



СИСТЕМНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ
В ЭНЕРГЕТИКЕ:
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПЕРЕХОД

ИНСТИТУТ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ им. Л.А. МЕЛЕНТЬЕВА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



Академик Лев Александрович Мелентьев

**SYSTEMS STUDIES IN ENERGY:
ENERGY TRANSITION**

Edited by:
N.I. Voropai, corresponding member of RAS
A.A. Makarov, academician of RAS

**СИСТЕМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ:
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПЕРЕХОД**

Ответственные редакторы:
член-корр. РАН Н.И. Воропай
академик РАН А.А. Макаров

УДК 620.09
ББК 31
С 40

Рецензенты:

доктор технических наук
С.В. Солодуша

доктор технических наук
К.В. Сулов

доктор технических наук
Э.А. Тюрина

Системные исследования в энергетике: энергетический переход / Под ред. Н.И. Воропая и А.А. Макарова. — ИСЭМ СО РАН, 2021. — 594 с.

Приведены результаты системных исследований в энергетике, включающих в себя разработку методологии и инструментария изучения энергетики как совокупности сложно организованных систем и прогнозирования развития энергетики мира и России в условиях энергетического перехода. В основу книги легли материалы IX Мелентьевских чтений, состоявшихся 21-23 сентября 2021 г. в Иркутске, посвященных 90-летию со дня рождения ученика Л.А. Мелентьева – академика Ю.Н. Руденко.

Книга предназначена для научных работников, аспирантов, специалистов, занимающихся стратегическим планированием, экономико-математическим моделированием, а также прогнозированием развития российской и мировой энергетики и ее отраслевых комплексов.

The book presents results of systems studies in energy, including the development of methodology and tools to aid the study of the energy sector as a set of intricately organized systems and to facilitate projections of energy development in the world and Russia in the context of the energy transition. The book is based on the proceedings of the IX Melentiev Readings dedicated to the 90th anniversary of Academician Yu.N. Rudenko, a student of L.A. Melentiev (September 21-23, 2021, Irkutsk).

The intended readership of the book spans researchers, graduate students, and experts involved in strategic planning, economic and mathematical modeling, as well as projecting the development of Russian and global energy sector and its individual industries.

ISBN 978-5-93908-153-5

© ИСЭМ СО РАН, 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	13
ГЛАВА 1. МЕТОДОЛОГИЯ СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В УСЛОВИЯХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДА	15
1.1. Достижения и проблемы системных исследований развития энергетики России, их возможности в «цифровом» обществе	15
<i>Макаров А.А.</i>	
1.2. Инновационно-технологические и структурно-организационные трансформации электроэнергетических систем	24
<i>Воропай Н.И., Ефимов Д.Н., Подковальников С.В.</i>	
1.3. Методы моделирования трансформации нефтегазового сектора в условиях энергетического перехода	49
<i>Крюков В.А., Миляев Д.В., Душенин Д.И., Скузоватов М.Ю.</i>	
1.4. Энергопереход к середине текущего века: мечты или реальность? ...	58
<i>Мастепанов А.М.</i>	
1.5. Прогнозирование технологического развития энергетики: вопросы методологии и практика	70
<i>Филиппов С.П.</i>	
1.6. Углеродное регулирование и его значение для ТЭК России	90
<i>Кейко А.В.</i>	
1.7. Применение финансово-экономических моделей для исследования параметров ценовой политики в электроэнергетике при разных механизмах углеродного регулирования	107
<i>Веселов Ф.В., Соляник А.И.</i>	
1.8. Оценка и учет в прогнозных исследованиях экономического и экологического аспекта энергетической безопасности	120
<i>Кононов Ю.Д., Кононов Д.Ю.</i>	
1.9. Макроэкономическая оценка последствий реализации отдельных стратегических угроз энергетической безопасности	131
<i>Локтионов В.И., Мазурова О.В.</i>	
1.10. Развитие методологии оценки энергетических рынков стран Восточной Азии с учётом парадигмы "ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДА"	141
<i>Попов С.П., Максакова Д.В.</i>	
1.11. Методы и модели для прогнозирования развития региональных ТЭК	156
<i>Санеев Б.Г., Соколов А.Д., Музычук С.Ю., Музычук Р.И.</i>	
1.12. Научно-методическое обеспечение для моделирования и оптимизации рынков тепловой энергии	162
<i>Стенников В.А., Хамисов О.В., Пеньковский А.В.</i>	

