

ВИРТУАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ — ИДЕИ И РЕШЕНИЯ

Н. И. Аристова, В. М. Чадеев (ИПУ РАН)

Рассмотрено понятие виртуальной электростанции (ВЭ), преимущества от ее использования, технические сложности организации данной структуры. Приведены примеры комплексных решений для создания ВЭ, предлагаемые компаниями — мировыми лидерами в автоматизации электроэнергетики. Перечислены пилотные и введенные в эксплуатацию примеры ВЭ. Отмечено, что информация о пилотных проектах ВЭ в России на данный момент отсутствует. Приведены примеры исследований, проводимых отечественными разработчиками в данной области.

Ключевые слова: виртуальная электростанция, источники и потребители электроэнергии, аккумуляторы, Industrial Internet of Things, аналитическое ПО, блокчейн.

Введение

Современные электростанции стабильно вырабатывают электроэнергию и поставляют ее на промышленные и социальные объекты. Без электроэнергии жизнь человека XXI века просто немыслима. Работа электростанций при этом связана с рядом проблем, среди которых скачки потребления. Главной причиной изменения во времени нагрузки в электрической сети является хаотичное включение/отключение потребителей. Нагрузка изменяется в связи со сменой времен года: в жару мы пользуемся кондиционерами, а в холодное время — обогревателями, а также ежедневно, когда люди собираются на работу, а вечером отдыхают после трудового дня.

В случае аварии на одной подстанции нагрузка перераспределяется между соседними участками сети. Нередко это приводит к эффекту веерных отключений, когда перегрузка одного узла вызывает последовательную перегрузку остальных. Для предотвращения подобных ситуаций поставщики электроэнергии резервируют 10...15% мощности. Чаще всего эти резервы остаются невостребованными и для предприятия переходят в графу убытков.

В последнее время очень актуальной темой является использование возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ) благодаря ряду их преимуществ, в числе которых отсутствие выбросов в атмосферу, сохранность природных ресурсов, простота развертывания. Но количество электричества, вырабатываемое ВИЭ, сильно зависит от времени года, погоды и множества других факторов. При этом по-

требление электричества меняется в широких пределах, и пиковый объем потребления может прийти на минимум генерации, и, наоборот, могут возникнуть излишки электроэнергии, если аккумуляторы заряжены, а источник электроэнергии продолжает ее вырабатывать, например, ветер не утихает [1].

Для использования преимуществ традиционных и возобновляемых источников электроэнергии и устранения их недостатков целесообразно реализовывать концепцию виртуальной электростанции.

Виртуальная электростанция

Виртуальная электростанция (ВЭ) совокупно объединяет множество территориально разнесенных источников электроэнергии в единую сеть, которая обеспечивает стабильное электроснабжение за счет выявления причины пиковой нагрузки и сглаживает скачки потребления. Концепция ВЭ позволяет объединить распределенные ВИЭ с традиционными электростанциями [1].

В состав ВЭ входят (рисунок):

- источники энергии (возобновляемые и традиционные);
- потребители электричества (промышленность, население);
- система накопления энергии;
- датчики Industrial Internet of Things (IIoT) для сбора информации и управления работой потребителей. Такими датчиками оснащаются все компоненты ВЭ, так как системе требуется подробная информация о выработке и потреблении. Датчики IIoT уведомляют систему о том, что накопительные аккумуляторы заряжены полностью и нужно устранить избыток генерации. Например, они понизят температуру в отопительной системе в случае потепления или отрегулируют работу промышленного оборудования без нарушения хода технологических процессов;

— ПО, управляющее работой энергосети. Важной особенностью ВЭ является возможность осуществлять дистанционное управление энергопотоками с помощью современных программных систем, предоставляющих конечному пользователю данные, необходимые для принятия решения, а также быстро реагировать на посто-



Структура виртуальных электростанций. Источник: Toshiba [1]

янно меняющуюся нагрузку [2]. Как правило, данное ПО реализуется на базе искусственного интеллекта с использованием технологий обработки больших данных.

