

УСТРОЙСТВА FACTS В КОНТЕКСТЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

FACTS DEVICES IN THE CONTEXT OF IMPROVING ENERGY EFFICIENCY IN MACHINE-BUILDING INDUSTRIES

**V. Knyazev
L. Shvartsburg**

Summary. Instrumental methods, techniques for improving energy efficiency and reducing energy costs by introducing energy-saving technologies and creating automated, distributed intelligent power control and distribution networks are gaining significant importance in the modernization of domestic enterprise power supply systems. The article assesses the energy intensity of machine building industries and describes the characteristics of electrical consumers in this sector. It also justifies the need for introducing energy-saving technologies in the power supply of machine-building companies and provides a classification of active, adaptive hardware devices (FACTS) and their applications.

Keywords: energy efficiency, energy intensity, FACTS (Flexible AC Transmission Systems) devices, automation tools, and electricity quality.

Князев Владислав Валерьевич

Аспирант, ФГБОУ ВО Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»
driver1796@yandex.ru

Шварцбург Леонид Эфраимович

Доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»
lesh@stankin.ru

Аннотация. Инструментальные методы, способы повышения энергоэффективности, снижения затрат энергоресурсов посредством ввода энергосберегающих технологий и создания на их базе автоматизированных распределённых интеллектуальных сетей контроля и распределения электроэнергии приобретают большой вес при рассмотрении вопросов модернизации систем электроснабжения отечественных предприятий. В статье приведена оценка энергоёмкости машиностроительных производств, дана характеристика потребителей электроэнергии, относящихся к машиностроению. Обоснована необходимость внедрения энергосберегающих технологий в системы электроснабжения машиностроительных предприятий, приведена классификация активно-адаптивных аппаратных устройств FACTS и области их применения.

Ключевые слова: энергоэффективность, энергоёмкость, устройства FACTS, средства автоматизации, качество электроэнергии.

Вопросы максимально эффективной работы электроэнергетических систем (ЭЭС) государств или же крупных геополитических объединений остаются актуальными на сегодняшний день и имеют стратегический характер в силу доминирующего положения электроэнергии (ЭЭ) как универсального и относительно удобного вида энергоресурса для передачи и её преобразования на далёкие расстояния. Задача повышения энергоэффективности ЭЭС является общей как для генерирующих электричество компаний, сетевых организаций, так и для конечных крупных потребителей. Общий характер задачи, необходимость совместных усилий в области энергосбережения обуславливается присутствием потерь энергии на всех этапах её передачи (генерации источником, передачи через системообразующую, распределительную электрические сети, распределения на подстанциях потребителей), величины которых определяются характерными особенностями каждого этапа, и влиянием этих потерь на каждого участника ЭЭС.

Одними из показателей, отражающих качество ЭЭ, регламентируемых ГОСТ 32144–2013, являются медлен-

ные и одиночные быстрые изменения напряжения, обуславливаемые изменениями нагрузок в электроустановках потребителей. К показателям также относится и не синусоидальность напряжения, вызываемая присутствием в ЭЭС нелинейных нагрузок различных типов. Поддержание качества ЭЭ и минимизация энергопотерь являются неотъемлемыми условиями реализации устойчивых, энергоэффективных технологических процессов (ТП) промышленных предприятий и обеспечения безопасных условий труда при их проведении [1, 2, 3]. Наибольшее предпочтение среди всех мероприятий по росту энергоэффективности производств отдаётся регулированию напряжения в узлах потребления и компенсации реактивной мощности (РМ). Последнее является комплексом мероприятий, направленных, в первую очередь, на поддержание перечисленных ранее параметров качества ЭЭ в допустимых пределах, симметрирование нагрузок, а также на недопущение перетоков в ЭЭС, встречных направлению потоков активной мощности (АМ) в сетях переменного трёхфазного тока, приводящих к росту токовой нагрузки, потерь АМ и напряжения. Математические взаимосвязи величины ре-

активной компоненты в ЭЭС и перечисленных явлений подробно расписаны в следующих источниках [3, 4, 5].

При отсутствии реализации технических мер по устранению первоначальных завышенных нагрузок и энергопотерь перед предприятиями неизбежно будет возникать необходимость дополнительных финансовых затрат для расширения, обновления технического оснащения производственных распределительных сетей (приёмников электроэнергии, преобразователей, защитной и распределительной аппаратуры электросети).

