

Ниже опубликованы 4 из 11 статей, представленных авторами по результатам их исследований в рамках международного проекта ICOEUR «Интеллектуальная координация оперативного и противоаварийного управления энергообъединениями Европейского Союза и России». Остальные статьи будут опубликованы в следующих номерах «Электричества».

Мониторинг и прогнозирование режимов совместно работающих энергообъединений и управление ими¹

ВОРОПАЙ Н.И., РЕТАНЦ К., СУХАНОВ О.А.

Представлены основные идеи совершенствования технологии управления суперэнергообъединениями. Соответствующие подходы являются основой международного проекта «Интеллектуальная координация оперативного и противоаварийного управления энергообъединениями Европейского Союза и России (проект ICOEUR), выполняемого международным консорциумом организаций в соответствии с 7-й рамочной программой сотрудничества Европейского Союза и России и в рамках государственного контракта, поддерживаемого Министерством образования и науки РФ.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, мониторинг, прогнозирование, управление

Закономерности развития электроэнергетических систем (ЭЭС) и изменения условий их функционирования привели к существенным трансформациям в структуре систем и режимах их работы. Эти трансформации обусловлены следующими факторами:

увеличением масштабов ЭЭС, расширением обслуживаемых ими территорий, объединением на совместную работу различных ЭЭС с формированием межрегиональных, межгосударственных и межконтинентальных энергообъединений;

децентрализацией электроснабжения в связи с расширением использования источников распределенной генерации, подключаемых к узлам распределительной электрической сети;

реструктуризацией электроэнергетики, в результате которой ее структура часто коренным образом отличается от технологической структуры ЭЭС как технически единого объекта и от структуры технологического управления этим объектом;

либерализацией отношений в электроэнергетике, в результате которой возникает множество

The basic ideas concerned with improving the technology for control of super power pools are presented. The corresponding approaches constitute the basis of the international project “Intelligent Coordination of Operation and Emergency Control of European Union and Russian Power Grids” (the ICOEUR project) implemented by an international consortium of organizations in accordance with the Seventh Framework Program of Cooperation of European Union and Russia and within the framework of a state contract supported by the Ministry of the Russian Federation for Education and Science.

Key words: electric power systems, monitoring, prediction, control

субъектов отношений с несовпадающими, часто противоречивыми интересами в процессе развития, функционирования и управления ЭЭС.

Все эти факторы существенно усложняют режимы работы ЭЭС, повышают их динамичность и непредсказуемость, увеличивают опасность тяжелых аварий с нежелательным развитием и массовыми последствиями для системы и потребителей и поэтому требуют более оперативной и адекватной реакции систем управления. Это вызывает необходимость совершенствования и развития принципов и систем управления режимами ЭЭС [1], в процессе которого следует использовать:

новые средства измерения параметров режима ЭЭС (Phazor Measurement Unit – PMU) и управления ими (Flexible Alternating Current Transmission System – FACTS, накопители энергии и др.), радикально повышающие наблюдаемость и управляемость ЭЭС;

современные средства коммуникаций, новые информационные технологии и методы искусственного интеллекта, высокоэффективные компьютерные средства, принципиально изменяющие процессы сбора, обработки, передачи, представления (визуализации) и использования информации об ЭЭС;

¹ Работа выполнена при поддержке ведущей научной школы (грант НШ № 4633.2010.8) и РФФИ (грант № 09-08-91330 ННИО_а).

эффективные математические методы теории управления в многокритериальных противоречивых условиях.

Совместная работа энергообъединений регионов или стран в составе протяженного суперэнергообъединения, практическая необозримость информации о его текущем состоянии, различия в принципах управления режимами и в используемых программных средствах в разных энергообъединениях, конфиденциальность некоторой части информации заставляют в процессе совершенствования и развития систем управления режимами ЭЭС использовать распределенные алгоритмы обработки информации о состоянии системы и вырабатки управляющих воздействий.