Действующие в настоящее время ВЭ условно классифицируются следующим образом (<http://www.rgl.ru/Projects/100>):

а) по назначению:

— на технологические (ТВЭ), которые предназначены для оперативного технологического управления режимами объектов распределенной генерации в составе микросетей и территориальных систем электроснабжения. Потребителями услуг ТВЭ, как правило, являются системные операторы, сетевые и генерирующие компании;

— коммерческие (КВЭ), которые обеспечивают совместное участие агрегированных объектов распределенной генерации на рынке электроэнергии. Потребители услуг КВЭ — энергосбытовые и генерирующие компании, коммерческие операторы розничных рынков;

б) по видам агрегируемых ресурсов:

— ВЭ, агрегирующие потребителей (активные потребители, устройства с управляемой нагрузкой, в том числе мобильные устройства);

— ВЭ, агрегирующие объекты распределенной генерации;

— комбинированные ВЭ.

Виртуальная электростанция объединяет всех участников рынка электроэнергетики, и все они получают преимущества:

— распределительные и магистральные сети: снижение пиковых нагрузок, уменьшение рисков перебоев, повышение контроля над распределенными источниками генерации, экономия инвестиций;

— сбытовые компании — повышение надежности энергоснабжения, дешевые ресурсы, новые возможности в части биллинга и программ управления потреблением;

— владельцы энергетических установок и потребители: плату за мощность, отдаваемую в энергосистему, экономии энергоресурсов и осмысленное энергопотребление.

Другими словами, ВЭ — это биржа продавцов и покупателей электроэнергии, которая уравнивает спрос и предложение энергии. Потребители используют электроэнергию, как если бы она была сгенерирована классической АЭС, ТЭЦ. А производители энергии гарантированно продают произведенное <https://habr.com/ru/company/toshibarus/blog/451950/>

При этом развертывание технологий, необходимых для виртуальных электростанций, сопровождается рядом трудностей.

1) Большое число распределенных источников в одной энергосистеме может привести к неблагоприятным последствиям, таким как колебание частоты и напряжения, что может вызвать неконтролируемые перетоки мощности и привести к нестабильности работы системы в целом.

2) В ВЭ источники энергии переходят на сторону оконечных устройств. Требования к контролю за этими ресурсами превосходят возможности традиционных централизованных систем. Необходимо организовать сбор и обработку данных от конечных устройств, таких как инверторы, для реализации постоянного контроля за ними с целью обеспечения оптимальных режимов и предотвращения нестабильности работы энергосистемы в целом [1].

3) Необходимость реализации множества бесшовных коммуникационных решений для обеспечения стабильной работы энергосистем: с одной стороны, это связь для получения данных от устройств генерации, таких как инверторы, а с другой — связь для мониторинга и управления устройствами системы. Для решения этих задач могут использоваться IoT-шлюзы. Через них данные, полученные от инверторов, счетчиков, измерительных трансформаторов и других устройств, должны быть переданы в систему управления распределенными источниками энергии для поддержания стабильной работы энергосистемы [3].

4) В некоторых странах регулирующие органы требуют от операторов солнечных электростанций предоставлять прогнозы по генерации выходной мощности не менее чем на 3 сут. вперед для обеспечения баланса стабильной работы энергосистемы. Большинство операторов систем не имеют представления о реальных возможностях генерации энергии. Для оценки генерируемой мощности требуется объединить данные от многочисленных агрегаторов и потребителей, чтобы получить полную картину спроса и предложения [1].

5) ВЭ — всегда индивидуальный проект, поскольку структура ВИЭ и их потребителей всегда уникальна и зависит от географических и демографических особенностей региона. <https://habr.com/ru/company/toshibarus/blog/451950/>

Решения по автоматизации для виртуальных электростанций

Концепции ВЭ полностью соответствует основным принципам цифровой революции и использует многие современные технологии, среди которых Industrial Internet of Things, алгоритмы искусственного интеллекта, облачные вычисления, большие данные, компьютерное моделирование и т.д. Присоединение к участникам рынка ВЭ открывает перед компаниями дополнительные конкурентные преимущества. Кроме того, ВЭ пропагандирует генерацию экологически чистой электроэнергии. В связи с этим многие мировые лидеры области электроэнергетики рассматривают область ВЭ как стратегическое направление развития бизнеса и разрабатывают коммерческие решения для данного сектора.

Комплексные решения и необходимое технологическое оборудование для создания различных видов ВЭ предлагают компании ABB, Bosch, Cisco, GE, Siemens, Schneider Electric, Toshiba и др. Приведем только некоторые примеры.

