

DOI: 10.18721/JE.10311
УДК 338.46 + 621.31

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ РЫНКА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В.И. Колибаба, К.В. Жабин

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
г. Иваново, Российская Федерация

Управление потоками реактивной мощности в электроэнергетических системах играет важную роль в поддержании экономичности их работы, стабильности уровней напряжения и требуемого уровня надежности функционирования. Существующая практика управления реактивной мощностью основана на эвристических подходах. В этой области не хватает прозрачного рыночного механизма, обеспечивающего оптимальный уровень затрат для всех участников рынка. Существующие структурные проблемы в электроэнергетике России существенно осложняют формирование эффективного рынка реактивной мощности. Представлена классификация средств регулирования реактивной мощности на основе их технологических особенностей и конкурентных преимуществ. Выявлены отличительные характеристики реактивной мощности как товара. Реактивную мощность очень сложно понимать как товар, поставляемый от производителя к потребителю в связи с тем, что она является технологической особенностью процесса системы передачи и потребления электроэнергии. Определены основные факторы, оказывающие влияние на формирование и развитие рынка реактивной мощности в России. Проведен анализ структуры затрат, связанных с установкой и эксплуатацией различных устройств регулирования реактивной мощности. Реактивная мощность может вырабатываться и потребляется генераторами электростанций, а также оборудованием, которое не потребляет, как правило, топливных ресурсов с малыми затратами. Сформулированы принципы формирования конкурентного рынка реактивной мощности. Применение традиционных методов рыночного ценообразования к реактивной мощности представляется сложной задачей ввиду многочисленных неопределенных внешних факторов. Организация рынка реактивной мощности по принципу активной мощности будет иметь более сложную структуру и функционирование будет достаточно дорогостоящим.

Ключевые слова: услуги по обеспечению системной надежности; конкуренция; реактивная мощность; рынок реактивной мощности

Ссылка при цитировании: Колибаба В.И., Жабин К.В. Особенности формирования и развития рынка реактивной мощности // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2017. Т. 10, № 3. С. 114–125. DOI: 10.18721/JE.10311

FEATURES OF FORMATION AND DEVELOPMENT OF THE REACTIVE POWER MARKET

V.I. Kolibaba, K.V. Zhabin

Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin, Ivanovo, Russian Federation

The management of reactive power flows in electric power systems plays an important role in maintaining their cost-effective operation, the stability of voltage levels and the required level of operational reliability. The current practice of controlling reactive power is based on heuristic approaches. In this area, there is a lack of a transparent market mechanism that ensures an optimal level of costs for all market participants. The existing structural problems in the Russian power industry make it very difficult to form an effective

reactive power market. This article describes the classification of reactive power control facilities based on their technological characteristics and competitive advantages. The distinctive characteristics of reactive power as a commodity are revealed. Reactive power is very difficult to understand as a product supplied by the manufacturer due to the fact that it is a technological feature of the process of transmission and consumption of electricity. The main factors influencing the formation and development of the nuclear energy market in the Russian Federation are determined. The structure of costs associated with the installation and operation of various reactive power control devices has been analyzed. Reactive power can be generated and consumed by generators of power plants, as well as by the equipment that does not consume fuel resources, usually with low costs. The principles of forming a competitive market for reactive power are formulated. The application of traditional methods of market pricing to reactive power is a challenge because of the many uncertain external factors. The organization of the reactive power market by the principle of active capacity will have a more complex structure and functioning will be quite costly.

Keywords: services to provide system reliability; competition; reactive power; reactive power market

Citation: V.I. Kolibaba, K.V. Zhabin, Features of formation and development of the reactive power market, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics, 10 (3) (2017) 114–125. DOI: 10.18721/JE.10311

Введение. За последние несколько десятилетий характерной тенденцией для промышленно развитых государств является расширение интеграции энергосистем и повышение уровня конкуренции в энергетическом секторе. Увеличение количества субъектов рынка и расширение конкурентных отношений создают условия для постепенного снижения стоимости электроэнергии для конечных потребителей. В то же время заинтересованность субъектов рынка в поддержании системной надежности существенно снижается из-за необходимости несения дополнительных затрат. Поэтому, следуя опыту зарубежных стран, в России при формировании конкурентных отношений в электроэнергетическом секторе был создан рынок услуг по обеспечению системной надежности (рынок системных услуг). Процесс функционирования данного рынка обеспечивает системный оператор Единой энергосистемы России (системный оператор). Целью функционирования является обеспечение необходимого уровня надежности работы энергосистемы (обеспечение бесперебойной поставки электроэнергии от производителей к потребителю, т. е. исключение нештатных ситуаций) и поддержание качественных параметров энергоснабжения на нормативном уровне. Одним из сегментов данного рынка является регулирование процесса производства и потребления реактивной мощности. Баланс реактивной мощности в энергосистеме определяет уровень одного из основных качественных пара-

