

## ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ РАСШИРЕНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

**Ахматжонов Жамшидбек Махаматжонович,**

Преподаватель-стажер кафедры информационных технологий Андижанского  
машиностроительного института

### АННОТАЦИЯ

*Активное продвижение цифровых технологий в энергетике требует изменения принципов построения энергосистем, а также концепции планирования их расширения. Функционирование инфраструктурных энергосистем, трансформирующихся в результате инновационного развития, принципиально невозможно без передовых информационно-коммуникационных технологий и интеллектуальных цифровых инструментов. Энергетические системы становятся сложными киберфизическими системами. В то же время обостряются проблемы кибербезопасности. Совместное функционирование нескольких типов энергосистем в виде единой интегрированной энергосистемы дает новые функциональные возможности. Использование цифровых технологий в интегрированных энергетических системах обеспечивает сбор, обработку, передачу и представление информации обо всех компонентах системы по всем аспектам интеграции. Цифровизация интегрированных энергосистем осуществляется по двум направлениям: применение цифровых технологий для отдельных подсистем с целью их управления; использование цифровых технологий для технической и технологической интеграции решений в целях обеспечения координации подсистем и реализации общесистемных целей. Внедрение цифровых технологий в интегрированные энергетические системы способствует организации гибкого, скоординированного управления планированием расширения таких систем.*

**Ключевые слова:** *Современные города, промышленные центры, развитую энергетическую инфраструктуру, естественной интеграции, информационных телекоммуникационных систем, применением цифровых технологий, Управление цифровыми, интегрированными энергетическими система.*

### ABSTRACT

*This paper reviews current progress and future challenges of digital technology applications for energy system transition in the context of net-zero. A list of case studies for such digitization enabled optimal design and operation of energy systems*

*at various temporal and spatial scales are reviewed in the paper, including model predictive control, enterprise-wide optimization, eco-industrial park data management, and smart city. The key technological innovations across these applications, such as virtual representation of physical entities, ontological knowledge base, data-driven high dimensional surrogate model based parameterization are also inspected in the paper. Future challenges in terms of data privacy and security are also discussed as potential barriers for digitalization enabled net-zero energy system transition.*

**Keywords:** *Modern cities, industrial centers, developed energy infrastructure, natural integration, information telecommunication systems, application of digital technologies, management of digital, integrated energy systems.*

Современные города и промышленные центры имеют развитую энергетическую инфраструктуру, включающую системы топливного, электро, тепло и холодоснабжения. Эти системы обладают определенной функциональной независимостью и могут взаимодействовать друг с другом в нормальных и аварийных условиях, а также на уровне взаимозаменяемости первичных энергоресурсов и использования энергоносителей. Все это свидетельствует об их естественной интеграции, которая еще более усиливается по мере формирования и развития интеллектуальных, информационных, телекоммуникационных систем. Совместно они представляют собой новую структуру, представляющую собой интегрированные энергетические системы. Эта структура сочетает в себе определенную самостоятельность систем с их согласованным участием в решении основной задачи, связанной с обеспечением социально-экономической деятельности. Качество ее решения обеспечивается применением цифровых технологий. Управление цифровыми интегрированными энергетическими системами является актуальной и сложной проблемой.

### **Характеристика исследований интегрированных энергетических систем**

Энергетические системы, прежде всего системы электро- теплоснабжения, газо- и нефтеснабжения, выполняют важную инфраструктурную функцию. Эта функция заключается в обеспечении энергоснабжения потребителей с необходимым качеством энергоносителей и надежностью. Традиционно эти системы интегрированы в производство электроэнергии и тепла на ТЭЦ, использующие газ в качестве топлива. В результате развития технологий и механизмов появилась возможность интеграции систем электро-, тепло- и

газоснабжения по уровню энергопотребления. Альтернативные возможности для потребителей – это активный выбор возможностей получения и использования энергии, например, централизованное теплоснабжение от ТЭЦ или электроотопление, электрические или газовые плиты для бытовых потребителей и т.д. В результате происходит интеграция систем энергоснабжения на уровне уровня производства и потребления энергии приводит к необходимости совместно рассматривать эти системы как интегрированные при решении задач планирования расширения и управления эксплуатацией [1-4 и др.]. Интеграция энергетических систем послужила толчком к формированию и развитию концепции энергетического хаба [5-7 и др.].