Помимо вышеотмеченного, вопрос управления РМ на машиностроительных предприятиях и не только непосредственно влияет на: степень воздействия санитарно-гигиенических факторов на человека; полную энергоёмкость производств и удельную (технологическую) энергоёмкость продукции. Последнее определяет себестоимость изготавливаемой продукции и, соответственно, конкурентоспособность предприятий. На основании анализа иностранных и российских специалистов, доля энергетических ресурсов, в том числе и электроэнергии, составляет приблизительно 30–40 % конечной стоимости готовой продукции [4].

Проблема машиностроительных предприятий, заключающаяся в малой степени оснащённости энергоэффективными средствами регулирования ЭЭ (данная проблема особенно актуальна для мелкосерийных и единичных производств), также прослеживается через высокую удельную энергоёмкость выпускаемых изделий относительно энергоёмкости продукции большинства экономически развитых государств. Единая технологическая иерархическая энергосистема (ЕЭС) СССР, несмотря на свою эффективность в контексте сбалансированного обеспечения ЭЭ широких охватов территорий, была нацелена, прежде всего, на бесперебойность функционирования предприятий в условиях централизованной плановой экономики, и вопросы энергоёмкости продукции рассматривались редко, что является критическим аспектом при рыночной системе. Большая неравномерность расположения как энергогенерирующих источников, так и энергопотребителей привела к внушительной протяжённости распределительных сетей между ними. Как известно, линии электропередач (ЛЭП) представляют собой сложный электромагнитный компонент ЭЭС, способный как генерировать РМ, так и потреблять её, причём величина реактивного сопротивления в каждом случае пропорциональна длине линии [6, 7].

Машиностроительные предприятия выделяются среди хозяйственных экономических субъектов обилием потребителей РМ, что характеризует машиностроительные ЭЭС как одну из наиболее важных областей для внедрения энергоэффективных технологий [4, 5]:

- 1) Асинхронные двигатели (АД), на долю которых приходится 60–70 % поглощения РМ, применяемые в:
 - устройствах электропривода станочного оборудования (потребление РМ варьируется в зависимости от коэффициента загрузки АД);
 - силовых общепромышленных установках ($\cos \varphi = 0,3 \div 0,8$) (вентиляционных, подъёмно-транспортных, насосно-компрессорных устройствах ($\cos \varphi = 0,8 \div 0,85$) и системах кондиционирования);
 - электросварочных установках ($\cos \varphi = 0,7 \div 0,8$), обладающие мощностью до 1500 кВт, работающих в повторно-кратковременном режиме;
 - прокатных установках, нагрузка которых по характеру периодическая, резкопеременная, ударная при прокате металла;
 - кузнечнопрессовом оборудовании;
- 2) Электрические печи: печи сопротивления (косвенного и прямого действия) ($\cos \varphi = 0,7 \div 0,9$); индукционные плавильные печи ($\cos \varphi = 0,2 \div 0,8$); дуговые электрические печи (косвенного и прямого действия) ($\cos \varphi = 0,85 \div 0,9$); руднотермические печи и электрошлакового переплава ($\cos \varphi = 0,85 \div 0,92$);
- 3) Осветительные электроприборы: газоразрядные лампы, оснащённые дросселями ($\cos \varphi = 0,5 \div 0,6$); люминесцентные лампы; металлогалогенные лампы; дуговые ртутные люминесцентные лампы;

Печи, сварочные, прокатные, кузнечнопрессовые нагрузки можно отнести к единой группе потребителей РМ, существенно воздействующей на динамическую устойчивость ЭЭС машиностроительных предприятий за счёт резкопеременного характера нагрузки. Потребители, подключённые к общей точке энергосети вместе с устройствами данной группы, оказываются под воздействием колебаний напряжения, что сказывается на производительности их работы.

Вопрос статической и динамической устойчивости ЭЭС, генерации/потребления РМ для поддержания баланса мощностей производств, направленным на отсутствие дефицита РМ в энергосистеме, не является новым и имеет уже выработанные технические решения за прошедшее столетие в виде компенсационных устройств (КУ) FACTS первого поколения, обеспечивающие необходимый уровень компенсации РМ за счёт скалярного регулирования напряжения или РМ. К ним относятся коммутируемые статические КУ (статические компенсаторы, батареи статических конденсаторов (БСК), шунтирующие реакторы (ШР)), синхронные КУ (компенсаторы, двигатели и генераторы), трансформаторы с устройствами регулирования под нагрузкой и переключения без возбуждения. Недостатками перечисленных статических КУ являются отсутствие быстрого действия, а также автоматического, плавного и непрерывного регулирования напряжения и РМ, при-

водящее к падению устойчивости работы нагрузки и понижению пропускной способности ЛЭП [8]. Плавное регулирование свойственно синхронным КУ, но они также обладают рядом существенных недостатков:

- 1) Синхронные генераторы плохо функционируют в режиме потребления РМ в связи с порчей изоляции вследствие перемагничивания стальных

пластин сердечника, приводящего к нагреву обмоток статора.

