой *БН*, входящей в состав ВЭУ и представляющей собой теплонегательные элементы; регулятор балластной нагрузки *РБН* обеспечивает изменение потребляемой мощности *БН*.

При введении в состав ВДЭС буферного накопителя энергия *БНЭ* необходимым элементом электростанции является специализированное зарядно-разрядное устройство *ЗРУ*, обеспечивающее заряд накопителя от *СГ* и *ВГ* через управляемые выпрямители *В* и его разряд на сборные шины через шину постоянного тока *ШПТ* и *АИ*.

Серьезной технической проблемой автономных систем электроснабжения является соизмеримость

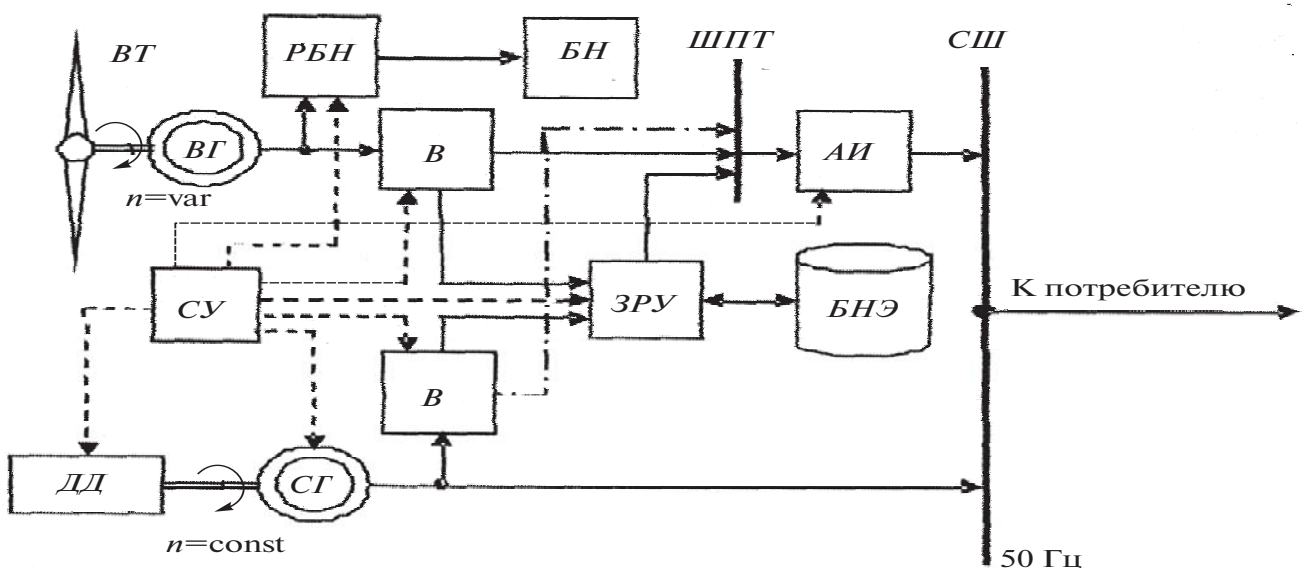


Рис. 1. Обобщенная структурная схема ВДЭС

мощностей основного генерирующего оборудования и потребителя, что требует согласования режимов производства и потребления энергии в изолированной энергетической системе. В случае ВДЭС проблема осложняется стохастическим характером электрической нагрузки потребителя и энергии воздушного потока, которая определяет выходную мощность ВЭУ. При этом неизбежны эксплуатационные режимы электростанции, в которых текущая потребляемая мощность нагрузки будет значительно отличаться от выдаваемой на данном временном интервале мощности ВЭУ. Имеющаяся в составе электростанции *БНЭ* позволяет покрывать пики нагрузок во время их максимума, обеспечивать запас энергии от ВЭУ в периоды сильных ветров, кроме того, появляется техническая возможность реализовать более экономичный режим работы дизельного двигателя ДЭС.

Чтобы ВДЭС обладала хорошими энергетическими и технико-экономическими характеристиками, необходимо технически грамотно выбрать состав и номенклатуру основного энергетического оборудования с учетом характеристик ветрового режима в месте размещения ВДЭС и характера нагрузки потребителя, а также обеспечить рациональное управление ее рабочими режимами.