Рассматривая комплекс задач управления интегрированными энергетическими системами, целесообразно разделить эти задачи на две группы: планирование расширения интеллектуальных интегрированных энергетических систем и управление их работой.

Как показывает анализ литературы, проведенный в [4, 8], основное внимание авторов сосредоточено на задачах оперативного управления, а расчет распределения потока и его оптимизация в единой энергетической системе рассматривается как основная задача. На этой основе формулируются и решаются другие задачи управления работой единой энергосистемы, в частности, по оптимизации режимов суточной эксплуатации при их диспетчеризации, анализу надежности энергоснабжения и др. Рассматриваемая группа задач решается с учетом различных составляющих единой энергосистемы: систем электро- и теплоснабжения; системы электро-, водо- и газоснабжения; системы электро- и газоснабжения; системы электро-, тепло- и холодоснабжения; и т. д. Проведены исследования по анализу интегрированных энергетических систем с учетом активности потребителей по контролю за их энергопотреблением, использованию накопителей энергии, современных информационно-коммуникационных технологий и т. д. [9, 10]. В основном используются сетевые модели распределения потоков, в том числе с интеграцией моделей взаимосвязанных энергетических систем в общую модель [8]. Фрактальный подход к моделированию крупных интегрированных электротепловых сетей рассмотрен в [11]. Имитационная модель единой энергетической системы, основанная на концепции энергетического хаба, предложена в [12]. Для оптимизации работы используются как классические методы математического программирования, так и эволюционные алгоритмы.

Что касается методологии и задач планирования расширения интегрированных энергетических систем, то целесообразно обратить внимание, прежде всего, на обзор [13]. В данном обзоре рассматривается проблема устойчивого развития городов на основе интеграции систем энергоснабжения. В целом данная работа отражает интерпретацию традиционной методики планирования расширения энергосистем с учетом многокритериального характера задач при различных сценариях внешних условий с оптимизацией целевых показателей эффективности планирования расширения интегрированных систем энергоснабжения, сокращение вредных выбросов и поощрение использования возобновляемых источников энергии. В [14] рассмотрена задача совместного планирования расширения электро- и газотранспортных сетей при эндогенно заданных рыночных ценах на газ с учетом их волатильности из-за сетевых ограничений. В [15] предложена инновационная архитектура интеллектуальной интегрированной энергетической системы и системы ее управления, основанная на принципах ячеистой структуры, симметричных (разнонаправленных) энергетических потоках, автоматической реконфигурации сети в аварийных условиях, сетецентрической концепции контроль и саморегуляция и т.д.

Подводя итог, следует отметить, что методология и задачи планирования расширения интегрированных энергосистем проработаны существенно меньше, чем методология и задачи управления их работой.

### **Предыстория и преимущества цифровизации энергетики**

Прежде всего, необходимо дать определение понятию «цифровая энергетика». Данная концепция раскрыта в Указе Президента Российской Федерации «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации до 2024 года» № 1. № 204 от 7 мая 2018 года. В этом документе поставлена цель: «...преобразовать приоритетные отрасли экономики и социальной сферы, в том числе... энергетическую инфраструктуру за счет внедрение цифровых технологий и платформенных решений..." путем "...внедрения интеллектуальных систем управления электроэнергетическими сетями на основе цифровых технологий". Здесь стоит добавить, что сказанное относится не только к электроэнергетической системе, но и к а также к энергетическим системам в целом, это, прежде всего, системы тепло/холодоснабжения, газо- и нефтеснабжения.