- 2) Необходимость снижения выдаваемой АМ в сеть за счёт большой величины потребления АМ СД для снижения выработки РМ или перехода в режим потребления РМ.

Классификация устройств FACTS

Скалярного регулирования:	Векторного регулирования:
<ul style="list-style-type: none"> — БСК* — СТК (SVC)*: <ul style="list-style-type: none"> возможный состав СТК: конденсатор с тиристорным управлением (ТСС) реактор с тиристорным управлением (ТСР) коммутируемые тиристорные конденсаторы (ТСК) коммутируемые тиристорные реакторы (ТСР) — ШР* — УШР*: <ul style="list-style-type: none"> разновидности: УШР на основе тиристорно- реакторных групп (УШРТ) УШР с подмагничиванием с постоянным током (УШРП) управляемые тиристорами трансреакторы (УТРТ) УШР на основе вакуумно-реакторных групп — ВРГ* — УПК (TCSC)* — УУПК (TCSC)* — СМ+: <ul style="list-style-type: none"> СГ (SG)+ СК (SC)+ СД (SM)+ 	<p>На базе преобразователя напряжения:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <ul style="list-style-type: none"> СТАТКОМ (с накопителем/без)* Д-СТАТКОМ* Фазоповоротное устройство (ФПУ) (ТСПАР)* Объединённый регулятор потока мощности (ОРПМ) (UPFC)* Интегрированный контроллер потока мощности (IPFC)* Статический синхронный последовательный компенсатор (ССПК) (SSSC)* Вставка постоянного тока на преобразователях напряжения (ВПТН)* Объединенный (параллельно-последовательный) кондиционер качества электроэнергии (UPQC)* </div> <ul style="list-style-type: none"> Динамический восстановитель напряжения (ДВН) (DVR)* Вставка постоянного тока (ВПТ) (Thyristor based DC link)* Фазовращающий трансформатор (PST) (ФВТ)+ Асинхронизированные машины (АСМ)+: <ul style="list-style-type: none"> Асинхронизированные компенсаторы (АСК)+ Асинхронизированные генераторы (АСГ)+ Асинхронизированный синхронный электромеханический преобразователь частоты (АС ЭМПЧ)+

Статические: * Электромашинные: +

Рис. 1.

Источник: составлено авторами

Таблица 1.

Характеристики и область применения устройств FACTS.

