

УДК 338.46: 621.31

**К. В. Жабин**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», Иваново, e-mail: zhabin\_kv@icloud.com

## **ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЫНКА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ РФ**

**Ключевые слова:** реактивная мощность, рынок реактивной мощности, конкуренция, спрос, качественные параметры энергоснабжения.

В условиях возрастающих требований к повышению надежности электроснабжения и качеству электрической энергии важной особенностью является управление реактивной мощностью в энергосистеме. В настоящее время вопросы создания и внедрения рыночных механизмов управления реактивной мощностью в энергосистемах мало исследованы. С внедрением эффективных рыночных механизмов управления реактивной мощностью позволит повысить уровень надежности, экономичности и качества функционирования Единой энергосистемы России. Статья представляет собой авторский подход к пониманию основных вопросов по формированию рынка реактивной мощности в электроэнергетике РФ. Сформулированы предложения по совершенствованию электроэнергетического рынка России с целью повышения экономичности и надежности функционирования ЕЭС. Создание рынка реактивной мощности позволит повысить заинтересованность субъектов электроэнергетического рынка РФ в эффективном регулировании реактивной мощности.

**K. V. Zhabin**

State Educational Institution of Higher Professional Education Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin, Ivanovo, e-mail: zhabin\_kv@icloud.com

## **PROBLEMS OF FORMATION AND FUNCTIONING OF THE REACTIVE POWER MARKET IN RF ELECTRIC POWER**

**Keywords:** reactive power, market, reactive power, competition, demand, quality parameters of energy supply.

In the face of increasing demands to improve the reliability of power supply and the quality of electric energy, an important feature is the management of reactive power in the power system. Currently, the creation and implementation of market-based mechanisms for controlling reactive power in power systems has been little studied. With the introduction of effective market-based reactive power control mechanisms, it will increase the level of reliability, efficiency and quality of operation of the Unified Energy System of Russia. The article represents the author's approach to understanding the main issues on the formation of a reactive power market in the electric power industry of the Russian Federation. Suggestions are made to improve the electric power market of Russia with the aim of increasing the efficiency and reliability of the functioning of the UES. Creating a reactive power market will increase the interest of subjects of the electric power market of the Russian Federation in the effective regulation of reactive power.

Электроэнергетика России играет важную роль в экономическом и социальном развитии страны. Однако становится очевидно, что дальнейшее развитие этой базовой отрасли экономики невозможно без экономичного, надежного ее функционирования. Особенно остро эта проблема встала в последнее время в связи с нарастающим износом сетевого и генерирующего оборудования, вовлечением в оборот распределенных генерирующих источников, ростом спроса на энергию, изменением характеристик спроса и изменением модели поведения потребителей. Вся эта совокупность факторов в своем слож-

но сочетаемом взаимодействии ограничивает эффективность и надежность функционирования электроэнергетики. В результате отрасль в будущем может стать сдерживающим фактором развития экономики России.

При рассредоточении значительной части энергообъектов между различными собственниками и усложнении технических характеристик современных электроэнергетических систем (ЭЭС) возникают дополнительные сложности в управлении ЭЭС как единым комплексом. В частности, из-за технических особенностей в ЭЭС наряду с активной мощностью («полезной» для конечного

потребителя) постоянно генерируется и потребляется реактивная мощность (РМ), которая не расходуется на совершение «полезной» работы и не может, в противоположность активной мощности, превращаться в механическую, тепловую, световую энергию. Тем не менее РМ является неотъемлемой и необходимой частью производства, передачи и потребления электрической энергии, а также она необходима для поддержания уровней напряжения в узлах энергосистемы и обеспечения нормального, экономичного ее функционирования. Излишний профицит или дефицит РМ значительно снижает эффективность функционирования энергосистем за счет снижения способности сетей передавать электроэнергию по линиям электропередач, порождает дополнительные потери мощности.