Таким образом, цифровизация инфраструктурных энергосистем означает переход на цифровую базу технических средств измерения, сбора, передачи, обработки, представления информации, а также передачи и реализации

управляющих воздействий, а также использования интеллектуальных информационных технологий на всех этапах от измерения состояния переменных энергетических объектов и систем для осуществления управляющих воздействий. Необходимость цифровизации инфраструктурных энергетических систем определяется существенным ростом требований потребителей к надежности энергоснабжения и качеству энергоресурсов вследствие цифровизации и компьютеризации технологий потребительского производства. Управление работой инфраструктурных энергетических систем, трансформирующихся в результате инновационного развития, принципиально невозможно без эффективных систем управления. Эти системы реализуются с использованием передовых информационно-коммуникационных технологий и интеллектуальных инструментов на цифровой основе. Физическая и управляющая подсистемы энергосистем сопоставимы по сложности и ответственности. Энергетические системы становятся сложными киберфизическими системами. Объективные тенденции изменения структуры и свойств будущих энергетических систем усложняют условия их управляемости, что показано в [16] на примере электроэнергетических систем.

Активно развивается цифровизация инфраструктурных энергосистем. Есть многочисленные примеры успешного внедрения интеллектуальных цифровых технологий в системах электро-, тепло- и газоснабжения.

Определены преимущества цифровизации энергетики следующими утверждениями:

- значительное улучшение надежности энергоснабжения и качества энергии и энергетических услуг,
- радикальное изменение парадигмы взаимоотношений между заинтересованными сторонами в сфере энергоснабжения на основе принципов Интернета энергетики,
- реализация масштабного экономического эффекта для всех заинтересованных сторон,
- повышение эффективности решений и работы персонала компании.

### **Особенности цифровизации интегрированных энергосистем**

Внедрение цифровых технологий в интегрированные энергосистемы позволяет организовать гибкое скоординированное управление планированием расширения таких систем. Концептуально интеграция осуществляется в следующих трёх аспектах [8]:

- системный аспект, представляющий интеграцию систем различных типов, включая системы электричества,

тепло/холодо и газоснабжение, в каждом случае могут быть объединены все или отдельные виды;

- аспект пространственного масштаба, отражающий размер систем с дифференциация на супер-, мини-, микросистемы;
- функциональный аспект, определяющий вид деятельности системы (ее назначение), в том числе: энергетический (технологический); связь и управление; принимая решения.

Рассмотрим цифровизацию интегрированных энергосистем в соответствии с отмеченными аспектами. Использование цифровых технологий обеспечивает сбор, передачу, обработку и получение информации в режиме реального времени обо всех составляющих компонентах единой энергетической системы применительно ко всем аспектам интеграции. Интегрированные энергетические системы состоят из различных типов систем энергоснабжения, которые являются подсистемами интегрированных систем. Каждая из подсистем содержит свой набор элементов. Эти элементы можно сгруппировать по следующим выполняемым энергетическим функциям: генерация, транспорт, распределение и потребление. В свою очередь, каждый элемент имеет свой комплект оборудования в соответствии с выполняемыми энергетическими функциями и принадлежностью к типу системы энергоснабжения.

Цифровизация обеспечивается внедрением цифровых технологий для всех подсистем, их набора элементов и оборудования. Это соответствует цифровизации отдельных энергосистем. При этом существуют особенности цифровизации при совместном рассмотрении систем различного типа в рамках интегрированных энергетических систем. Эти особенности связаны с техническими и технологическими решениями по интеграции, поэтому цифровизацию интегрированных энергосистем можно рассматривать по двум направлениям:

- применение цифровых технологий для отдельных подсистем с целью их управления;
- использование цифровых технологий для технических и технологических решений по интеграции с целью обеспечения координации подсистем и реализации общесистемных целей.

Использование цифровых технологий также позволяет интегрировать системы различного размера. Это соответствует пространственно-масштабному аспекту интеграции (рис. 1) и осуществляется путем агрегирования информации по отдельным системам меньшего масштаба и представления ее

для координации более крупных систем или, наоборот, дезагрегирования ее для координации работы крупных систем с более мелкие системы.