метров энергоснабжения – напряжения. Этот параметр оказывает значительное влияние на надежную и экономичную работу энергосистемы [1, 2]. Снижение перепадов реактивной мощности в сети способствует снижению потерь активной мощности и, соответственно, снижению потерь напряжения. Поэтому услуга регулирования реактивной мощности (РРМ) выступает как одна из важнейших системных услуг, от которой общество получает ощутимую пользу [3–5]. Считаем, что данному вопросу в настоящее время уделяется недостаточно внимания. В России оплачиваемые услуги РРМ предоставляются исключительно электростанциями и, преимущественно, гидроэлектростанциями. Другие виды технических средств, способных эффективно регулировать реактивную мощность, и которые предназначены к установке у потребителей электроэнергии или в сетевых компаниях, в рамках существующей модели оптового рынка электроэнергии и мощности России системным оператором не рассматриваются. При этом все капитальные и производственные издержки сетевых компаний по установке и обслуживанию данных устройств включаются в тариф на передачу электроэнергии и мощности,¹ что, очевидно, способствует

¹ Методика оценки технико-экономической эффективности применения устройств FACTS в ЕНЭС России: стандарт СТО 56947007-29.240.019-2009 ПАО «ФСК ЕЭС». URL: http://www.fsk-ees.ru/ab-out/standards_organization/ (дата обращения: 09.04.2017).

его завышению. Также для большой группы потребителей (напряжением ниже 220 кВ) в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии определяются предельные значения соотношения потребления активной и реактивной мощности в часы максимума суточных нагрузок электрической сети.² При этом в часы низких суточных нагрузок данное соотношение принимается равным нулю. Эти требования обязывают потребителей устанавливать дорогостоящее оборудование компенсации реактивной мощности на условиях сетевых компаний и в случае невыполнения данного требования к ним применяются повышающие коэффициенты к тарифу на услуги по передаче электрической энергии.

По нашему мнению, все участники оптового рынка, которые имеют возможность эффективно регулировать реактивную мощность в электроэнергетической системе, должны иметь право возмещать свои затраты и получать прибыль за РРМ в соответствии с их вкладом в обеспечение надежности и экономичности энергосистемы. Сегодня некоторые электростанции получают доход за оказываемые услуги системному оператору – за РРМ в системе.³ Все виды затрат генераторов электростанций по РРМ включаются в стоимость электроэнергии и мощности и в стоимость системных услуг. Тем не менее был достигнут существенный технический прогресс в развитии различных видов технических средств РРМ, отмечается их значительная эффективность в данном процессе [6–10]. При всем этом процесс предоставления системных услуг РРМ характеризуется низким уровнем конкуренции и не способствует повышению надежности и экономичности функционирования электроэнергетики России. Формирование объективной системы отбора участников процесса РРМ с предоставлением соответствующих финансовых гарантий со стороны системного оператора (обеспечение расчетов) позволит:

– стимулировать заинтересованность субъектов оптового рынка к внедрению иннова-

ционного оборудования в тех местах энергосистемы, где это необходимо;

– сформировать наиболее эффективную систему передачи электроэнергии, направленную на минимизацию потерь;

– стимулировать субъектов оптового рынка к четкому выполнению инструкций системного оператора по обеспечению надежности функционирования энергосистемы;

– осуществлять регулирование величины реактивной мощности в энергосистеме для принятия эффективных экономических решений в пределах установленных требований надежности, что позволит избежать чрезмерных резервов реактивной мощности в одних узлах нагрузки, обеспечит ее наличие в узлах, где она действительно необходима.

В то же время структурные проблемы, которые присущи современному рынку системных услуг России, могут существенно осложнить формирование эффективного рынка реактивной мощности. Под структурой понимается не только степень концентрации поставщиков на рынке, но и другие характеристики, которые определяют уровень конкурентности рынка. Поэтому для решения возможных структурных проблем весьма актуальными являются:

1) классификация технических средств РРМ на основе выделения их специфических особенностей;

2) выявление отличительных характеристик реактивной мощности как товара;

3) определение основных факторов, оказывающих влияние на формирование и развитие рынка реактивной мощности;

4) анализ структуры затрат, возникающих при внедрении и эксплуатации различных технических средств РРМ.

Методика и результаты исследования. Исследователями из разных стран опубликованы работы, которые направлены на поиск эффективного способа устройства рынка реактивной мощности. Все их предложения соответствуют сформированной архитектуре и структуре энергетических рынков и техническим особенностям энергосистем стран, в которых проводились исследования. На начальном этапе формирования электроэнергетических рынков в ряде зарубежных стран предлагалось создание спот-рынков реактив-

² Приказ Министерства энергетики РФ № 380 от 23.06.2015 г. // СПС КонсультантПлюс.

³ Приказ ФСТ РФ № 201-э/1 от 31.08.2011 г. // СПС КонсультантПлюс.

ной мощности [11]. Однако на сегодняшний день ни в одной стране мира пока не созданы полноценные рынки реактивной мощности. По нашему мнению, это связано с практической сложностью физических процессов РРМ. Тем не менее, внедрение данного экономического механизма представляется крайне необходимым для дальнейшего инновационного развития электроэнергетики России с учетом современных рыночных условий ее функционирования.