Объем потерь в электрических сетях России составляет около 105 млрд кВт·ч, или 10,5% от всего потребления электроэнергии, что выше, чем в странах Западной Европы примерно на 3,5% [1]. Технические потери электроэнергии в распределительных электрических сетях 0,38–110 кВ в среднем почти в 2 раза выше, чем в ЕНЭС 220–1150 кВ, при этом важно отметить что на долю сетей класса напряжения 750–110 кВ приходится 80% всех потерь в электрической сети России [2]. При этом как отмечается автором работы [2] в ЕЭС можно минимизировать потери ниже, чем в зарубежных странах. Также неправильное управление РМ явилось одной из главных причин, произошедших крупных отключений в энергосистемах по всему миру в том числе и произошедшая авария в московской энергосистеме в 2005 году [3]. Поэтому РМ оказывает важное значение не только на обеспечение экономичности работы ЭЭС (снижения потерь в сетях), качественных параметров электрической энергии (качественные параметры электрической энергии по напряжению), но и обеспечение надежности функционирования ЭЭС.

В условиях рыночной экономики управление потоками РМ может осуществляться на объектах, принадлежащих различным собственникам (генераторы, потребители, сетевые компании).

Таким образом, данная проблема характеризуется не только техническими, но и чисто экономическими аспектами. Также на сегодняшний день правила электроэнергетического рынка России не обеспечивают должного заинтересованного участия всех субъектов этого рынка в вопросе регулирования РМ [4]. Проведенная в минувшие годы реструктуризация электроэнергетики в разных странах мира привела к появлению конкурентных рынков электроэнергии, в которых основное внимание уделяется активной мощности. Тем не менее расчет затрат и цен на РМ на электроэнергетическом рынке России не является четко определенным и решаемым вопросом. В связи с вышеизложенным весьма актуальным является создание рынка РМ, работа которого была бы направлена на решение всех вышеизложенных проблем.

В настоящее время в отечественной экономической литературе проблема РМ в ЭЭС является не разработанной. Все работы в этой области направлены на исследование технической стороны РМ. При этом отечественными учеными и специалистами в области энергетических рынков ставился вопрос о необходимости разработки эффективного механизма ценообразования РМ [5, 6]. На начальном этапе формирования электроэнергетических рынков в ряде зарубежных стран предлагалось создание рынков РМ, функционирующих совместно с рынками активной мощности [7]. Однако в настоящее время до практических результатов внедрение полноценных, конкурентных экономических механизмов дело не дошло ни в одной стране мира [8]. Тем не менее, создание рынка РМ является перспективным направлением и представляется крайне необходимым для дальнейшего инновационного развития электроэнергетики России.

До начала этапа реформирования электроэнергетики вопрос регулирования РМ ставился и решался как специфическая техническая и технологическая проблема, характерная для отрасли. В экономически развитых странах вопрос решался в рамках вертикально-интегрированных компаний, а в СССР – в рамках действовавшей тогда ЕЭС.

В структуре вертикально-интегрированных компаний производство, передача и распределение электроэнергии представляют собой единое целое, и, следовательно, регулирование РМ и обеспечение нормативных уровней напряжения были в комплексе с другими услугами по снабжению электроэнергией потребителей. Однако в нерегулируемой среде поставка РМ во многих странах мира, в том числе и в России, стала рассматриваться только как системная услуга [8], а для потребителей электрической энергии регулироваться выполнением установленных технических требований по поддержанию минимального коэффициента РМ в точках подключения к сети. В то же время важно отметить, что РМ из всех системных услуг является наименьшим общественным благом [7].

РМ по сравнению с активной мощностью является более сложно понимаемым продуктом на электроэнергетическом рынке. Регулирующие органы электроэнергетического рынка плохо понимают, что такое РМ и какие эффекты она может дать рынку. Наряду с этим, если разработать и ввести в работу соответствующие экономические механизмы в совокупности, образующие рынок РМ, которые бы побуждали всех участников электроэнергетического рынка к рациональному потреблению и распределению РМ в ЭЭС, то можно было бы получить значительный экономический эффект.

*Особенности РМ.* Особенностью РМ является то, что ее в отличие от активной мощности необходимо не только генерировать, но и потреблять. Необходимость в генерации и потреблении зависит от величины нагрузки системы. Таким образом, в режиме максимума нагрузок необходимо генерировать РМ в ЭЭС, а в режиме минимума нагрузок необходимо ее потреблять для поддержания нормативных уровней напряжения в узлах нагрузки. При этом источники РМ нужно размещать только тех местах ЭЭС, где будет получен максимальный экономический и технический эффект. Если говорить в целом о ЭЭС, то эффект этот затронет всех субъектов рынка, находящихся вблизи источника РМ. Анализ специализированной литературы