Компания ABB предлагает заказчикам PCU ABB Ability™ Symphony® Plus, позволяющую в том числе контролировать работу ресурсов ВЭ и оптимизировать распределение электроэнергии между потребителями. Платформа в реальном времени сопоставляет графики предстоящих нагрузок с актуальным графиком нагрузки оборудования, прогнозирует отклонения, планирует проведение техобслуживания, определяет суточный объем свободной электроэнергии для торговых операций и т.д. Платформа включает специальные алгоритмы дистанционного мониторинга и управления распределенными ветряными и солнечными электростанциями, позволяет интегрировать их в единую систему мониторинга и управления ВЭ (<https://new.abb.com/>).

Система распределения электроэнергии ABB Ability™ Electrical Distribution Control System с функцией визуализации энергопотребления позволяет отследить, сколько и для каких целей расходуется энергия, а также дает возможность выбрать источник энергии: теплоцентраль, распределительная сеть, аккумуляторная батарея, солнечная панель. Специализированное приложение ABB Optimax решает задачи оптимизации энергопотребления и снижения затрат на закупку энергии. Решение прогнозирует энергопотребление на день вперед на основе прогнозов погоды и нагрузки. Модуль Optimax PowerFit предназначен специально для оптимизации управления ВЭ и микроэнергетическими системами (<https://new.abb.com/>).

Компания Siemens разработала систему управления распределенным производством и потреблением энергии DEMS Compact — облачный Internet-сервис для управления виртуальными электростанциями. Данный сервис помогает предприятиям объединять небольшие распределенные источники электроэнергии своих клиентов и поставлять собранные энергоресурсы операторам крупных ВЭ для продажи. Поскольку для создания малой ВЭ вполне достаточно стандартного набора функций системы DEMS, то при ее использовании снижаются затраты на лицензионное программное обеспечение. Другое преимущество разработки в том, что не нужно приобретать и обслуживать компьютерное оборудование, которое необходимо при использовании других технологий. В тестировании сервиса участвует компания RWE — оператор одной из крупных виртуальных сетей. Система DEMS предоставляет интерфейсы для распределенных генерирующих станций, инструментарий для прогнозирования объема производства, а также Internet-портал, через который владельцы распределенных станций могут продавать выработанную ими энергию в сети ВЭ (<https://w3.siemens.ru/>).

Компания Schneider Electric разработала унифицированную архитектуру EcoStruxure, которая объединяет информационные и операционные технологии в различных отраслях рынка. В области электроэнергетики применяется решение EcoStruxure Grid. Все решения EcoStruxure подразделяются на три уровня (<https://www.se.com/ru/>):

- 1) подключаемые устройства;
- 2) инфраструктура связи, предварительной обработки и визуализации данных. Применительно к электроэнергетике на этом уровне расположены модульная платформа Easergy T300, состоящая из аппаратной части, встроенного ПО и приложения для управления распределительными сетями; а также энергетическая SCADA-система PACIS-EMCS;
- 3) аналитические приложения ADMS (Advanced Distribution Management System), Microgrid Management, облачные сервисы для предсказательной аналитики и обслуживания и др.

Также на рынке электроэнергетики представлены поставщики, специализирующиеся на создании, поддержке эксплуатации и сервисном обслуживании ВЭ, например, CyberGrid, Kisters, PSI, Restore и др.

¹ Блокчейн - это распределенная база данных, у которой устройства хранения данных не подключены к общему серверу. Особенность блокчейна состоит в том, что данные хранятся одновременно у всех пользователей проекта, поэтому такую систему невозможно взломать. Технология разрабатывалась для электронной коммерции, но может применяться и в других сферах.

Компания PSI разработала комплексное решение для виртуальных электростанций PSI^{vpp}, включающее [4]:

- центральную систему управления профилем потребления, обеспечивающую управление всеми процессами и оборудованием ВЭ, что способствует интеграции ВЭ в энергетическое решение более высокого уровня. Модуль обеспечивает управление договорами с участниками, производит расчет затрат и прибыли, осуществляет планирование и прогнозирование объемов генерации, оптимизации работы системы;
- SCADA-систему для сбора данных, а также управления оборудованием и его контроля;
- Smart Telecontrol Unit (STU) — «умное» устройство для подключения компонентов виртуальной электростанции. На STU собираются, хранятся и передаются в систему управления данные измерений и отчеты различных производителей и потребителей. STU поддерживает стандартные протоколы дистанционного управления IEC 60870-5-101/-103/-104, IEC 61850 и DNP3, а также специальные протоколы, промышленные протоколы (Modbus, CANopen) и многочисленные протоколы для счетчиков (SML, SYM2, DLMS, IEC 62056-21). Интегрированная программа Soft-SPS обеспечивает дополнительное управление установками и контроль за ними. «Умные» приложения Smart Apps способствуют локальной оптимизации процессов на самих установках, включая краткосрочную оптимизацию и автономное устранение повреждений для децентрализованного подключения оборудования и его контроля.