Современные средства измерения параметров режима ЭЭС и управления ими, новые средства коммуникаций и обработки информации и др. позволяют на новой основе и с существенно большей эффективностью построить один из важнейших этапов управления режимами ЭЭС – оперативное и противоаварийное управление ими.

Изложенные подходы раскрываются далее в данной статье и являются базой для разрабатываемого международным консорциумом организаций международного проекта «Интеллектуальная координация оперативного и противоаварийного управления энергообъединениями Европейского Союза и России» (проект ICOEUR) [2]. Проект выполняется в соответствии с 7-й рамочной программой сотрудничества Европейского Союза и России в области энергетики и Федеральной целевой программой «Исследования и разработки в приоритетных областях научно-технологического комплекса России на 2007–2012 гг.». В статье дается краткая характеристика проекта.

Технология распределенных расчетов, планирования и управления режимами больших ЭЭС базируется на методе функционального моделирования [3]. Теоретическим фундаментом метода функционального моделирования являются следующие основные принципы:

построение и функционирование модели большой ЭЭС при решении задач расчета, планирования и управления режимами как иерархической структуры, включающей модели нижнего уровня – системы уравнений подсистем и модель верхнего уровня – систему уравнений связи для граничных переменных;

представление подсистем в модели верхнего уровня функциональными характеристиками, отражающими зависимости между граничными и обобщенными переменными подсистем при соблюдении в подсистеме всех внутренних ограничений в виде равенств и неравенств;

формирование системы уравнений связи на основе записанных в общем виде граничных условий при подстановке в них выражений для функциональных характеристик подсистем (эти условия могут иметь вид выражения для законов Кирхгофа, относящихся к граничным переменным, и выражений, представляющих условия оптимальности для граничных переменных в задачах оптимизации) и решение системы уравнений связи, позволяющее определить значения граничных переменных подсистем.

В соответствии с принципами функционального моделирования большая ЭЭС при решении задач мониторинга и управления режимами рассматривается как совокупность составляющих ее подсистем, каждая из которых представляет в данном случае отдельное энергообъединение, работающее совместно с другими энергообъединениями. Расчет определяемых внутренних переменных подсистем осуществляется в процессе формирования и решения систем уравнений подсистем (системы уравнений нижнего уровня) и системы уравнений верхнего уровня, включающей граничные переменные.

Процесс решения задач расчета, планирования и управления режимами большой ЭЭС в соответствии с методом функционального моделирования осуществляется по универсальному иерархическому алгоритму, предусматривающему на каждой итерации выполнение следующей последовательности действий:

формирование систем уравнений подсистем, отражающих ограничения в виде равенств и неравенств на внутренние переменные подсистем, и последующий расчет функциональных характеристик подсистем (ход вверх);

формирование и решение системы уравнений связи и вычисление таким образом значений граничных переменных;

вычисление значений внутренних переменных подсистем из систем уравнений подсистем при известных значениях граничных переменных (ход вниз).

Отдельные этапы данного универсального алгоритма и алгоритм в целом характеризуются следующими особыми свойствами:

в формируемых на нижнем уровне модели системах уравнений подсистем граничные переменные подсистем и значения множителей Лагранжа рассматриваются как неизвестные, представляемые символами переменных;

решаемая на верхнем уровне модели система уравнений связи составляется из условий выполнения законов Кирхгофа (оптимальности значений граничных переменных в задачах оптимизации)

при представлении подсистем с помощью функциональных характеристик, алгоритм получения которых гарантирует выполнение условий выполнения ограничений в виде равенств и неравенств для внутренних переменных подсистем при изменяющихся значениях граничных переменных;

конечные значения переменных, получаемые в результате решения задачи по иерархическому алгоритму функционального моделирования, а также значения этих переменных, получаемые на промежуточных итерациях, совпадают с соответствующими значениями переменных, получаемыми по базовому алгоритму для модели системы в целом, на основе которого составлен данный иерархический алгоритм.