[9, 10, 11, 12] позволил выделить ряд особых характеристик РМ как товара:

- совмещение во времени процессов производства, распределения и потребления РМ;

- невозможность накапливать и хранить в достаточных количествах;

- невозможность заранее точно оговорить объемы генерации и потребления РМ;

- значительный локально-территориальный характер РМ из-за увеличения потерь активной мощности в сетевом хозяйстве при передаче РМ на большие расстояния;

- зависимость объемов произведенной и потребленной РМ не только от потребителей, но и от различных элементов системы передачи электрической энергии;

- по сравнению с активной мощностью имеет более сильную зависимость изменения напряжения от РМ (статическая характеристика), что в большей степени влияет на регулирующий эффект напряжения;

- необходимость проведения оптимизационных расчетов по РМ на каждом участке сети в целях оптимального распределения РМ с учетом сезонности, климатических условий, дня недели и других факторов;

- несовпадение по территориальному признаку основных центров производства и районов потребления РМ;

- необходимость бесперебойности и высокой надежности электроснабжения потребителей, требующая обязательного создания резервов РМ;

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

*Участники рынка РМ.* Конкуренция является актом обеспечения присутствия на рынке необходимого количества продавцов, покупателей и регулирующего органа. Потенциальными продавцами и покупателями РМ могут являться следующие субъекты оптового рынка: электростанции, потребители, сетевые компании, системный оператор и сбытовые компании. Таким образом, все участники рынка РМ могут быть классифицированы на участников торговли (продавцов и покупателей) и инфраструктурные

компании, которые будут обеспечивать работу рынка. Создание конкуренции между электростанциями и другими видами источников РМ, принадлежащими различным субъектам электроэнергетического рынка, представляется наиболее рациональным решением, потому что электростанции имеют более высокие капитальные и эксплуатационные затраты, несмотря на то, что для них производство РМ непросто отделить от стоимости активной мощности [13].

*Конкуренция.* РМ экономически не целесообразно передавать на большие расстояния. Поэтому она должна производиться близко к местам, где это необходимо. Требование производства РМ «на месте» (т.е. там, где будет получен максимальный экономический и технический эффект), с одной стороны обуславливается необходимостью обеспечения нормативного уровня устойчивости функционирования ЭЭС, а с другой стороны – это может стимулировать поставщиков РМ извлечь из данной ситуации дополнительную прибыль. Другими словами, рыночная сила может являться серьезной проблемой в формировании конкурентного рынка РМ.

*Затраты поставщиков РМ.* Собственники источников РМ будут нести постоянные и переменные затраты, связанные с регулированием РМ. Наряду с этим, структура затрат электростанций по регулированию РМ отличается от структуры затрат других источников РМ тем, что им характерны не только высокие капитальные (постоянные) затраты, но и высокие переменные затраты. Затраты электростанций на генерацию или потребление РМ связаны с затратами на поддержание в готовности генерирующего оборудования (постоянными затратами) и следующими основными переменными затратами [14]:

- топливные затраты (когда генератор работает в генераторном режиме);
- затраты упущенной выгоды вследствие уменьшения способности генератора производить активную мощность;
- потери активной мощности;
- ремонтные затраты, вследствие повреждения механических деталей генератора из-за сильных колебаний температуры (высокий износ некоторых элементов оборудования из-за увеличенно-

го электрического тока в результате их нагрева) и вибраций.

Затраты других источников РМ (БСК, СТАТКОМ, СТК ШР и т.д.) в основном являются постоянными, переменные затраты связаны с потерями активной мощности в данных устройствах и являются незначительными.

*Спрос на РМ.* В связи с индуктивным характером линий электропередач, значение потерь РМ в ЭЭС играет важную роль т.к. потери РМ примерно в десять раз превышают потери активной мощности [9]. Наряду с этим, при возникновении аварийных ситуаций общая величина потерь РМ в ЭЭС может значительно превышать спрос на РМ нагрузки. Поэтому при оценке общей потребности в РМ ЭЭС необходимо учитывать не только спрос потребителей на РМ, но и спрос на РМ создаваемой самой ЭЭС.