Реализация интеграции в функциональном аспекте зависит от полноты, качества и актуальность информации. Такую информацию можно получить только благодаря внедрению современных цифровых технологий. При этом обостряются проблемы кибербезопасности [17, 18].

Комплекс по цифровизации КЭС включает в себя следующие компоненты:

- Цифровые устройства.
- Цифровые модели.
- Методологическое обеспечение цифрового моделирования.
- Коммуникационные технологии.
- Информационные и интеллектуальные технологии.

Цифровые устройства обеспечат адаптивное управление и защиту, полный мониторинг всех элементов системы энергоснабжения, распределенную оценку состояния. Получение, обработка и представление информации осуществляется на основе цифровых технологий.

Цифровое моделирование предполагает разработку цифровых моделей и решение комплекса задач управления на основе этих моделей с использованием соответствующего методического обеспечения. Модель IES представляет собой набор структур данных, описывающих конфигурацию системы, состав ее оборудования и его характеристики, состояние элементов и их свойства. Системы энергоснабжения различных типов, входящие в состав ИЭС, имеют общие структурно-топологические свойства и физические законы транспорта энергии, что позволяет сформулировать следующие общие положения для разработки моделей ИЭС:

- Моделирование ИЭС в виде графа, вершины которого соответствуют узлам (источникам, узлам присоединения, потребителям), а дуги соответствуют ветвям (трубопроводам, линиям электропередачи и т.п.).

- Представление компьютерной модели ИЭС в виде набора графов, описывающих конфигурацию этой системы, и набора графических и математических моделей, описывающих свойства ее элементов.

- Иерархическое построение модели ИЭС обеспечивается формированием отдельных схем элементов и подсистем, вложенных в несколько уровней иерархии.

Методическое обеспечение цифрового моделирования ИЭС имеет общность концептуальных и математических положений, а методы, алгоритмы и специализированное программное обеспечение, используемые для решения

задач, могут быть универсальными. При этом различные типы систем энергоснабжения имеют свои индивидуальные особенности, которые необходимо учитывать при их цифровом моделировании в рамках ИЭС. Например, в отличие от других крупных энергетических систем и крупных трубопроводных систем, работа систем теплоснабжения характеризуется двумя различными по своей физической сущности параметрами: динамическими изменениями расхода и температуры, сильно отличающимися друг от друга. Скорость потока в сети существенно меняется без инерции. Процесс распространения температурной волны по тепловой сети, который определяется скоростью потока теплоносителя, может длиться часами.

Моделирование ИЭС как новых объектов исследования с соответствующими новыми свойствами и особенностями вызывает, прежде всего, проблемы:

- Согласование общей цели с целями нескольких систем.
- Межсистемное распределение и множество центров принятия решений.
- Разработка и внедрение оптимального стратегии в целом и для систем в частности.
- Разрешение межсистемных конфликтов.
- Согласование интересов поставщиков и потребителей.
- Координация работы нескольких центров принятия решений.

• Сопряжение иерархических уровней в каждой системе и горизонтальные связи между отдельными системами. Коммуникационные технологии. Для обеспечения обмена информацией в ИЭС и управления ею предусмотрены цифровые сети связи и интерфейсы обмена данными. Одной из важнейших целей является обеспечение постоянного контролируемого баланса между спросом и предложением энергоресурсов. Для этого элементы сети должны постоянно обмениваться друг с другом информацией о параметрах, количестве потребляемой энергии и плановом энергопотреблении, а также различной коммерческой информацией.

Информационные и интеллектуальные технологии. Большой размер ИЭС и вычислительная сложность моделей, методов и алгоритмов не позволяют исследовать эти системы без использования специализированного программного обеспечения. Информационные и интеллектуальные технологии должны обеспечить решение всех задач планирования развертывания и управления работой КЭС в рамках единого информационного пространства. На рис. 2 представлена архитектура информационно-коммуникационной



платформы исследований ИЭС [19], разработанной в ИУИ СО РАН для создания единого информационного пространства.