Основной целью развития конкуренции в электроэнергетике является повышение ее эффективности и сокращение затрат для конечных потребителей. Но достичь эффективной конкуренции очень трудно. Несмотря на проведенные преобразования в электроэнергетике России, до настоящего времени существующая система оплаты услуг РРМ характеризуется очень низким уровнем конкуренции. Это видно из того, как системный оператор производит отбор исполнителей услуг РРМ, а именно – путем запросов предложений.⁴

Производимая и потребляемая электрическая мощность переменного тока состоит из активной и реактивной мощности. Активная мощность всегда передается от генераторов электростанций к потребителям, и именно она обеспечивает функцию энергоснабжения потребителей. Она затрачивается на электромагнитные процессы, возникающие в сетевом хозяйстве и электрической нагрузке потребителей. Проблема регулирования напряжения в энергосистеме связана с параметрами сетей, прежде всего, линий электропередач. В зависимости от режима работы линий электропередач, трансформаторов и т. д. они могут потреблять или вырабатывать реактивную мощность. Передача по сети реактивной мощности влияет на потери напряжения и может использоваться для целей регулирования напряжения. Хотя потери напряжения зависят от значения потока активной мощности, при регулировании напряжения можно воздействовать только на потоки реактивной мощности, поскольку активная мощность определяется режимом работы потребителей. Посредством изменения потока реактивной мощности в сети можно, при

желании, получить напряжение в приемном узле нагрузки даже выше, чем в отправном. Изменение потоков реактивной мощности осуществляется с помощью регулирования возбуждения генераторов или других технических средств.

В электрической системе балансы активной и реактивной мощности предусматривают равенство между приходной и расходной частями. Так баланс реактивной мощности в каждом узле энергосистемы в определенный момент времени t может быть представлен в виде уравнения

$$\begin{aligned} \pm \sum_{i=1}^n Q_{Pi(t)} \pm \sum_{i=1}^n Q_{Ky(i)} + \sum_{i=1}^n Q_{zli(t)} = \\ = \pm \sum_{i=1}^n Q_{i(t)} + \sum_{i=1}^n Q_{пот(t)}, \end{aligned} \quad (1)$$

где знак «+» соответствует оборудованию, потребляющему реактивную мощность; знак «-» – вырабатывающему; $Q_{Pi(t)}$ – реактивная мощность, генерируемая или потребляемая электростанцией i ; $Q_{Ky(i)}$ – реактивная мощность, генерируемая или потребляемая компенсирующим устройством i энергосистемы; $Q_{zli(t)}$ – зарядная мощность линий электропередачи; $Q_{пот(t)}$ – потери реактивной мощности; $Q_{i(t)}$ – реактивная мощность потребителей (с учетом собственных компенсирующих устройств).

По нашему мнению, в условиях конкурентных отношений обеспечение баланса реактивной мощности в электрической системе должно достигаться экономическими средствами. Эти средства должны наилучшим образом соответствовать существующей структуре рынка, что позволит обеспечить баланс между минимизацией потерь и обеспечением надежности электроснабжения потребителей. Это важно, поскольку, если у системного оператора будет основная задача – распределять потоки реактивной мощности в системе таким образом, чтобы свести к минимуму потери активной мощности в сети, то в конечном итоге он будет использовать самых дорогих поставщиков, расположенных близко к регулируемому участку сети. Однако при этом не будет гарантироваться обеспечение надежности. Аналогичным образом, если системный оператор будет стремиться только

⁴ Постановление Правительства РФ № 117 от 03.03.2010 г. // СПС КонсультантПлюс.

минимизировать свои затраты, то это может привести к выбору недорогих предложений от удаленных поставщиков. Тем самым увеличатся потери в системе, что, безусловно, негативно скажется на ее экономичности. Выбор подходящих критериев оптимизации состава поставщиков реактивной мощности имеет важное значение для развития конкурентных отношений, и между этими критериями системным оператором должно быть найдено равновесие.

Системный оператор, обеспечивая баланс реактивной мощности, имеет дело с различными явлениями в различных временных масштабах. Одной из ключевых характеристик реактивной мощности является ее величина и скорость, с которой она меняется с течением времени.⁵ В соответствии с различным временным масштабом явлений, происходящих в энергосистеме, устойчивость уровней напряжения может быть разделена на краткосрочную и долгосрочную. Краткосрочные возмущения напряжения, временной интервал которых составляет от менее одной секунды до нескольких секунд, характеризуется быстрой динамикой изменения баланса производства и потребления реактивной мощности в энергосистеме. Долгосрочная нестабильность напряжения, имеющая место от нескольких минут до нескольких часов, включает в себя медленные явления и использование оборудования с медленными характеристиками РРМ. Из-за различной природы характеристик электрической нагрузки потребителей требования к реактивной мощности, такие как ее генерация и потребление, могут значительно меняться в течение суток в одном и том же месте. Иногда этот процесс проявляется стохастически.

Принимая во внимание вышеизложенное, а также анализ специализированных источников [12–14], можно выделить основные цели РРМ и напряжения в электроэнергетических системах:

– напряжение на всем оборудовании энергосистемы должно находиться в допустимых

пределах, чтобы избежать повреждения отдельных элементов оборудования;

– поддержание уровня напряжения, близкого к значениям, для которых стабилизирующие элементы управления разработаны, чтобы повысить стабильность работы энергосистемы и обеспечить максимальную экономичность эксплуатации системы передачи электрической энергии;

– минимизация потоков реактивной мощности в системе для уменьшения активных и реактивных потерь мощности.