Примеры виртуальных электростанций

Развитию ВИЭ уделяется большое внимание во всем мире. В ряде стран на правительственном уровне пропагандируется идея создания низкоуглеродного общества без топлива или CO₂ выбросов. В связи с этим для стабилизации сети в условиях массового внедрения ВИЭ (ветер, солнце) нужны ВЭ. Рассмотрим наиболее показательные примеры в области реализации ВЭ.

ВЭ и технология блокчейн

В начале 2019 г. международная корпорация Kyocera (Япония) и компания LO3 Energy Inc. (США) анонсировали совместный проект по созданию ВЭ, управляемой при помощи технологии блокчейн¹ и объединяющей распределенную сеть солнечных панелей (источников энергии), накопителей энергии и активных потребителей. Технология блокчейн используется для проверки и регистрации транзакций, позволяя потребителю "делиться" энергией, которую они производят с помощью собственных солнечных батарей через микросеть (<https://global.kyocera.com/>).

ВЭ без генерации электроэнергии

Энергокомпания Fortum Corporation (Финляндия) запустила в 2016 г. пилотный проект ВЭ, в которую объединила потребителей мощности — 70 частных домохозяйств, получающих тепло и горячую воду от водогрейных котлов. Интерес инициативы в том, что диспетчеры используют мощности частных потребителей для регулирования нагрузки

энергосистемы. Системный оператор Fingrid (Финляндия) дистанционно управляет потреблением водонагревателей: когда энергосистеме требуется больше мощности, потребление мощности водонагревателями снижается (в заданных пределах, не влияющих критичным образом на обогрев дома или горячее водоснабжение). В этой схеме нет производства электроэнергии, нет генерирующих источников, но при этом она обеспечивает баланс мощности генерации и потребления. <https://peretok.ru/articles/innovations/13216/>

Участие в ВЭ частных потребителей

Следующая рассматриваемая ВЭ объединяет в управляемую сеть солнечные панели. Энергетическая компания RWE (Германия) объединила в ВЭ генерирующие ВИЭ установки, разбросанные по всей территории Рейнско-Рурского региона (Германия). Связь и система управления, разработанная Siemens, позволила получить около 80 МВт мощности, которые RWE продавала на бирже. Особенность проекта в размещении ВИЭ у бытовых потребителей. <https://peretok.ru/articles/innovations/13216/>

Остановимся еще на одном примере ВЭ, использующей потребительские энергетические ресурсы. Компания Mitsubishi Motors (Япония) получила правительственный грант для реализации проекта ВЭ, в которой ресурсами выступают гибриды и электрокары, солнечные панели и стационарные накопители. Заряжаемые от сети гибриды или электромобили способны предоставлять сети часть емкости своих батарей для работы в качестве буфера, помогающего сглаживать всплески в потреблении электроэнергии. У этого принципа есть две стороны: техническая и деловая. В первом случае нужны двунаправленные зарядные станции, переправляющие энергию и в машины, и от них в сеть. Во втором — разрабатывается бизнес-модель, которая использует большое число автомобилей для регулирования спроса и предложения электроэнергии. В качестве нагрузки на ВЭ выступают завод компании Mitsubishi Motors в г. Окадзак и офис фирмы Shizuoka Gas в г. Сидзуока. В проекте также участвуют Tokyo Electric Power Company, TEPCO Energy Partner, TEPCO Power Grid, Hitachi Systems Power Service и Hitachi Solutions (<https://www.drive.ru/>).