*Соответствие спроса и предложения на РМ.* При формировании рынка РМ немаловажным вопросом является согласование спроса и предложения как в краткосрочном, так и в долгосрочном периоде. При согласовании спроса и предложения появляется возможность повысить конкурентоспособность поставщиков РМ на рынке. Однако учитывая локальный характер РМ, на практике в отдельных случаях конкуренцию на рынке РМ будет обеспечить трудно в связи с низкой («вынужденной») степенью рыночной концентрации ее поставщиков. Поэтому разрыв между спросом и предложением может стать серьезной проблемой на пути создания конкурентного рынка РМ. Если спрос и предложение не совпадают в долгосрочной и краткосрочной перспективе, создать эффективный рынок не удастся.

Обеспечение равновесия между спросом и предложением на РМ в долгосрочной перспективе не гарантирует, что спрос и предложение на РМ будут совпадать в краткосрочной перспективе. Если на рынке РМ хеджировать риски в краткосрочной перспективе не представляется возможным, то поставщикам следует предоставить соответствующие экономические стимулы. Стимулы в этом случае можно создать с помощью введения правил обязательного предоставления РМ с последующей оплатой понесенных затрат. Данный инструмент



можно использовать в том случае, если имеются проблемы с концентрацией рынка.

*Характеристики источников РМ.* Существует широкое разнообразие источников РМ [15]. В управлении РМ для поддержания требуемых уровней напряжения в узлах ЭЭС и качественных параметров электроэнергии очень важным является динамические характеристики источников РМ, которые заключаются в маневренности и плавности (количество ступеней) ее регулирования в ответ на изменение спроса на РМ в ЭЭС [16]. Так же синхронные генераторы электростанций, синхронные компенсаторы (СК), статические тиристорные компенсаторы (СТК), статические синхронные компенсаторы (СТАТКОМ) и т. д. в отличие от батарей статических конденсаторов (БСК) не зависят от уровней напряжения в сети и могут регулировать РМ во всем доступном им диапазоне мощности как в нормальных, так и в аварийных ситуациях (снижение напряжения в сети). Следовательно, по сравнению с другими реактивными энергетическими ресурсами, такие как БСК и шунтирующие реакторы (ШР), они имеют большую ценность. БСК, ШР и т. д. не могут мгновенно (в течение нескольких долей секунд) осуществлять регулирование РМ, что очень важно в обеспечении качества электрической энергии и надежности. Таким образом, они являются менее ценными, чем генераторы, СК, СТК, СТАТКОМ и т. д.

*Ценообразование РМ.* Максимизация прибыли является основным принципом, используемым в микроэкономике. Максимальная прибыль достигается в двух случаях:

- когда валовой доход в наибольшей степени превышает совокупные издержки;
- когда предельный доход равен предельным издержкам.

В электроэнергетике принято использовать метод ценообразования, основанный на предельных затратах, который считается, что предоставляет правильные, справедливые ценовые сигналы производителям и потребителям электрической энергии. Наряду с этим создание рынка РМ по модели рынка активной мощности (т. е. спот рынка) будет трудно и это связано с целым рядом

причин. Во-первых, различием между затратами собственников источников активной и реактивной мощности, именно то, что переменные затраты на производство (потребление) РМ малы по сравнению с активной мощностью. Во-вторых, данная модель ценообразования позволит возместить поставщикам РМ лишь небольшую часть фактической стоимости производства (потребления) РМ т.к. капитальные и постоянные затраты источников РМ не учитываются. Поэтому будут оплачиваться только переменные затраты, что, очевидно, будет не достаточным стимулом как для поставщиков, так и для потребителей РМ. В-третьих, исследования, проведенные авторами работ [17, 18] показывают, что при спотовой модели рынка РМ получаемые цены характеризуются высокой степенью волатильности. Так построенные модели демонстрируют, что стоимость РМ при нормальной работе энергосистем близка к нулю. Но как только в системе возникает непредвиденная ситуация, то цена на РМ возрастает до максимальных значений.

В связи с вышеизложенным можно сделать вывод, что формирование спот рынка РМ будет не целесообразной и сложной задачей. Работа этой модели рынка будет обходиться очень дорого в обслуживании в связи с необходимостью создания дорогостоящей инфраструктуры и планирования расхода РМ со стороны потребителей электрической энергии. Предлагается наиболее целесообразным формирование долгосрочного рынка РМ, где бы организатор этого рынка выполнял один раз в год квалифицированные отборы поставщиков РМ, которые наилучшим образом будут удовлетворять спрос на РМ (обеспечение экономичности, надежности, в том числе качественных параметров электрической энергии). При этом прошедшим квалифицированный отбор поставщикам РМ необходимо будет возмещать только фактически понесенные затраты.