РРМ в энергосистеме может быть обеспечено различными техническими средствами для восстановления ее нарушенного баланса. На сегодняшний день в России все эти технические средства классифицируются исключительно по принципу их конструктивных особенностей – как электромашинные и статические [6, 15]. К электромашинным относят синхронные компенсаторы и асинхронизированные синхронные компенсаторы. К статическим средствам производства и потребления реактивной мощности относят все остальное оборудование, которое не имеет вращающихся элементов в своей конструкции. В качестве средств РРМ в энергосистемах используются в основном генераторы электрических станций, синхронные компенсаторы, статические тиристорные компенсаторы и батареи статических конденсаторов. Линии электропередач, работающие в режимах малых нагрузок, также рассматриваются как средства РРМ.

На основе отечественных и зарубежных источников [6, 15–17] нами проведен сравнительный анализ основных видов технических средств РРМ и напряжения и выделены их отличительные особенности (результаты приведены в табл. 1). Из приведенных данных можно выделить следующие основные характеристики средств РРМ и напряжения:

– маневренность – скорость набора и сброса мощности;

– возможность регулирования мощности – генерация и/или потребление реактивной мощности;

– время пуска – продолжительность пусковых операций;

– количество пусковых операций.

⁵ Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем: стандарт ОАО «СО ЕЭС» СТО 59012820.29.240.007-2008. URL: <http://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/Rules.pdf> (дата обращения: 09.04.2017).

Таблица 1

Сравнительная характеристика средств регулирования реактивной мощности и напряжения

Comparative characteristics of reactive power and voltage control means

Наименование устройства	Уровень капитальных затрат	Уровень постоянных издержек	Издержки упущенной выгоды	Уровень маневренности (скорость реакции)
Динамические средства PPM				
Синхронный генератор	Высокие	Высокие	Да	Высокая
Синхронный компенсатор (электростанция)	Высокие	Высокие	Да	Высокая
Синхронный компенсатор	Умеренные (в зависимости от типа оборудования стоимость варьируется от 40 тыс. долл. до 50 тыс. долл. за МВАр)	Умеренные	Нет	Высокая
Устройства, входящие в состав управляемых (гибких) систем электропередач переменного тока (FACTS)	Умеренные (затраты, как правило, ниже, чем синхронных компенсаторов электростанций, но выше, чем конденсаторных батарей. Например, СТК на напряжение 115–230 кВ, мощностью 200 МВАр, стоит от 5 млн долл. до 10 млн долл.)	Умеренные	Нет	Высокая
Статические средства PPM				
Шунтирующие реакторы, батареи конденсаторов	Низкие (затраты варьируются от 1 млн долл. За 50 Мвар на 115 кВ до 5 млн долл. За 200 Мвар на 500 кВ)	Низкие	Нет	Низкая
Трансформаторы с установленными устройствами регулирования напряжения под нагрузкой	Информация отсутствует	Информация отсутствует	Нет	Низкая

На основании вышеизложенного и выделенных свойств нами предлагается классифицировать все средства PPM как динамические и статические. К статическим источникам реактивной мощности следует относить, например, такие устройства, как батареи конденсаторов, шунтирующие реакторы, так как они обеспечивают дискретное PPM через медленные механические переключения, которые не смогут обеспечить оперативное (автоматическое) PPM. Динамические средства PPM, наоборот, характеризуются более быстрой способностью бесступенчатой коррективы возникающих флуктуаций реактив-

ной мощности (например, синхронные генераторы, синхронные компенсаторы и т. д.). Мы считаем, что реактивная мощность от статических источников является менее ценной, чем от динамических источников, поскольку динамические источники могут регулировать производство или потребление реактивной мощности гораздо быстрее для поддержания уровней напряжения и предотвращения развития аварийных ситуаций. Поэтому цена на динамические возможности в определенном месте и времени может быть выше, чем цена на оборудование со статическими возможностями.

Реактивная мощность для конечного потребителя сама по себе ценности не имеет. Анализ результатов исследований [14, 18, 19] позволил нам выделить ряд особых характеристик реактивной мощности как товара:

- совмещение во времени процессов производства, распределения и потребления реактивной мощности;
- значительный локально-территориальный характер реактивной мощности из-за увеличения потерь активной мощности в сетевом хозяйстве при передаче реактивной мощности на большие расстояния;
- зависимость объемов произведенной и потребленной реактивной мощности не только от потребителей, но и от различных элементов системы передачи электрической энергии;
- по сравнению с активной мощностью, имеется более сильная зависимость реактивной мощности от изменения напряжения (статическая характеристика), что более существенно влияет на регулирующий эффект напряжения;
- необходимость проведения расчетов по оптимизации потока распределения реактивной мощности на каждом участке сети в целях оптимального распределения реактивных мощностей с учетом сезонности, климатических условий, дня недели и других факторов;

– необходимость разработки графиков нагрузки для гармоничного планирования производства и потребления реактивной мощности;

– несовпадение по территориальному признаку основных центров производства и районов потребления реактивной мощности;

– необходимость бесперебойности и надежности электроснабжения потребителей, требующая обязательного создания резервов реактивной мощности;

– существенное воздействие на социальную и экологическую среду общества (несмотря на то, что этот процесс отмечается косвенно).