1.13. Интегрированная онтология электро- и теплоснабжения для цифровых двойников активных распределительных сетей.....	179
<i>Ковалёв С.П., Лукинова О.В.</i>	
1.14. Методы комплексного развития теплоснабжающих систем.....	190
<i>Стенников В.А., Постников И.В., Пеньковский А.В., Медникова Е.Е.</i>	
1.15. Многоуровневое моделирование тепловых сетей при их проектировании	207
<i>Стенников В.А., Соколов Д.В., Барахтенко Е.А.</i>	
1.16. Агрегированная модель долгосрочного прогнозирования регионального электропотребления.....	220
<i>Корнеев А.Г.</i>	
ГЛАВА 2. СИСТЕМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИКИ СТРАНЫ И МИРА.....	231
2.1. Особенности седьмого энергоперехода и его развилки и взаимоприемлемые внешнеэкономические решения для России ...	231
<i>Конопляник А.А.</i>	
2.2. Научометрический анализ исследований энергетического перехода в международной исследовательской повестке	253
<i>Михеев А.В.</i>	
2.3. Оценка углеродного следа российского экспорта	266
<i>Филиппов С.П., Григорьева Н.А., Дильман М.Д.</i>	
2.4. Моделирование рынка водорода <i>Грушевенко Д.А., Галкина А.А., Кулагин В.А.</i>	279
2.5. Моделирование энергопотребления транспортного сектора	293
<i>Грушевенко Д.А., Капустин Н.О.</i>	
2.6. Основные направления трансформации угроз энергетической безопасности России и анализ их влияния на возможности удовлетворения перспективного спроса на первичные энергоресурсы	305
<i>Сендеров С.М., Рабчук В.И.</i>	
2.7. Формирование восточной энергетической политики России: прошлое, настоящее, взгляд в будущее	317
<i>Санеев Б.Г.</i>	
2.8. Развитие ВИЭ на Дальнем Востоке: оценка последствий для потребителей.....	331
<i>Дёмина О.В., Найден С.Н.</i>	
2.9. Факторы, влияющие на новую энергетическую стратегию Республики Саха (Якутия)	348
<i>Петров Н.А., Лепов В.В., Павлов Н.В., Павлова Н.Н.</i>	

2.10.	Оценка влияния ограничений на выбросы парниковых газов (CO ₂) на инновационное развитие ТЭС по регионам России (методический подход, результаты исследований)	364
	<i>Санеев Б.Г., Лагерев А.В., Ханаева В.Н.</i>	
2.11.	Корпоративное управление в генерирующих компаниях электроэнергетики: лидеры и аутсайдеры	374
	<i>Шевелева Г.И.</i>	
2.12.	Исследования развития угольной промышленности страны и регионов: методология и инструментарий	386
	<i>Такайшвили Л.Н., Соколов А.Д.</i>	
2.13.	Системный анализ возможностей использования новых материалов и технологий в энергетике и отраслях промышленности Российского Севера и Арктики	399
	<i>Лепов В.В., Петров Н.А., Павлов Н.В.</i>	
ГЛАВА 3. ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ		414
3.1.	Современные вызовы трансформации систем энергетики.....	414
	<i>Стенников В.А.</i>	
3.2.	Трансформация мировых энергетических рынков в условиях энергетического перехода	427
	<i>Кулагин В.А.</i>	
3.3.	Рынки электрической и тепловой энергии в современных условиях России. Проблемы функционирования и перспективы их развития	439
	<i>Стенников В.А., Головщиков В.О., Паламарчук С.И.</i>	
3.4.	Исследование масштабов и интегральных энергоэкономических характеристик низкоуглеродной технологической перестройки электроэнергетики до 2050 года	450
	<i>Хоршев А.А., Веселов Ф.В.</i>	
3.5.	Влияние процесса трансформации электроэнергетических систем на обеспечение их надёжности	466
	<i>Крупенёв Д.С.</i>	
3.6.	Системные исследования диверсификации энергоснабжения в Восточных регионах Российской Арктики.....	481
	<i>Иванова И.Ю., Ижбулдин А.К., Тугузова Т.Ф., Шакиров В.А.</i>	
3.7.	Влияние водородной энергетики на развитие угольной промышленности мира и России	494
	<i>Плакиткина Л.С.</i>	
3.8.	Электропередачи постоянного тока в условиях перехода к возобновляемой энергетике	505
	<i>Герасимов А.С., Кощев Л.А., Лисицын А.А.</i>	