ВЭ из систем аккумулирования энергии

Виртуальные электростанции могут объединять системы аккумулирования электроэнергии. Так, компания Glasgow Electric Plant Board установила в 165 частных домах интеллектуальные системы хранения электроэнергии и управляет ими следующим образом: в ночное время или когда спрос и цены на электроэнергию низкие, аккумуляторы ее накапливают. Когда спрос и цены достигают высокого уровня, энергокомпания направляет сигнал аккумуляторным батареям. Те начинают снабжать потребителей, сокращая таким образом необходимость в дополнительном производстве электроэнергии за счет традиционной генерации. <https://peretok.ru/articles/innovations/13216/>

Практический пример применения ВЭ. Отметим, что большинство перечисленных проектов носят характер пилотных и находятся на стадии тестирования. Но на сегодняшний день существуют апробированные проекты, переведенные в статус коммерческой эксплуатации. Одним из первых в мире практических примеров применения ВЭ стал проект

компании PowerShift Atlantic, реализованный в провинции Нью-Брунсуик (Канада) и ее окрестностях в 2010–2015 гг. Он объединил энергосистемы Нью-Брунсвика, Новой Шотландии и острова Принца Эдуарда, состоящие как из традиционных, так и возобновляемых источников энергии. В результате запуска ВЭ были почти полностью сглажены пиковые нагрузки в сети (<https://habr.com/>).

ВЭ в России

В отличие от зарубежных энергосистем в ЕЭС России доля распределенной генерации на основе ВИЭ относительно невелика (в перспективе до 2025...2030 гг. <3%) (<http://www.rgk1.ru>). Поэтому значительно скромнее работы в области создания ВЭ. Информация о реализованных пилотных проектах на данный момент отсутствует. И тем не менее отдельные работы в этом направлении ведутся.

В качестве экспериментальной площадки для отработки технологий ВЭ в России в первую очередь рассматривается остров Русский в Приморье. Тому есть несколько причин. Во-первых, удобное расположение острова на тихоокеанском побережье с доступным для освоения потенциалом ветровой, солнечной и волновой энергетики. Во-вторых, на о. Русский в 2013 г. создан кампус Дальневосточного федерального университета (ДВФУ), который может стать одной из российских площадок для отработки технических, коммерческих и информационных решений в области интеллектуальных сетей.

Кроме того, на острове недавно обновлена энергетическая инфраструктура. К настоящему времени на о. Русский введены в эксплуатацию три современные когенерационные мини-ТЭЦ на базе газовых турбин и котлов-утилизаторов. Пока электроснабжение острова происходит по двум линиям электропередачи (ЛЭП) 220 кВ от Приморской энергосистемы, в то время как мини-ТЭЦ производят только тепловую энергию. По мере выполнения нормативных требований для подключения источников распределенной генерации к Приморской энергосистеме, мини-ТЭЦ о. Русский станут генерировать и электрическую энергию в условиях параллельной работы с энергосистемой. Не исключена также и автономная работа сети электроснабжения о. Русский [5].

В конкурсе инновационных проектов и разработок в сфере электроэнергетики «Энергопрорыв», учрежденном при участии фонда Сколково, зарегистрирован проект, цель которого на базе имеющейся сетевой инфраструктуры о. Русский и лабораторного корпуса ДВФУ создать экспериментальную площадку для отработки технологии мультиагентных систем управления виртуальными станциями и микро-сетями, находящимися в составе большого энергообъединения.

На конкурсе «Энергопрорыв» также зарегистрирован другой проект, посвященный разработке модульного решения ВЭ для регионов России. Ключевой особенностью проекта является подход к интеграции ветровой электростанции (ВЭС) в энергосистему России в паре с ГЭС малой и средней мощности. В основе подхода лежит моделирование связки ВЭС-ГЭС, где ГЭС выступает регулятором качества и надежности электроснабжения, компенсируя нестабильность и стихийность ВЭС (<https://gridology.ru/projects/490>)

Проявляют интерес к теме ВЭ и в сфере высшего образования. Так, в Иркутском национальном исследовательском техническом университете установлена модель виртуальной электростанции, разработанная в г. Магдебург (Германия) сотрудниками Технического университета Отто-фон-Герике и Научного центра Фраунхофера. Оборудование получено благодаря гранту по постановлению Правительства № 220, который предполагает оснащение лабораторий современными приборами для научных исследований. Виртуальная электростанция наглядно демонстрирует работу «интеллектуальных» сетей и позволяет увидеть, как в ближайшем будущем будет устроена энергосистема в отдельном городском микрорайоне (<https://www.istu.edu>).