Общая структура распределенной системы, предназначенной для реализации данного универсального иерархического алгоритма, представлена на рис. 1. В этой системе действия, относящиеся к системе уравнений каждой подсистемы, выполняются на компьютере нижнего уровня, находящемся в пределах этой подсистемы. Формирование и решение системы уравнений верхнего уровня выполняются на компьютере верхнего уровня данной системы – сервере. При решении задач расчетов, планирования и управления режимами ЭЭС данная распределенная система действует следующим образом:

расчет функциональных характеристик каждой из подсистем выполняется на соответствующем компьютере нижнего уровня, т.е. при параллельной работе всех компьютеров нижнего уровня;

решение задачи верхнего уровня (формирование и решение системы уравнений связи) выполняется в последовательном режиме на центральном компьютере – сервере;

расчет внутренних переменных каждой подсистемы выполняется на соответствующем ей компьютере, т.е. при параллельной работе всех компьютеров нижнего уровня;

в ходе решения задачи осуществляется передача данных о параметрах функциональных характеристик из компьютеров нижнего уровня в сервер и передача данных о рассчитанных значениях граничных переменных из сервера в компьютеры нижнего уровня.

Объемы информации, передаваемые в распределенной системе в ходе решения указанных выше задач для энергообъединений, незначительны по сравнению с общим объемом исходной информации для решения этих задач. Конечные и промежуточные результаты вычислений в ходе итерационного процесса при решении задач для энергообъединений в данной системе совпадают с результатами решения задачи по соответствующему базовому алгоритму, относящемуся к системе в целом.

Применение технологии распределенного решения задач расчета, планирования и управления режимами больших энергообъединений открывает возможность одновременного выполнения требований оптимального управления энергообъединениями и сохранения независимости центров управления энергосистем. В то же время, так же как в централизованной системе, в распределенной системе