Наименование устройства	Тип действия	Предназначение	Тип воздействия на параметры сети
Батарея статических конденсаторов (БСК)	Поперечная компенсация	Ступенчатое регулирование РМ (напряжения) ЛЭП, вблизи нагрузки (индивидуальная компенсация). Возможна автоматизация. Применяются в сетях низких, средних, высоких напряжений (0,4–220 кВ)	Емкостное
Шунтирующие реакторы (ШР)	Поперечная компенсация	Компенсация емкостного сопротивления ЛЭП, шин подстанций сверхвысоких, высоких, средних вторых и первых напряжений (6–1150 кВ)	Индуктивное
Управляемые шунтирующие реакторы (УШР)	Поперечная компенсация	Плавное регулирование РМ (напряжения) на ЛЭП, шинах подстанций распределительных сетей, не предназначены для обеспечения требований устойчивости энергосети (110–500 кВ)	Индуктивное
Статические тиристорные компенсаторы (СТК) (SVC)	Поперечная компенсация	Плавное регулирование РМ (напряжения), предотвращение перегрузки, фильтрация гармоник, симметрирование напряжения в ЛЭП распределительных и магистральных сетей, повышение динамической устойчивости энергосетей. Малоэффективны в сетях низкого напряжения (3,3–765 кВ)	Универсальное
Реакторные группы, коммутируемые вакуумными выключателями (ВРГ)	Поперечная компенсация	Ступенчатое регулирование напряжения, компенсация зарядной мощности ЛЭП и в узлах нагрузки распределительных сетей высоких и средних напряжений, поддержание напряжения в необходимом диапазоне в установившихся режимах за счёт ограничения его уровня (6–35 кВ)	Индуктивное
Устройство продольной компенсации (УПК) (TCSC)	Продольная компенсация	Регулирование напряжения, ограничение тока КЗ, компенсация реактивного сопротивления ЛЭП высоких и сверхвысоких напряжений, повышение статической и динамической устойчивости ЛЭП (220–750 кВ)	Емкостное
Управляемое УПК (TCSC)	Продольная компенсация	Гибкая компенсация реактивного сопротивления ЛЭП высоких и сверхвысоких напряжений, ограничение тока КЗ, подавление субсинхронного резонанса, плавное управление перетоками мощности ЛЭП (220–500 кВ)	Емкостное
Синхронные двигатели (СД) (SM)	Поперечная компенсация	Плавное регулирование РМ, напряжения (индивидуальная компенсация). Применяются в составе технологического оборудования. Также устанавливаются на низком напряжении понижающих подстанций — 6 и 10 кВ	Универсальное
Синхронные компенсаторы (СК) (SC)	Поперечная компенсация	Непрерывное, плавное регулирование РМ (напряжения), стабилизация уровня напряжения, повышение динамической и статической устойчивости, снижение потерь ЭЭ в точках ЭЭС большого сосредоточения и широкого изменения нагрузок. Устанавливаются на низком напряжении понижающих подстанций — 6 и 10 кВ	Универсальное
Синхронные генераторы (СГ) (SG)	Поперечная компенсация	Плавное регулирование РМ, Устанавливаются на низком напряжении понижающих подстанций — 6 и 10 кВ	Универсальное
Статический синхронный компенсатор (СТАТКОМ) (STATCOM)	Поперечная компенсация	Компенсация РМ, управление величиной напряжения, подавление гармоник напряжения. Используется как в высоконагруженных, так и слабых сетях 0,96–38,5 кВ. Наиболее эффективен в последних	Универсальное
Статический синхронный компенсатор с накопителем (СТАТКОМ) (STATCOM)	Поперечная компенсация	Комбинация СТАТКОМА и накопителя электрической энергии для выравнивания графиков нагрузки в сети (высвобождение накопленной ЭЭ в ЭЭС в моменты её дефицита)	Универсальное
Распределительный статический синхронный компенсатор (Д-СТАТКОМ) (D-STATCOM)	Поперечная компенсация	Разновидность СТАТКОМА, применяемая в сетях среднего напряжения (распределительных сетях). Компенсация РМ, управление величиной напряжения, подавление гармоник напряжения	Универсальное