Ввиду многообразия и сложности рабочих режимов ВДЭС для них требуется разработка специализированных устройств управления, обеспечивающих реализацию ряда важных функций, при этом логика их функционирования может быть довольно сложной.

Ниже представлен алгоритм управления режимами работы ВДЭС, разработанный авторами. Разработка алгоритма управления ВДЭС проводилась с учетом следующих ограничений:

1. Установленная номинальная мощность рабочих дизель-генераторов электростанции $P_{ДЭСном}$ должна обеспечивать покрытие максимальной нагрузки потребителя $P_{нmax}$:

$$P_{ДЭСном} \geq P_{нmax}. \quad (1)$$

2. Запас энергии в буферном накопителе $W_{БНЭ}$ должен обеспечивать покрытие максимальной электрической нагрузки на время переключения $t_{пер}$:

$$W_{БНЭ} \geq P_{нmax} t_{пер}. \quad (2)$$

Минимальное значение времени переключения определяется временем пуска и вывода на номинальный режим дизельного двигателя и составляет в зависимости от его типоразмера от нескольких секунд до нескольких минут. Рациональное $t_{пер}$ зависит от характера изменения суточного графика нагрузки, распределения скоростей ветра, установ-

ленных мощностей ВЭУ и ДГ, оно может составлять до нескольких часов и определяется на основании технико-экономических расчетов.

Выполнение первых двух условий необходимо для обеспечения гарантированного электроснабжения потребителей.

Если *БНЭ* построен на основе аккумуляторных батарей АБ, необходимо учитывать следующие ограничения:

3. Максимальная глубина разряда аккумуляторных батарей не должна превышать 70% их номинальной емкости:

$$Q_{АБ} \geq 0,3U_{АБ}Q_{АБном}, \quad (3)$$

где $Q_{АБ}$ – остаточная емкость аккумуляторных батарей, Втж; $U_{АБ}$ – номинальное напряжение аккумуляторных батарей, В; $Q_{АБном}$ – номинальная емкость аккумуляторных батарей, Аж.

4. Зарядный ток (зарядная мощность) АБ не должен превышать 10% их номинальной емкости:

$$I_{зАБ} \leq 0,1Q_{АБном}, \text{ А}; P_{зАБ} \leq 0,1U_{АБ}Q_{АБном}, \text{ Вт}, \quad (4)$$

где $I_{зАБ}$, $P_{зАБ}$ – зарядный ток и зарядная мощность АБ.

5. Разрядный ток (разрядная мощность) АБ не должен превышать 15% их номинальной емкости:

$$I_{рАБ} \leq 0,15Q_{АБном}, \text{ А}; P_{рАБ} \leq 0,15U_{АБ}Q_{АБном}, \text{ Вт}, \quad (5)$$

где $I_{рАБ}$, $P_{рАБ}$ – разрядный ток и разрядная мощность АБ.

Выполнение условий 3–5 обеспечивает эксплуатационный ресурс аккумуляторов.

Выполнение ограничений 1–5 является обязательным. Однако для достижения максимальной энергетической эффективности ВДЭС алгоритм управления режимами комплекса должен реализовывать следующие дополнительные функции:

6. Максимальное полезное использование энергии, вырабатываемой ВЭУ.

7. Обеспечить загрузку дизельного двигателя в продолжительных режимах на уровне 70–80% его номинальной мощности.

8. Не допускать частых включений (отключений) дизеля и его режимов работы на малых нагрузках.

Выполнение условия 6 обеспечит максимальное замещение энергии, вырабатываемой ДЭС, энергией ВЭУ, а следовательно, и максимальную экономию дизельного топлива. Реализация условия 6 достигается рациональным выбором установленных мощностей ВЭУ и БНЭ с учетом ветрового режима и характера нагрузки.

Выполнение условий 7, 8 приводит к увеличению эксплуатационного ресурса ДД, а соответст-

венно, и надежности электроснабжения потребителей.