В заключении стоит отметить, что хорошо разработанная модель рынка РМ должна обеспечить не только возврат понесенных затрат поставщикам РМ, но и привлечь инвестиции в строительство новых источников РМ, а также предоставить субъектам электроэнергетического рынка соответствующие

ценовые сигналы побуждающих их к рациональному потреблению и распределению РМ в ЭЭС. Механизм ценообразования на РМ должен быть максимально прозрачным и справедливым, насколько

это возможно и возмещать поставщикам РМ понесенные затраты. Важно отметить, что функционирование рынка РМ будет способствовать увеличению благосостояния всего рыночного сообщества.

*Библиографический список*

1. Доклад Президиуму Госсовета РФ «О повышении энергоэффективности российской экономики» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cenef.ru/file/Report%2025.05.09.pdf> (дата обращения: 04.09.2019).
2. Добрусин Л.А. Повышение энергоэффективности электросетевого комплекса России // Энергосбережение. 2013. №7.
3. Воропай Н.И., Негневицкий М., Томин Н.В. и др. Интеллектуальная система для предотвращения крупных аварий в энергосистемах // Электричество. 2014. №8. С. 19–31.
4. Воротицкий В.Э., Рабинович М.А., Каковский С.К. Оптимизация режимов электрических сетей 220–750 кВ по реактивной мощности и уровням напряжения // Энергия единой сети. 2013. №3(8). С. 50–59.
5. Основные задачи формирования баланса реактивной мощности в ЕЭС России // Электрические станции. 2007. №3. С. 65–73.
6. Протокол Научного совета РАН по проблемам надежности и безопасности больших систем на тему: «Формы и условия участия тепловых электростанций в оказании услуг по обеспечению системной надежности в ЕЭС России и изолированных энергосистемах, выработка рекомендаций по механизму оказания услуг по обеспечению системной надежности» от 30.04.2014 года [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.nts-ees.ru](http://www.nts-ees.ru) (дата обращения: 04.09.2019).
7. Стофт С. Экономика энергосистем. Введение в проектирование рынков электроэнергии. М.: Мир, 2006. 623 с.
8. Жабин К.В. Рынок системных услуг в условиях проведения рыночных преобразований // Научное обозрение. 2013. №3. С. 313–318.
9. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. М.: ЭНАС, 2016. 456 с.
10. Alvarado F., Borissov B., Kirsch L.D. Reactive power as an identifiable ancillary service. Transmission Administrator of Alberta, Ltd., Alberta, Canada. [Электронный ресурс]. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.482.6201&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения: 04.09.2019).
11. Веников В.А. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах / В.А. Веников, В.И. Идельчик, М.С. Лисеев. М.: Энергоатомиздат, 1985. 214 с.
12. Sioshansi F.P., Plaffenberg W. Electricity Market Reform: An International Perspective. Elsevier Science, 2006. 688 p.
13. Barquín J., Soler D., Largo O., Relañó G., Fuente I. On the cost of the reactive power generation and voltage support service // Bulk Power Syst. Dynamics Contr. IV: Restructuring. 1998.
14. Principles for Efficient and Reliable Reactive Power Supply and Consumption: Federal Energy Regulatory Commission Staff Report. February 4, 2005. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ferc.gov/CalendarFiles/20050310144430-02-04-05-reactive-power.pdf> (дата обращения: 04.09.2019).
15. Dixon J. et al. Reactive power compensation technologies: State-of-the-art review // Proceedings of the IEEE. 2005. Т. 93. №12. С. 2144–2164.
16. Li F. et al. Assessment of the economic benefits from reactive power compensation // 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition. IEEE, 2006. С. 1767–1773.
17. Hogan W.W. Markets in real electric networks require reactive prices // The Energy Journal. 1993. Vol. 14. №3. P. 171–200.
18. Weber J.D., Overbye T.J., Sauer P.W., DeMarco C.L. A simulation based approach to pricing reactive power // Proceedings of the Thirty-First Hawaii International Conference on System Sciences. IEEE, 1998. Vol. 3. P. 96–103.