На основании вышеизложенного и проведенного анализа отечественных и зарубежных источников [18–21] можно выделить основные факторы, оказывающие влияние на формирование системы расчетов за РРМ. Эти факторы приведены на рисунке.

Характеристики реактивной мощности и различных технических средств РРМ будут влиять на систему ее оплаты и поведение различных поставщиков. Для примера в табл. 2 приведены данные о количестве и установленной мощности средств РРМ в операционной зоне Филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Центра.



Факторы, оказывающие влияние на формирование и развитие рынка реактивной мощности
The main factors that influence the formation of the system of payment for reactive power

Таблица 2

Количество и установленная мощность средств РРМ в операционной зоне Филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Центра
Number and installed capacity of funds Control of reactive power in the operational area of the ODU Center

УШР, СТК, СК, шт./Мвар	БСК, шт./Мвар	ШР, шт./Мвар	Примечание
359/548	11490/678	39/9987	Учитываются потребители сетевые компании и другие собственники (указано общее количество оборудования и его мощность)

Из табл. 2 видно, что в настоящее время РРМ и напряжения осуществляют сетевые компании, потребители и другие собственники. По нашему мнению, развитие данного сегмента рынка позволит привлечь частные компании, желающие инвестировать в установку соответствующего оборудования в заранее определенное место энергосистемы в целях получения дохода, а также компании, имеющие в собственности мобильные установки РРМ. Например, на колесной базе, которые можно устанавливать в необходимое место энергосистемы для РРМ (предположим, в период проведения ремонтных работ на каком-то участке сети), когда это требуется. Эти компании, в свою очередь, могут оказывать услуги субъектам оптового рынка электроэнергии и мощности. Поэтому под компанией, которая осуществляет РРМ, нами предлагается понимать участника оптового рынка электроэнергии и мощности, который имеет возможность оптимизировать потоки реактивной мощности в энергосистеме по требованиям системного оператора, в том числе за счет минимизации затрат на электроэнергию, потребляемую своими мощностями с целью получения дохода.

Уровень затрат компании – это показатель, отражающий ее эффективность. Это касается и средств РРМ. Поэтому важным вопросом является проведение анализа и группировка затрат, которые несут собственники оборудования, способного регулировать реактивную мощность. Требованиям системы управления затратами, относимыми на себестоимость продукции, отвечает классификация затрат на постоянные и переменные.

Анализ специализированных источников⁶ [12, 17, 18, 20] позволил нам классифицировать затраты различных технических средств, связанных с РРМ и напряжения. Результаты данного анализа представлены в табл. 3.

Рассматривая приведенную структуру затрат, можно отметить, что только затраты на

⁶ Об утверждении Методических указаний по расчету цен (тарифов) на услуги по обеспечению системной надежности: Приказ ФСТ РФ № 201-э/1 от 31.08.2011 г. // СПС КонсультантПлюс.

топливо характерны для электростанций, и они зависят от объемов выработки (переменные затраты). Затраты синхронных компенсаторов (электростанции) заключаются в альтернативном выборе варианта их использования (под этим имеется в виду выбор участия на оптовом рынке электроэнергии или на рынке системных услуг), определяемого стоимостью наилучшей упущенной возможности применения ресурсов производства, обеспечивающего максимальную прибыль. Все прочие средства РРМ не зависят от объемов выработки электроэнергии. Для них характерна исключительно доля постоянных затрат в себестоимости продукции, а затраты за определенный период непосредственно входят в себестоимость продукции.

Очевидно, что затраты генераторов электростанций характеризуются более высоким уровнем, по сравнению с другим оборудованием, из-за наличия топливной составляющей. Поэтому при выборе поставщика если стоимость будет выступать в качестве единственного критерия отбора, то в первую очередь должны привлекаться более дешевые источники. И только после их полного «использования» должны привлекаться более дорогие поставщики. При этом возможны ситуации, когда системный оператор в любом случае вынужден будет привлекать более дорогих поставщиков вместо более дешевых по критерию надежности. Во-первых, некоторое оборудование реактивной мощности, характеризующееся низкими затратами, не всегда может регулировать реактивную мощность так же эффективно, как те источники, работа которых связана с большими затратами. Это связано с тем, что в РРМ и напряжения важным параметром является скорость реакции (маневренность). Во-вторых, реактивную мощность из-за значительных потерь невыгодно передавать на большие расстояния. В этом случае, по нашему мнению, на рынке будут востребованы наиболее дорогие поставщики, т. е. оплачиваться, даже если более дешевые поставщики будут простаивать. Это связано с тем, что дорогой поставщик находится вблизи места, требующего РРМ.