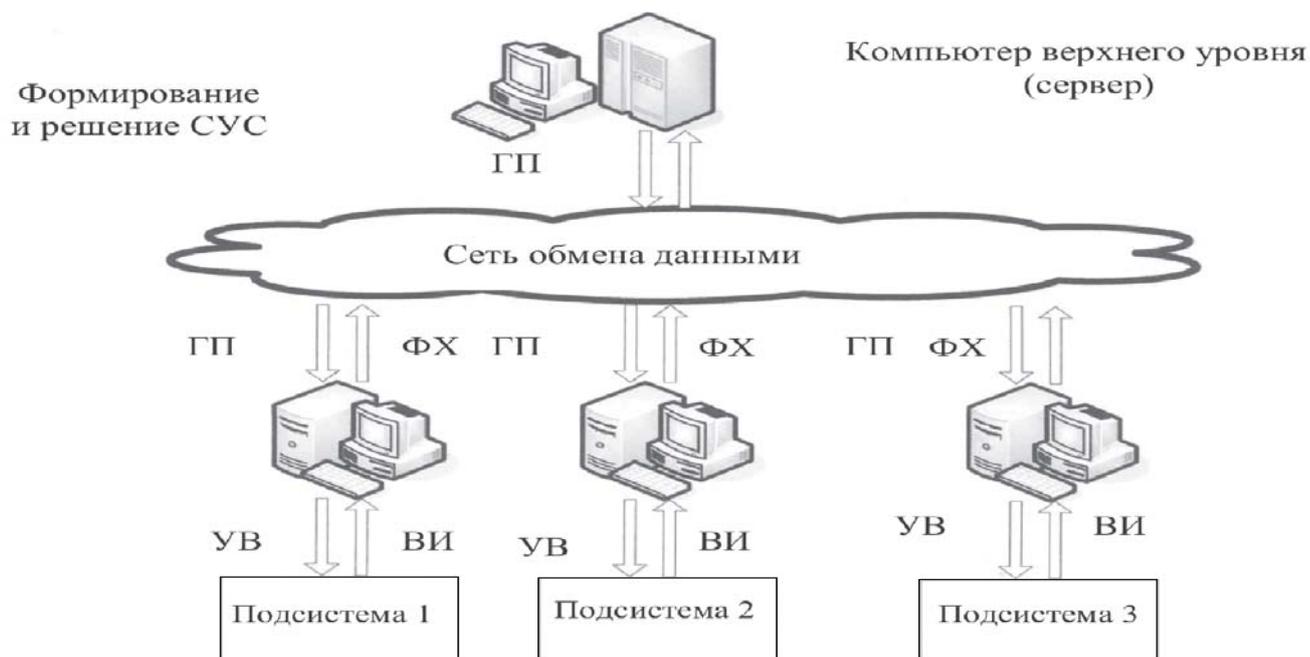


Рис. 1. Структурная схема распределенной системы расчетов, планирования и управления режимами большого энергообъединения: ГП – граничные переменные; ФХ – функциональные характеристики; УВ – управляющие воздействия; ВИ – входная информация

расчета режимов исходные данные и результаты расчета в каждой подсистеме могут быть переданы любому из участников процесса планирования. Таким образом, любой из диспетчерских центров может провести оценку корректности расчета и использовать полученные результаты для проведения собственных расчетов.

Система мониторинга и прогнозирования ЭЭС и управления ими. Временная последовательность отдельных этапов мониторинга и прогнозирования режимов и управления ими показана на рис. 2. По сути эта совокупность этапов представляет собой комплексную систему, обеспечивающую устойчивость, живучесть и управляемость современных ЭЭС, при этом с точки зрения эффективности решения этой комплексной проблемы актуальной задачей является существенное повышение адаптивности управления и расширение и углубление координации этапов, средств и систем управления режимами.

На рис. 3. показаны состояния ЭЭС и соответствующие этим состояниям блоки задач мониторинга режимов, прогнозирования режимов и управления режимами [1]. В состав блоков мониторинга и прогнозирования нормальных, предаварийных и послеаварийных режимов ЭЭС входят следующие задачи:

оценивание состояния системы;

прогнозирование параметров предстоящего режима; оно необходимо в связи с тем, что оценивание состояния дает текущую оценку режима с определенным запаздыванием (см. рис. 2), в то время как для задач мониторинга и управления требуется некоторое упреждение оценки состояния системы («управлять – значит предвидеть»), при этом для этих двух блоков задач упреждение должно быть различным;

оценка слабых мест в системе в предстоящем режиме;

оценка пропускных способностей связей в предстоящем режиме; она нужна для эффективного использования запасов в оперативном режиме и при автоматическом управлении путем соответствующих управляющих воздействий;

визуализация предстоящего режима;

определение показателей и критериев перехода из нормального в предаварийный режим и обратно, а также из послеаварийного режима в нормальный.

Перечисленные задачи имеют определенную специфику для нормальных режимов, с одной стороны, и предаварийных и послеаварийных режимов, с другой. В предаварийном и послеаварийном (при восстановлении системы) режимах требуются большее быстродействие алгоритмов и меньшие интервалы времени между отдельными состояниями, для которых решаются задачи мониторинга и управления, чем в нормальных режимах.

Отдельную проблему составляет мониторинг аварийного режима. Учитывая динамический характер аварийного режима, результаты мониторинга должны представляться диспетчеру очень оперативно, в интегрированном виде, с указанием мест в системе, опасных с точки зрения нежелательного развития аварии. Основная же информация, получаемая в результате мониторинга аварийного режима, должна поступать на автоматические средства и системы управления с целью их адаптации к текущим параметрам аварийного режима ЭЭС.