Создание цифровых интегрированных энергетических систем требует не только внедрения цифровых технологий в существующие системы энергоснабжения, но и перехода от их жесткой существующей иерархической структуры «генерация – сети – потребители» к более гибкой, в которой каждый узел системы может быть активным элементом. Новый дизайн системы должен сочетать в себе определенную независимость многих центров принятия решений и их координацию для обеспечения устойчивого энергоснабжения потребителей.

Создание на базе нескольких отдельно функционирующих моносистем (электро-, тепло-, холодо-, газоснабжения и других) новой энерготехнологической структуры в виде единой энергосистемы существенно расширяет их функциональные возможности, обеспечивает взаимозаменяемость энергоносителей и реализует синергетический эффект для обеспечения надежного, безопасного, экономичного и экологически чистого энергоснабжения. Технологическая трансформация энергосистем становится возможной благодаря активному развитию современных цифровых технологий, телекоммуникационных и информационных систем и их взаимопроникновению, что позволяет формировать гибкое интеллектуальное планирование расширения и управления работой КЭС, координацию отдельных подсистем и реализацию общесистемных целей. Это приводит к появлению новых задач управления такими системами и необходимости разработки методов их решения, изучения свойств, тенденций и особенностей развития.

Работа выполнена в рамках научного проекта III.17.4.1 (№ АААА-А17-117030310432-9) программы фундаментальных исследований Сибирского отделения РАН.

### **ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)**

1. M. Geidl, IEEE Transactions on Power Systems, 22, 145-155 (2007)
2. A. Vasebi, M. Fesanghary, M.T. Bathaee, Electrical Power and Energy Systems, 29, 713-719 (2007)
3. Z. Li, Z. Huo, H. Yin, Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (IEEE, Wuhan, 2011)
4. N.I. Voropai, V.A. Stennikov, Izvestiya RAN. Energetika, 64-73, (2014) (in Russian)
5. M. Geidl, G. Andersson, European Transactions on Electrical Power, 16, 463-477 (2006)

6. M. Geidl, G. Koeppel, P. Favre-Perrod, B. Klockl, G. Andersson, K. Frohlich, IEEE Power and Energy Magazine, 5, 24-30 (2007)
7. M. Almassalkhi, I. Hiskens, 17th Power System Computation Conference (Stockholm, 2011)
8. N.I. Voropai, V.A. Stennikov, E.A. Barakhtenko, O.N. Voitov, I.V. Postnikov, Energy Systems Research, 1, 57-66 (2018)
9. J. Momoh, Smart Grid: Fundamentals of design and analysis (2012)
10. S. Le Blond, T. Lewis, M. Sooriyabandara, 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (IEEE, Manchester, 2011)
11. P. Mancarella, Chin Kim Gan, G. Strbac, 17th Power System Computation Conference (Stockholm, 2011)
12. N.I. Voropai, E.V. Ukolova, D.O. Gerasimov, K.V. Suslov, P. Lombardi, P. Komarnicki, Vestnik IrGTU, 22, 157-168 (2018) (in Russian)
13. I. van Beuzekom, M. Gibescu, J.G. Slootweg, 2015 IEEE Eindhoven PowerTech (IEEE, Eindhoven, 2015)
14. R. Bent, S. Blumsack, P. Van Hentenryck, C. Borraz-Sánchez, M. Shahriari, IEEE Transactions on Power Systems, 33, 6397-6409 (2018)
15. N.I. Voropai, V.A. Stennikov, E.A. Barakhtenko, Studies on Russian Economic Development, 28, 492-499 (2017)
16. N.I. Voropai, A.B. Osak, Energeticheskaya politika, 60-63 (2014) (in Russian)
17. N.I. Voropai, I.N. Kolosok, E.S. Korkina, A.B. Osak, Proceedings of the 10th International Conference "Electric Power Through the Eyes of Youth-2019" (Samara, 2019)
18. L. Massel, N. Voropay, S. Senderov, A. Massel. Voprosy kiberbezopasnosti, 2-10 (2016)
19. Barakhtenko E., Sokolov D., 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (IEEE, Vladivostok, 2019)