Таблица 3

Анализ затрат различного оборудования регулирования реактивной мощности и напряжения
Analysis of costs of various regulatory equipment Reactive power and voltage

Наименование оборудования	Категория затрат	Структура затрат
Генераторы электростанций. Синхронные компенсаторы (электростанции)	Переменные затраты	Затраты на топливо (для генераторов электростанций, работающих в режиме выдачи/потребления реактивной мощности). Затраты на основные и вспомогательные материалы. Услуги производственного характера. Экологические платежи. Материальные расходы. Водный налог (для гидроэлектростанций). Электрические потери (потребление электроэнергии из сети, механические, вентиляционные, электрические и т. д.). Затраты, связанные с потреблением электроэнергии на возбуждение генератора. Затраты, связанные с потреблением электроэнергии оборудованием собственных нужд. Покупка мощности субъектов электроэнергетики на оптовом рынке электроэнергии (для синхронного компенсатора). Затраты упущенных возможностей (для генераторов электростанций)
	Постоянные затраты	Проценты на капитал. Постоянные эксплуатационные затраты. Затраты, связанные с потреблением электроэнергии на собственные нужды. Затраты, связанные с потерями электроэнергии. Затраты на оплату труда. Социальные отчисления. Затраты на техническое обслуживание. Прочие затраты
Иные средства РРМ	Переменные затраты	Затраты на основные и вспомогательные материалы. Услуги производственного характера. Материальные расходы. Электрические потери
	Постоянные затраты	Проценты на капитал. Постоянные эксплуатационные затраты. Затраты на оплату труда. Социальные отчисления. Затраты на техническое обслуживание. Прочие затраты

РРМ основано на оптимизации структуры реактивных мощностей в энергосистемах, включающих разные виды энергетических ресурсов, с учетом их свойств и разного рода системных ограничений. Различное соотношение альтернативных видов ресурсов реактивных мощностей будет формировать различную себестоимость производства реактивной мощности при обеспечении заданного уровня надежности их функционирования. При использовании одних технологий, например, таких как синхронные компенсато-

ры электростанций, возникают более высокие затраты, по сравнению с другими используемыми технологиями. Прибыльность этих технологий при рыночном ценообразовании будет сильно зависеть от определяемых предельных издержек, доступности (ближайшего места расположения к требуемому району регулирования) и маневренности. Но следует учитывать, что оптимальные места расположения энергетических ресурсов реактивной мощности очень важно определять с учетом их технических и экономиче-

ских преимуществ. На начальном этапе оценки эффективности должны использоваться различные комбинации видов технических средств РРМ, представляющие в своей совокупности компенсацию недостатков друг друга и обеспечивающие функционирование энергосистемы с максимальным уровнем надежности и экономической эффективности. Важным вопросом обеспечения экономически эффективного использования ресурсов реактивной мощности является задача выбора величины мощности оборудования и мест его установки. С помощью рационального распределения источников реактивной мощности в энергосистеме она может быть хорошо управляемой в соответствии с плановым производством и потреблением электроэнергии, а также с учетом проведения ремонтов и различных непредвиденных обстоятельств, которые находятся в пределах действующих критериев надежности электроснабжения. Целесообразность применения тех или иных устройств РРМ необходимо устанавливать на основании результатов расчетов установившихся режимов, устойчивости энергосистемы и переходных процессов при нормированных возмущениях в энергосистеме. Для рационального распределения реактивной мощности в энергосистемах можно использовать различные методы оптимизации режимов: Лагранжа, градиентные, интегральные, случайного поиска, генетического и эволюционного отборов, нейронных сетей и т. д. [21].

Выводы. Реактивная мощность существенно отличается от активной мощности. Она может вырабатываться и потребляется оборудованием, которое не требует топливных ресурсов, как правило, с малыми затратами. Она также вырабатывается генераторами электростанций, и если ее производство и потребление осуществляются в пределах установленного коэффициента мощности, то

такое регулирование также характеризуется малыми затратами. Затраты электростанций на генерацию или потребление реактивной мощности в основном связаны с затратами упущенной выгоды вследствие уменьшения способности генератора производить активную мощность.

Реактивную мощность очень сложно понимать как товар, поставляемый от производителя к потребителю, так как она является технологической особенностью процесса системы передачи и потребления электроэнергии. При этом реактивная мощность оказывает значительное влияние на надежную и экономичную работу энергосистемы. Применение к ней традиционных методов рыночного ценообразования представляется сложной задачей ввиду многочисленных неопределенных внешних факторов. Системный оператор как субъект электроэнергетики, ответственный за надежное функционирование энергосистемы, должен обеспечивать эффективное управление балансом реактивной мощности и нести за это ответственность. Организация рынка реактивной мощности по принципу активной мощности будет иметь более сложную структуру, а его функционирование, очевидно, будет достаточно дорогостоящим. Кроме того, выработка реактивной мощности, как правило, обходится недорого, что ставит под вопрос необходимость и целесообразность формирования рынка по аналогии активной мощности. В настоящее время наиболее простым решением представляется регулирование требований по закупке реактивной мощности и предоставление системному оператору права заключать контракты на генерацию и потребление реактивной мощности в определенных местах энергосистемы и в тех количествах, в которых она необходима, а также формирование оперативного резерва реактивной мощности на рынке системных услуг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Паули В.К. Реактивная мощность – состояние, проблемы, задачи // Новое в российской энергетике. 2006. № 1. С. 25–34.
 [2] Сафонов Д.Г., Лютаевич А.Г., Долингер С.Ю., Бирюков С.В. Влияние отклонения напряжения на потери мощности в электрооборудовании элек-

- трических сетей и потребителей // Омский научный вестник. 2013. № 2(120). С. 203–206.
 [3] Rueda-Medina A.C., Padilha-Feltrin A. Generators as Providers of Reactive Power Support – A Market Approach // IEEE Transactions on Power Systems. 2013. Vol. 28, no. 1. P. 490–502.