В Нижегородском государственном техническом университете им. Р. Е. Алексеева тематика ВИЭ и ВЭ включена в план исследовательских работ. В 2018 г. вниманию ученого совета была предложена к защите работа, посвященная повышению эффективности электроснабжения энергоудаленных потребителей на основе технологий ВЭ. Для достижения поставленных в исследовании целей была разработана физическая модель электротехнического комплекса, функционирующего по принципу ВЭ. Физическая модель реализована в виде лабораторного стенда, в котором на шине переменного тока объединены имитаторы солнечной и ветровой электростанций, накопители электроэнергии, двигательная и резистивная нагрузки. На физической модели проведены исследования режимов работы и качества электроэнергии в сети, объединяющей несколько распределенных систем электроснабжения, при выдаче в сеть излишков мощности от источников. Разработанный стенд может быть использован для изучения закономерностей и процессов, происходящих в электрической сети, объединяющей распределенные системы электроснабжения, демонстрации возможности технологий ВЭ, а также сопровождения развертывания в России пилотных проектов по созданию ВЭ [6].

Исследователи Севастопольского технического университета рассматривают пути повышения эффективности гибридной электростанции *Gorona del Viento* с помощью создания ВЭ на Канарском острове Эль-Йерро [7].

В сфере бизнеса России также понимают перспективность обсуждаемого направления. Первой на вызов цифровой революции откликнулась АО «Первая розничная генерирующая компания», которая в 2016 г. зарегистрировалась в реестре участников проектов инновационного центра Сколково с инициативой по созданию ВЭ. Проект направлен на разработку ВЭ субъекта электроэнергетики, обеспечивающего интеграцию (агрегирование) объектов распределенной генерации, потребителей с управляемой нагрузкой и накопителей электроэнергии для их совместного участия в рынках электроэнергии, оказания системных услуг и взаимного резервирования. Проект включает разработку технологической и нормативной базы, а также создание технологического комплекса, практическую от-

работку основных технических решений и регламентов ВЭ на основе энергосбытовой компании — субъекта оптового рынка электроэнергии (<http://www.rgk1.ru>).

Заключение

Идея использования ВИЭ уже нашла практическое подтверждение и экономическое обоснование в ряде проектов за рубежом. Имеются примеры отдельных внедрений и в нашей стране. С развитием технологий цифровизации перед электроэнергетикой открываются новые горизонты, позволяющие развивать идеи создания «умных» и экологических энергосистем. Пилотные и коммерческие проекты работают и приносят обоюдную выгоду всем участникам виртуальной энергосистемы. В России к этой теме присматриваются в первую очередь исследовательские коллективы.

В этой связи уместно вспомнить обсуждения на страницах журнала «Автоматизация в промышленности» о взаимодействии науки и практики, которое продемонстрировало значительный разрыв интересов между научными и учебными организациями и компаниями, работающими в сфере бизнеса. Этот разрыв может быть сокращен с помощью правительственных программ и грантов, поощряющих коммерческие компании к исследовательской деятельности и сотрудничеству с научными и учебными организациями. В этом случае у ряда практических научных разработок появится шанс на реальное внедрение в различных отраслях промышленности. При наличии стимула к внедрению новых технологий у энергетических компаний заявленные сегодня проекты создания ВЭ смогут воплотиться в реальности.

Список литературы

1. *Бородин К.* Как виртуальные электростанции дают реальную экономию и надёжность // Энергоньюс. 2019. Апрель. <http://energo-news.ru/archives/151588>
2. *Xing L., Wang J., Dooner M., Clarke J.* Overview of Current Development in Electrical Energy Storage Technologies and the Application Potential in Power System Operation. *Applied Energy*, 2015, vol. 137, pp. 511–536.
3. IoT решения Moxa для виртуальных электростанций. <https://moxa.ru/>
4. Интегрированное решение для виртуальных электростанций // *Energy Manager*. 2014. №1
5. *Горте О.И., Кирьянова Н.Г., Остапенко А.И. и др.* Остров Русский — экспериментальная база для исследования противоаварийной автоматики микроэнергосистем // *Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации*. 2015. № 2.
6. *Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Липужин И.А., Кечкин А.Ю.* Исследование статической устойчивости электротехнических комплексов виртуальных электростанций // *Вест. Самар. гос. техн. ун-та. Серия «Технические науки»*. 2017. № 2 (54). С. 121–129.
7. *Новых А.В., Свириденко И.И., Гоголев Г.В.* Повышение эффективности гибридной электростанции с помощью виртуальной электростанции // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2019. Т. 19. № 2. С. 87–96.

*Аристова Наталья Игоревна — канд. техн. наук, старший научный сотрудник,
Чадеев Валентин Маркович — д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник
Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН.
Контактный телефон (495) 334-91-30.*