Помимо мониторинга и прогнозирования режимов, большое значение в плане повышения адаптивности управления имеет использование эффективных адаптивных методов и алгоритмов выбора мест приложения и дозировок управляющих воздействий на основе новейших достижений теории управления и искусственного интеллекта, реализуемых диспетчером и системами автоматического управления и обеспечивающих адаптацию управле-

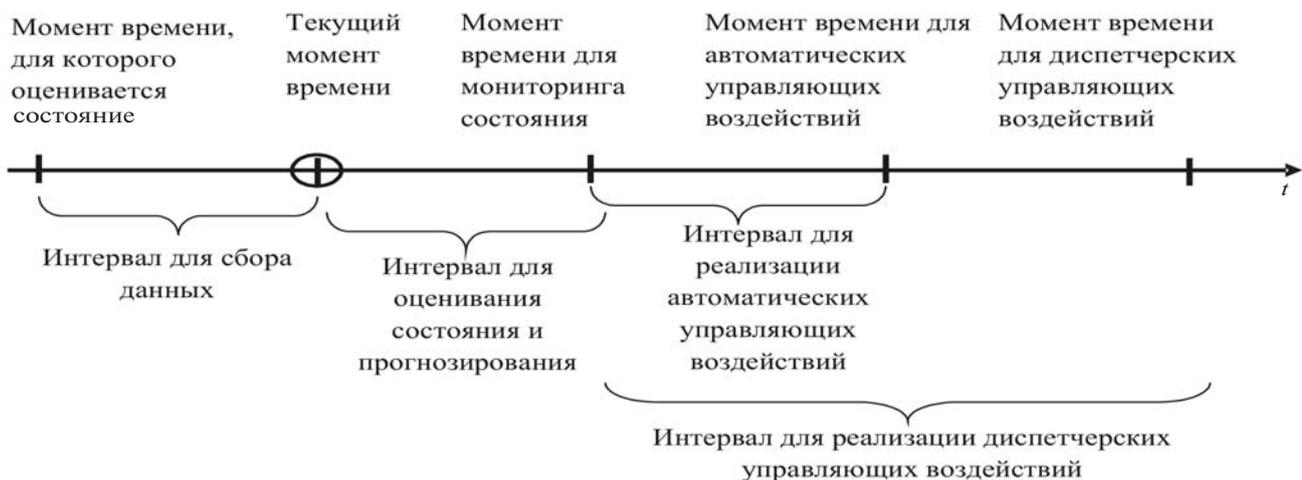


Рис. 2. Временная диаграмма событий системы мониторинга, прогнозирования и управления в ЭЭС

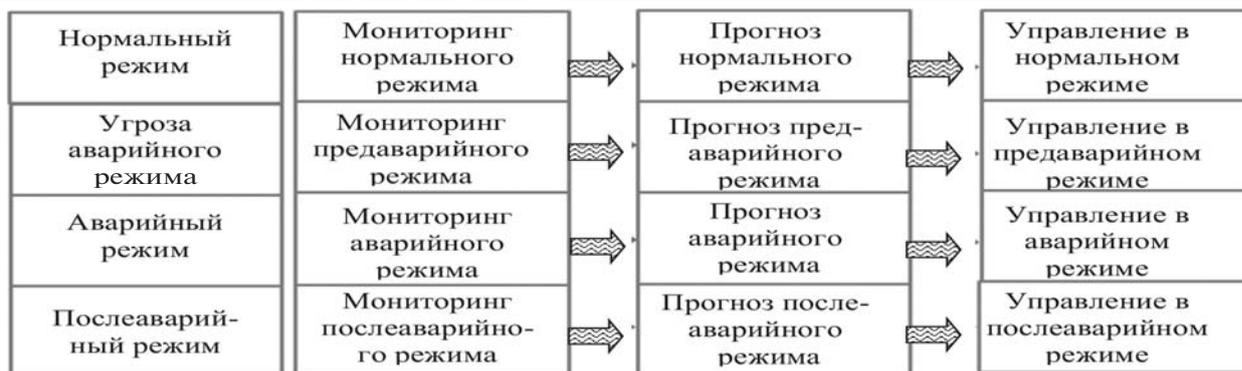


Рис. 3. Соответствие состояний ЭЭС и блоков задач мониторинга и прогнозирования режимов управления ими

ний к текущему состоянию системы и возможным возмущениям.

Существенное расширение и усиление координации управления необходимо в следующих направлениях [1].