- [4] **Cheng S., Chen M.** Multi-objective reactive power optimization strategy for distribution system with penetration of distributed generation // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2014. No. 10. P. 221–228.
- [5] **Kraning M., Chu E., Lavae J., Boyd S.** Dynamic Network Energy Management via Proximal Message Passing // *Foundation and Trends In Optimization*. 2013. Vol. 1, no. 2. P. 70–122.
- [6] **Тухватуллин М.М., Ивекеев В.С., Ложкин И.А., Урманова Ф.Ф.** Анализ современных устройств FACTS, используемых для повышения эффективности функционирования электроэнергетических систем России // *Электротехнические системы и компоненты*. 2015. № 3. С. 41–46.
- [7] **Корнилов Г.П., Николаев А.А., Пястолова Д.Ю.** Техничко-экономическое сравнение компенсирующих устройств для дуговых сталеплавильных печей широкого класса мощности // *Электротехнические системы и компоненты*. 2016. № 1. С. 34–38.
- [8] **Кудашкин Ю.В., Ахмедов Ф.Н.** Энергоэффективность, энергосбережение и интеллектуальные сети // *Российское предпринимательство*. 2012. С. 96–102.
- [9] **Радионон А.А., Маклаков А.С., Чернышев А.Д.** Использование мощных электроприводов на базе активных двунаправленных преобразователей в составе промышленной Smart Grid системы // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика*. 2015. № 1. С. 74–81.
- [10] **Солонина Н.Н., Сулов К.В., Солонина З.В.** Новые технологии компенсации реактивной мощности // *Вестник ИрГТУ*. 2016. № 5(112). С. 135–143.
- [11] **Стофт С.** Экономика энергосистем. Введение в проектирование рынков электроэнергии. М.: Мир, 2006. 623 с.
- [12] **Железко Ю.С.** Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.
- [13] **Карташев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г.** Управление качеством электроэнергии. М.: Изд. дом МИЭ, 2006. 320 с.
- [14] **Веников В.А., Идельчик В.И., Лисеев М.С.** Регулирование напряжения в электроэнергетических системах. М.: Энергоатомиздат, 1985. 214 с.
- [15] **Веников В.А., Жуков Л.А., Карташев И.И., Рыжов Ю.П.** Статические источники реактивной мощности в электрических сетях. М.: Энергия, 1975. 136 с.
- [16] **Hingorani N.G., Gyugi L.** Understanding FACTS. Concept and technology of Flexible AC Transmission Systems. IEEE Press book, 2000. 428 p.
- [17] **Payment for Reactive Power, Commission Staff Report.** № AD14-7. URL: <https://www.ferc.gov/legal/staff-reports/2014/04-11-14-reactive-power.pdf> (дата обращения: 09.04.2017).
- [18] **Fereidoon P.** Electricity Market Reform: An International Perspective. Sioshansi and Wolfgang Pfaffenberger – Elsevier, 2006. 656 p.
- [19] **Экономика и управление в современной электроэнергетике России: пособие для менеджеров электроэнергетических компаний / под ред. А.Б. Чубайса.** М.: НП «КОНЦ ЕЭС», 2009. 616 с.
- [20] **Рычков С.И.** Услуги по регулированию реактивной мощности с использованием генераторов, работающих в режиме синхронного компенсатора // *Электрические станции*. 2012. № 7. С. 30–35.
- [21] **Герасименко А.А., Нешатаев В.Б.** Оптимальная компенсация реактивной мощности в системах распределения электрической энергии: моногр. Красноярск: СФУ, 2012. 218 с.

КОЛИБАБА Владимир Иванович. E-mail: kolibaba@eiop.ispu.ru

ЖАБИН Константин Владимирович. E-mail: zhabin_kv@icloud.com

Статья поступила в редакцию 14.04.17

REFERENCES

- [1] **V.K. Pauli,** Reaktivnaia moshchnost' – sostoianie, problemy, zadachi [Reactive power – status, problems, challenges], *Novoe v rossiiskoi energetike*, 1 (2006) 25–34.
- [2] **D.G. Safonov, A.G. Liutarevich, S.Iu. Dolinger, S.V. Biriukov,** Vliianie otkloneniia napriazheniia na poteri moshchnosti v elektrooborudovanii elektricheskikh setei i potrebiteli [The effect of voltage deviation on power losses in electrical networks and consumers], *Omskii nauchnyi vestnik*, 2 (120) (2013) 203–206.
- [3] **A.C. Rueda-Medina, A. Padilha-Feltrin,** Generators as Providers of Reactive Power Support – A Market Approach, *IEEE Transactions on Power Systems*, 28 (1) (2013) 490–502.
- [4] **S. Cheng, M. Chen,** Multi-objective reactive power optimization strategy for distribution system with penetration of distributed generation, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 10 (2014) 221–228.
- [5] **M. Kraning, E. Chu, J. Lavae, S. Boyd,** Dynamic Network Energy Management via Proximal Message Passing, *Foundation and Trends In Optimization*, 1 (2) (2013) 70–122.
- [6] **M.M. Tukhvatullin, V.S. Ivekeev, I.A. Lozhkin, F.F. Uрманова,** Analiz sovremennykh ustroystv FACTS, ispol'zuemykh dlia povysheniia effektivnosti funktsionirovaniia elektroenergeticheskikh sistem Rossii [Analysis of modern