Изложенный алгоритм управления режимами ВДЭС представлен на рис. 2. Здесь приняты следующие обозначения:

$Q_{AB}, \underline{Q}_{AB}$ – текущая и номинальная (полная) емкость аккумуляторных батарей соответственно, Втж;

$P_{ВЭУ}, P_{ДЭС}$ – текущие значения мощности, генерируемой ветроэнергетической установкой и дизельной электростанцией соответственно, Вт;

P_H – текущие значения мощности, потребляемой нагрузкой, Вт;

$P_{zAB}, P_{зAB}, P_{рAB}$ – номинальная, зарядная и разрядная мощности аккумуляторных батарей соответственно, Вт;

$P_{из}$ – избыточная мощность, генерируемая ВЭУ на текущем интервале времени, Вт;

P_{BH} – текущие значения мощности, рассеиваемой на балластных сопротивлениях, Вт;

dt – интервал времени, соответствующий текущему рабочему режиму ВДЭС, ч;

$S_{ДЭС}$ – логическая переменная, характеризующая состояние дизельного двигателя:

$S_{ДЭС} = 1$ – дизель в работе; $S_{ДЭС} = 0$ – дизель остановлен.

Логика предлагаемого алгоритма управления режимами ВДЭС предусматривает выполнение двух основных принципов: максимальное полезное использование энергии, генерируемой ВЭУ, и минимизация числа часов работы ДЭС. Для практической реализации алгоритма управления необходим постоянный контроль за запасом энергии в буферном накопителе и текущими значениями генерируемой, потребляемой и аккумулируемой мощности. Кроме того, ДЭС должна быть выполнена по первой степени автоматизации, обеспечивающей дистанционный автоматический запуск и останов дизельного двигателя.

Интеллектуальная система управления ВДЭС обеспечивает постоянное распределение потоков энергии в замкнутой энергетической системе в зависимости от ее текущего состояния. С точки зрения управления режим работы станции определяется соотношением текущих значений мощности, генерируемой ВЭУ и потребляемой нагрузкой. Возможны два основных режима:

1. Выходная мощность ВЭУ больше потребляемой активной мощности нагрузки. В этом режиме потребитель полностью обеспечивается энергией от ВЭУ. Излишняя мощность ВЭУ направляется на заряд аккумуляторных батарей, а в случаях, когда