1. Расширение координации управления режимами ЭЭС:

во временном разрезе — от координированного проектирования систем управления до реализации управляющих воздействий диспетчерскими и автоматическими средствами;

в ситуативном плане — координация оперативного диспетчерского, непрерывного автоматического и дискретного противоаварийного управления.

2. Развитие и расширение номенклатуры средств координированного управления режимами ЭЭС:

развитие традиционных средств — систем управления возбуждением и мощностью синхронных машин, противоаварийной автоматики и др.;

использование новых средств измерения и управления — PMU, FACTS, накопителей энергии и др.

3. Распространение и развитие принципов и систем координированного оперативного диспетчерского и противоаварийного управления на распределительные электрические сети, содержащие установки распределенной генерации.

4. Согласование коммерческих интересов субъектов рынков электроэнергии, мощности и системных услуг и необходимости обеспечения системой надежности и живучести ЭЭС.

5. Формирование новых критериев и разработка новых методов мониторинга и прогнозирования режимов и управления ими с целью обеспечения эффективности координированного управления для всех субъектов оптового рынка, системной надежности и живучести ЭЭС.

Международный проект ICOEUR. Этот проект [2] имеет две основные цели:

развитие методов и средств для интеллектуального и надежного мониторинга и управления большими ЭЭС и, особенно, их объединениями;

обоснование направлений технической и экономически оптимальной реализации будущего супер-энергообъединения ЭЭС Европейского Союза и России.

Относительно сформулированных главных целей проекта необходимо сделать два замечания. Первое связано с тем, что интеллектуальный мониторинг и управление означают широкое использование современных методов и средств компьютерных технологий и искусственного интеллекта для мониторинга ЭЭС и управления ими. Второе замечание определяет взаимосвязь обеих целей в том плане, что, несмотря на их равноправность, вторая цель должна реализоваться с учетом эффективности разрабатываемых методов и средств мониторинга режимов ЭЭС и управления ими. В целом в результате реализации проекта предполагается достичь определенной сопоставимости рекомендуемых методов и компьютерных средств, включая техническое оснащение, а также принципов и процедур мониторинга и управления применительно к энергообъединениям Европейского Союза и России в случае их объединения на совместную работу.

Проект ICOEUR предполагает решение следующих задач:

разработка принципов построения и структуры распределенной иерархической системы сбора и обработки данных о текущем состоянии ЭЭС с использованием традиционных средств измерения и устройств PMU и концентраторов данных (см. рис. 4);

разработка методов и программных средств для реализации распределенной иерархической системы широкомасштабного мониторинга режимов энергообъединений на основе оценивания состояния, прогнозирования и визуализации параметров режима ЭЭС;