Наименование устройства	Тип действия	Предназначение	Тип воздействия на параметры сети
Фазоворотное устройство (фазосдвигающий трансформатор (ФСТ/ФПУ) (TCSPAR))	Комбинированная компенсация	Контроль АМ, регулировка фазы напряжения, перераспределение потоков мощности по параллельным ЛЭП. Подавление колебаний. Рост пропускной способности электросетей. Не применяются для динамической стабилизации режимов функционирования энергопередачи (35...800 кВ)	Фазорегулирующее
Фазовращающийся трансформатор (ФВТ) (PST)	Комбинированная компенсация	Динамическое управление потоками мощности для компенсации перегрузки, изменение уровня напряжения, фазного угла. Повышение стабильности системы, динамической безопасности (120...220 кВ)	Фазорегулирующее
Асинхронизированные компенсаторы (АСК)	Продольная компенсация	Регулирование РМ, напряжения и его фазы вектора, перераспределение потоков мощности по параллельным линиям, повышение пропускной способности электропередачи, рост статической и динамической устойчивости ЭЭС всех напряжений, наиболее эффективны в слабых сетях. Разновидность АСК с маховиком на валу применяется в сетях с резкопеременными нагрузками (110...500 кВ)	Универсальное
Асинхронизированные генераторы (АСГ)	Продольная компенсация	Независимое регулирование РМ и АМ. Рост статической и динамической устойчивости систем передачи электроэнергии, ЭЭС. Повышение качества управления переходными процессами	Универсальное
Асинхронизированные синхронные электропреобразователи частоты (АСЭМПЧ)	Комбинированная компенсация	Предназначение схоже с ВПТН Обладают высокой перегрузочной способностью. Передача энергии между двумя ЭЭС с целью предотвращения аварийных ситуаций. Питание нагрузок в сети, крайне восприимчивых к колебаниям напряжения (220 кВ)	Универсальное
Объединённый регулятор потока мощности (ОРМП) (UPFC)	Комбинированная компенсация	Компенсация РМ и АМ, управление потоком РМ и АМ в линии, корректировка угла сдвига фаз напряжений по концам ЛЭП, стабилизация напряжения, ограничение тока КЗ, управление реактивным сопротивлением, рост пропускной способности и динамической устойчивости ЛЭП	Универсальное
Динамический восстановитель напряжения (ДВН) (DVR)	Продольная компенсация	Компенсация РМ и АМ, гармоник напряжения. Защита чувствительных нагрузок от искажений и провалов напряжения источника питания, вызванных КЗ, перегрузкой или запуском электродвигателей. Стабилизация режимов функционирования энергопередачи	Универсальное
Объединённый (параллельно-последовательный) кондиционер качества электроэнергии (UPQC)	Комбинированная компенсация	Одновременная компенсация по току и напряжению. Компенсация РМ нагрузки. Компенсация гармоник напряжения, устранение дисбаланса нелинейной нагрузки и источника питания. Подключаются в системах распределения ЭЭ вблизи нагрузок, генерирующих гармонические токи. UPQC состоит из комбинированных шунтирующих и последовательных активных фильтров	Универсальное
Устройство управления распределением мощности между линиями (IPFC)	Комбинированная компенсация	Передача АМ между линиями электропитания для уравнивания потоков АМ и РМ между ними, снижения нагрузки на перегруженных линиях, компенсации падения напряжения. Повышение устойчивости ЭЭС	Универсальное
Статический синхронный продольный компенсатор (ССПК) (SSSC)	Продольная компенсация	Управление реактивным сопротивлением линии. Корректировка угла сдвига фаз, стабилизация напряжения, ограничение тока КЗ, демпфирование колебаний энергосистемы, рост её статической и динамической устойчивости	Универсальное
Вставка постоянного тока (ВПТ) (Thyristor based DC link)	Комбинированная компенсация	Преобразование трёхфазного тока в постоянный и снова в переменный исходной или же иной частоты для (не)синхронного объединения двух энергосистем для повышения пропускной способности ЛЭП. Неприменимы в электрических сетях с дефицитом РМ на уровне, требуемом для работы ВПТ. Автономный режим работы невозможен	Универсальное
Вставка постоянного тока на преобразователях напряжения (ВПТН) (STATCOM based DC link)	Комбинированная компенсация	Регулирование, управление потоками РМ и АМ в широком диапазоне при не-синхронном объединении энергосистем. Предусматривается возможность работы в автономном режиме	Универсальное

Источник: составлено авторами

В силу вышеотмеченных недостатков перечисленных КУ, они не способны в полной мере обеспечивать полноценную реализацию энергоэффективных промышленных ТП в условиях многокритериальности задачи оптимизации энергосетей, учитывающей в каждом конкретном случае весомые различия производств, отражающихся в разновидностях электроприёмников, числе и мест их размещения, величинах напряжения для питания энергосистем предприятий т.д. Данное обстоятельство обуславливает внедрение более широкого спектра активно-адаптивных средств регулирования ЭЭ и компенсации, относящихся к технологиям FACTS (в частности второго поколения) — программно-аппаратных гибких технических систем передачи переменного тока, реализованных на базе современной силовой электроники, выполняющие регулирование по параметрам величины напряжения, фазового угла, АМ и РМ. Управление перечисленными параметрами при помощи FACTS направлено на исполнение двух целей: поддерживать поток мощности ЭЭС в заданных пределах, обеспечивая устойчивость ЭЭС и повышении пропускной способности ЭЭС в нормальных и аварийных условиях [9].

Создание активно-адаптивных, высокоавтоматизированных интегрированных интеллектуальных; внедрение высокоавтоматизированных подстанций различного класса напряжения в ЭЭС; сетей контроля, средств учёта ЭЭ; новых КУ, относящихся к аппаратной базе устройств FACTS, а особенно методов их управления, является ключевым и актуальным направлениями во всём в мире, а также развивающихся странах. В РФ перечисленные задачи отражены в правовой плоскости, в частности, в программе ПАО «Россети» инновационного развития энергосистемы РФ на период 2024–2029 гг., в распоряжении Правительства РФ N 1715-р об Энергетической стратегии на период до 2023 года.

Все устройства FACTS можно проклассифицировать следующим образом. Управляемые системы электропередачи можно разделить по типу воздействия на три группы: устройства поперечного действия (подключаемые к сетям параллельно), регулирующие РМ и напряжение; устройства продольного действия (подключаемые последовательно в сети), изменяющие сопротивления сетей, воздействуя на параметры ЭЭ опосредовано; группа устройств комбинированного воздействия, обладающие свойствами первых двух групп (рис. 1). Предназначение каждого устройства приведено в табл. № 1.