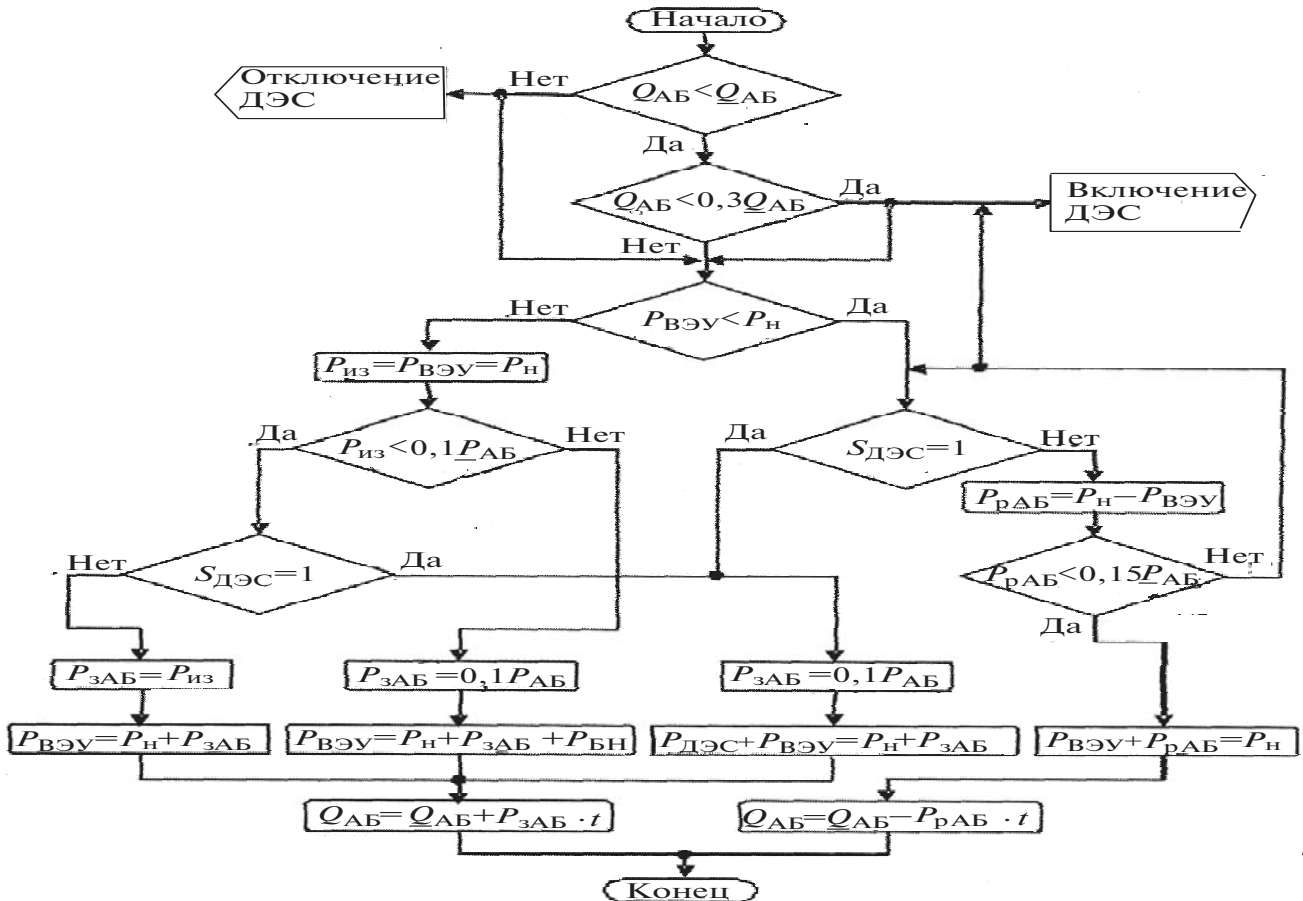


Рис. 2. Алгоритм управления режимами ВДЭС

она превышает максимальную зарядную мощность АБ, избыток энергии рассеивается на балластных сопротивлениях.

2. Выходная мощность ВЭУ меньше потребляемой активной мощности нагрузки. В этом режиме СУ определяет недостаток мощности, необходимой потребителю, и производит оценку возможности ее получения из БНЭ. Если необходимая в текущем режиме разрядная мощность накопителя не превышает предельно допустимых значений, то покрытие электрической нагрузки ВДЭС проводится за счет мощности ВЭУ и разрядной мощности АБ. В противном случае СУ формирует управляющий сигнал на запуск дизельного двигателя, и покрытие электрической нагрузки проводится совместной работой ВЭУ и ДЭС, которые кроме этого обеспечивают заряд АБ.

Во всех рабочих режимах проводится контроль за остаточной емкостью АБ. Если остаточная емкость АБ достигает номинального значения, подается сигнал на останов ДД, если остаточная емкость АБ составляет менее 30% ее номинальной (полной) емкости, подается сигнал на запуск ДД.

С целью минимизации тяжелых с точки зрения эксплуатационного ресурса режимов пуска дизелей логика управления ВДЭС организована таким образом, что после запуска ДЭС она остается в работе до полного заряда аккумуляторных батарей, обеспечивая ее постоянную подзарядку оптимальным зарядным током.

В качестве примера на рис. 3 представлен суточный режим работы ВДЭС, построенный на базе дизель-генератора номинальной мощностью 12 кВт, ВЭУ мощностью 30 кВт и буферного накопителя

из 40 аккумуляторов с суммарной емкостью 90 кВт·ч.

Представленный график получен по результатам имитационного математического моделирования автономной системы электроснабжения поселка Усть-Оленёк, Булунский улус, республика Саха (Якутия). При моделировании использовались вероятностно-статистические модели нагрузок автономного потребителя и энергии воздушного потока, а также энергетические модели ВЭУ и ДЭС [1, 2].

Исследования показали, что использование в составе ВДЭС буферных накопителей энергии позволяет повысить коэффициент полезного использования ВЭУ за счет запаса энергии в накопителе в режимах превышения входной мощности ВЭУ над потребляемой нагрузкой, а также значительно улучшить эксплуатационные режимы дизельных двигателей. Ключевым вопросом при проектировании ВДЭС с буферной системой накопления энергии является определение оптимальной емкости накопителя.