FACTS devices used to improve the efficiency of the electric power systems of Russia], *Elektrotekhnicheskie sistemy i komponenty*, 3 (2015) 41–46.

[7] **G.P. Kornilov, A.A. Nikolaev, D.Iu. Piastolova**, Tekhniko-ekonomicheskoe sravnenie kompensiruiushchikh ustroystv dlia dugovykh staleplavil'nykh pechei shirokogo klassa moshchnosti [Techno-economic comparison of compensating devices for electric arc furnaces of a wide class of power], *Elektrotekhnicheskie sistemy i komponenty*, 1 (2016) 34–38.

[8] **Iu.V. Kudashkin, F.N. Akhmedov**, Energoeffektivnost', energosberezhenie i intellektual'nye seti [Energy efficiency, energy conservation and smart grid], *Rossiiskoe predprinimatel'stvo*, (2012) 96–102.

[9] **A.A. Radionov, A.S. Maklakov, A.D. Chernyshev**, Ispol'zovanie moshchnykh elektroprivodov na baze aktivnykh dvunapravlennykh preobrazovatelei v sostave promyshlennoi Smart Grid sistemy [The use of powerful electric drives on the basis of active bi-directional converters in the industrial Smart Grid system], *Vestnik IuUrGU. Seriya: Energetika*, 1 (2015) 74–81.

[10] **N.N. Solonina, K.V. Suslov, Z.V. Solonina**, Novye tekhnologii kompensatsii reaktivnoi moshchnosti [New technologies for reactive power compensation], *Vestnik IrGTU*, 5 (112) (2016) 135–143.

[11] **S. Stoft**, Ekonomika energosistem. Vvedenie v proektirovanie rynkov elektroenergii [Economics of energy systems. Introduction to design of electricity markets], Moscow, Mir, 2006.

[12] **Iu.S. Zhelezko**, Poteri elektroenergii. Reaktivnaia moshchnost'. Kachestvo elektroenergii [Loss of electricity. Reactive power. Power quality], Moscow, ENAS, 2009.

[13] **I.I. Kartashev, V.N. Tul'skii, R.G. Shamonov**, Upravlenie kachestvom elektroenergii [Managing power quality], Moscow, Izd. dom MIE, 2006.

[14] **V.A. Venikov, V.I. Idel'chik, M.S. Liseev**, Regulirovanie napriazheniia v elektroenergeticheskikh sistemakh [Voltage regulation in electric power systems], Moscow, Energoatomizdat, 1985.

[15] **V.A. Venikov, L.A. Zhukov, I.I. Kartashev, Iu.P. Ryzhov**, Statische istochniki reaktivnoi moshchnosti v elektricheskikh setiakh [Static reactive power sources in electric networks], Moscow, Energiia, 1975.

[16] **N.G. Hingorani, L. Gyugi**, Understanding FACTS. Concept and technology of Flexible AC Transmission Systems. IEEE Press book, 2000.

[17] Payment for Reactive Power, Commission Staff Report. № AD14-7. URL: <https://www.ferc.gov/legal/staff-reports/2014/04-11-14-reactive-power.pdf> (accessed April 09, 2017).

[18] **P. Fereidoon**, Electricity Market Reform: An International Perspective. Sioshansi and Wolfgang Pfaffenberger – Elsevier, 2006.

[19] Ekonomika i upravlenie v sovremennoi elektroenergetike Rossii: posobie dlia menedzherov elektroenergeticheskikh kompanii [Economy and management in modern power industry of Russia: a Handbook for managers of electric power companies]. Ed. A.B. Chubaisa, Moscow, NP «KONTs EES», 2009.

[20] **S.I. Rychkov**, Uslugi po regulirovaniu reaktivnoi moshchnosti s ispol'zovaniem generatorov, rabotaiushchikh v rezhime sinkhronnogo kompensatora [Regulation services, reactive power from generators working in synchronous compensator mode], *Elektricheskie stantsii*, 7 (2012) 30–35.

[21] **A.A. Gerasimenko, V.B. Neshataev**, Optimal'naia kompensatsiia reaktivnoi moshchnosti v sistemakh raspredeleniia elektricheskoi energii [Optimal reactive power compensation in distribution systems of electric energy], Monographiia, Krasnoarsk, SFU, 2012.

KOLIBABA Vladimir I. E-mail: kolibaba@eiop.ispu.ru

ZHABIN Konstantin V. E-mail: zhabin_kv@icloud.com