Перечень существующих FACTS-устройств широк, большинство приведённых средств регулирования ЭЭ (ОРПМ, предназначено для применения в сетях высокого и сверхвысокого напряжения (магистральных сетях) для решения вопроса не только компенсации РМ, но и перераспределения потоков мощности. Если затрагивать ЭЭС машиностроительных предприятий, то необходимо обратить внимание на разновидности компенсаторов СТАТКОМ для наиболее точной компенсации РМ вблизи нагрузок (индивидуальная компенсация). При групповой компенсации возможно внедрение помимо СТАТКОМов большей мощности UPQC, DVR. Для понижающих подстанций предприятий предпочтительно внедрение УШР, ВРГ и управляемых СТК. В связи с этим, создание высокоавтоматизированных систем компенсации, контроля и учёта ЭЭ, в которых устройства FACTS являются низшим звеном, лежит в совместной области ответственности каждого участника рынка ЭЭ, взаимно влияющих друг на друга. В России внедрение передовых активно-адаптивных устройств в ЭЭС затруднено дефицитом узкоспециализированных специалистов, обладающих опытом внедрения подобных систем, малым количеством производителей на территории страны устройств FACTS второго поколения и слабой реализацией в практической плоскости законодательных актов, направленных на модернизацию ЭЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванова Н.А., Рябов С.А., Шварцбург Л.Э. Оценка экологичности технологических процессов на основе их интегрального экологического показателя / Н.А. Иванова, С.А. Рябов, Л.Э. Шварцбург // Вестник машиностроения. — 2015. — № 9. — с. 36–38.
2. Шварцбург Л.Э., Иванова Н.А., Рябов С.А. Энергетический анализ и экологичность технологических процессов механообработки / Л.Э. Шварцбург, Н.А. Иванова, С.А. Рябов, Д.И. Кулизаде // Вестник МГТУ «Станкин». — 2021. — № 4(59). — с. 30–34.
3. Герасимов С.Е., Иванов С.А., Кузнецов А.А. Качество электроэнергии, источники и средства компенсации реактивной мощности в электроэнергетических системах: учебное пособие [и др.]. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2021. — 100 с. — ISBN 978-5-7422-7361-5. — Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/116131.html> (дата обращения: 11.09.2024). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.
4. Полковниченко Д.В. Основные вопросы эффективной эксплуатации электроэнергетических систем: учебное пособие / Д.В. Полковниченко, А.А. Булгаков, И.Б. Гуляева. — Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. — 376 с. — ISBN 978-5-9729-1501-9. — Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/133236.html> (дата обращения: 15.12.2024). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.
5. Кобозев В.А. Качество электроэнергии и энергоэффективность систем электроснабжения потребителей: учебное пособие / В.А. Кобозев, И.В. Лыгин. — Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. — 356 с. — ISBN 978-5-9729-0770-0. — Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/124201.html> (дата обращения: 11.12.2024). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.

6. Бердников Р.Н., Бушуев В.В., Васильев С.Н., Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью: Одобрено Правлением ОАО «ФСК ЕЭС» 28.04.2012 / Р. Н. Бердников, В. В. Бушуев, С. Н. Васильев [и др.]. — Москва: Научно-технический центр федеральной сетевой компании единой энергетической системы, 2012. — 235 с.
7. Романова А.С. Анализ энергоемкости гальванического комплекса машиностроительного производства / А.С. Романова, М.Б. Микушин, А.Ю. Воеводин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. — 2021. — Т. 29, № 4(72). — С. 44–55.
8. Васильев А.С. Управляемые электропередачи на базе силовой электроники. Ч.1. Методическое и технологическое обеспечение управления режимом по напряжению и реактивной мощности: учебное пособие / А.С. Васильев, Р.А. Уфа. — Томск: Томский политехнический университет, 2021. — 142 с. — ISBN 978-5-4387-1030-1 (ч.1), 978-5-4387-1029-5. — Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/134355.html> (дата обращения: 07.02.2025). — Режим доступа: для авторизир. пользователей
9. Leonard L. Grigsby the Electric Power Engineering Handbook — Five Volume Set. Power Systems. United States of America: CRC Press, 2018. — p.542

© Князев Владислав Валерьевич (driver1796@yandex.ru); Шварцбург Леонид Эфраимович (lesh@stankin.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»