Методика выбора оптимального варианта построения ВДЭС основана на расчете и сравнительном анализе энергетических характеристик автономной электростанции, предназначенной для электроснабжения конкретного потребителя с географической привязкой к месту ее размещения. Применение такого подхода обусловлено тем, что энергетическая эффективность ВДЭС зависит от множества технических (распределение скоростей ветра в месте установки электростанции, характер электрической нагрузки, типоразмер ДГ и ВЭУ) и экономических (стоимость дизельного топлива, ДГ, ВЭУ, аккумуляторных батарей) факторов.

Улучшение энергетических характеристик ВДЭС достигается за счет рационального выбора установленных мощностей генерирующих и аккумулирующих источников, определяемых параметрами ветрового режима в месте размещения электростанции и характером электрической нагрузки потребителя, а также оптимального управления потоками энергии в замкнутой энергетической системе, которое обеспечивает единая система управления рабочими режимами. Так как рациональное соотношение установленных мощностей ДЭС, ВЭУ и БНЭ не является типовым, а определяется индивидуально для каждой ВДЭС с учетом конкретных условий ее размещения и эксплуатации, в качестве критерия выбора основного силового оборудования целесообразно использовать технико-экономические показатели.

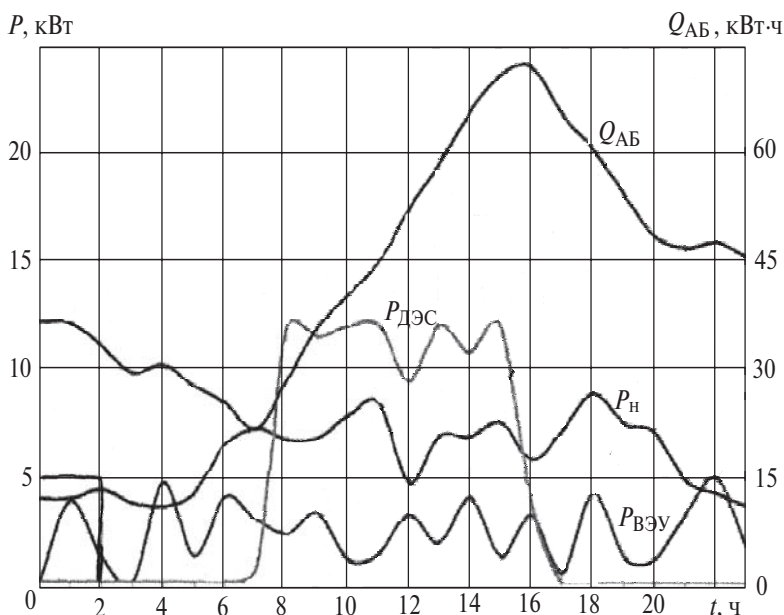


Рис. 3. Суточный рабочий режим ВДЭС с буферным накопителем энергии

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Обухов С.Г.** Метод моделирования механических характеристик ветротурбин малой мощности. — Альтернативная энергетика и экология, 2011, № 1.

2. **Обухов С.Г., Сурков М.А., Хошнау З.П.** Методика выбора ветроэнергетических установок малой мощности. Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2011, № 2.

Авторы: Лукутин Борис Владимирович окончил в 1971 г. ТПИ. Докторскую диссертацию «Режимы работы синхронных и асинхронных генераторов микрогидроэлектростанций» защитил в 1994 г. Профессор, зав. кафедрой электроснабжения промышленных предприятий ТПУ.

Обухов Сергей Геннадьевич окончил в 1985 г. ТПИ. Кандидатскую диссертацию «Динамические режимы работы автономного машинно-вентильного источника питания для микроГЭС» защитил в 1989 г. Доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий ТПУ.

Шутов Евгений Алексеевич окончил в 1986 г. ТПИ. Кандидатскую диссертацию «Динамические режимы работы индукционной машины двойного питания» защитил в 1990 г. Доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Энергетического института ТПУ.

Хошнау Зана Пешанг Халил окончил магистратуру ТПУ в 2008 г. Аспирант ТПУ.