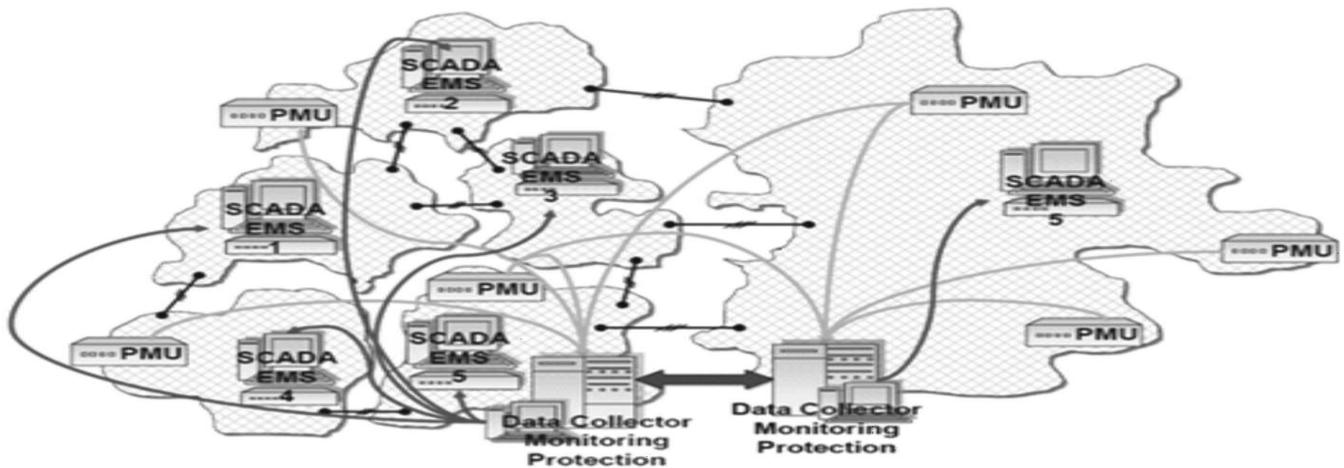


Рис. 4. Структура информационных обменов в системе актуализации данных о состоянии ЭЭС

разработка методов и программных средств для реализации распределенной иерархической системы оперативного управления режимами совместно работающих энергообъединений на базе оценивания состояния и прогнозирования параметров режима ЭЭС с использованием методов оптимизации режимов;

разработка методов и программных средств для реализации распределенной иерархической системы противоаварийного управления совместно работающими энергообъединениями на основе оценивания состояния, прогнозирования параметров режима ЭЭС, принципов адаптации и координации средств и систем противоаварийного управления;

формирование технологии скоординированного интеллектуального оперативного и противоаварийного управления совместно работающими энергообъединениями на базе распределенной иерархической системы оценивания состояния ЭЭС, прогнозирования параметров режима, оптимизации режимов системы и противоаварийного управления ЭЭС.

Реализация перечисленных задач позволит обеспечить работоспособность распределенной иерархической системы оперативного и противоаварийного управления совместно работающими энергообъединениями за счет координации и адаптивности управления на различных уровнях, повышения эффективности решения задач управления на основе использования современных методов, информационных технологий, компьютерных средств и технических решений.

Выводы. Развитие ЭЭС идет по пути их объединения на совместную работу и создания межрегиональных, межгосударственных и межконтинентальных суперэнергообъединений. Совместная работа энергообъединений, имеющих различающиеся принципы, процедуры и правила управления их режимами, требует координации управления с целью достижения эффективности функциони-

рования, системной надежности и живучести такого суперэнергообъединения. Разрабатываемая в рамках международного проекта ICOEUR технология скоординированного интеллектуального распределенного оперативного и противоаварийного управления совместно работающими энергообъединениями позволит облегчить решение рассматриваемой проблемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воропай Н.И.** Задачи повышения эффективности оперативного и противоаварийного управления электроэнергетическими системами. — Энергоэксперт, 2009, № 4.
2. **Rehtanz Ch., Voropai N.I.** Intelligent coordination of operation and emergency control of EU and Russian power grids: Key reasons and principles of ICOEUR project. — Proc. of Inter. Conf. «Liberalization and Modernization of Power Systems: Coordinated Monitoring and Control towards Smart Grids», Irkutsk (Russia), 13–17 July 2009.
3. **Суханов О.А., Шаров Ю.В.** Иерархические модели в анализе и управлении режимами электроэнергетических систем. — М.: Издат. дом МЭИ, 2007.

Авторы: Воропай Николай Иванович окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института в 1966 г. Член-корреспондент АН РФ. Директор Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ СО РАН).

Ретанц Кристиан получил в 1994 г. диплом инженера-электрика и в 1997 г. степень доктора философии в Техническом университете Дортмунда (Германия). Профессор и заведующий кафедрой электроэнергетических систем и экономики энергетики в Техническом университете Дортмунда.

Суханов Олег Алексеевич окончил Ташкентский политехнический институт в 1961 г. В 1995 г. защитил докторскую диссертацию «Метод функциональных характеристик (кибернетического моделирования) и его применение для решения электроэнергетических задач» в Научно-исследовательском институте электроэнергетики. Генеральный директор ООО «Распределенные технологии».