3.9. Совершенствование подходов к привлечению частных инвестиций в автономную генерацию Восточных и Арктических территорий страны	513
<i>Гулидов Р.В., Копылов А.Е., Виханский А.Э.</i>	
3.10. Эколого-экономическое обоснование перехода на альтернативные энергоносители в зонах особого природопользования: методический подход и результаты исследований.....	523
<i>Иванова И.Ю., Ижбулдин А.К., Майсюк Е.П., Губий Е.В.</i>	
3.11. Оценка долгосрочных макроэкономических потерь России от ускоренной трансформации мировой энергетики	534
<i>Малахов В.А., Несытых К.В.</i>	
3.12. Разработка интеллектуальных систем управления режимами микросетей и активных энергетических комплексов на базе современных методов оптимизации и машинного обучения	549
<i>Томин Н.В., Шакиров В.А., Козлов А.Н., Курбацкий В.Г., Сидоров Д.Н.</i>	
3.13. Оптимизация параметров теплоэнергетических установок различных типов с использованием эффективного метода ступенчатой оптимизации.....	568
<i>Клер А.М., Жарков П.В., Потанина Ю.М., Степанова Е.Л., Епишкин Н.О.</i>	
Заключение.....	590

CONTENTS

Introduction	13
CHAPTER 1. METHODOLOGY OF SYSTEMS RESEARCH IN THE CONTEXT OF THE ENERGY TRANSITION	15
1.1. Achievements and challenges of systems studies in the development of Russia's energy sector and their opportunities in the "digital" society	15
<i>A.A. Makarov</i>	
1.2. Innovative-technological and structural-organizational transformations of electric power systems	24
<i>N.I. Voropai, D.N. Efimov, S.V. Podkovaalnikov</i>	
1.3. Methods for modeling the transformation of the oil and gas sector in the context of the energy transition	49
<i>V.A. Kryukov, D.V. Milyaev, D.I. Dushenin, M.Yu. Skuzovatov</i>	
1.4. Completing the energy transition by the middle of the present century: a dream or reality?	58
<i>A.M. Mastepanov</i>	
1.5. Forecasting the technological development of the energy industry: issues of methodology and practice	70
<i>S.P. Filippov</i>	
1.6. Carbon regulation and its significance for the energy sector of Russia	90
<i>A.V. Keiko</i>	
1.7. Application of financial and economic models to studying parameters of pricing policy in the electric power industry under various carbon regulation mechanisms	107
<i>F.V. Veselov, A.I. Solyanik</i>	
1.8. Assessment and consideration of the economic and environmental aspects of energy security in projection studies	120
<i>Yu.D. Kononov, D.Yu. Kononov</i>	
1.9. Macroeconomic assessment of the consequences of some strategic threats to the energy security	131
<i>V.I. Loktionov, O.V. Mazurova</i>	
1.10. Development of a methodology for estimating energy markets in East Asian countries in light of the "ENERGY TRANSITION" paradigm	141
<i>S.P. Popov, D.V. Maksakova D.V.</i>	
1.11. Methods and models for projections of the regional energy development.	156
<i>B.G. Saneev, A.D. Sokolov, S.Yu. Muzychuk, R.I. Muzychuk</i>	

1.12. Scientific and methodological support for modeling and optimization of thermal energy markets	162
<i>V.A. Stennikov, O.V. Khamisov, A.V. Penkovsky</i>	
1.13. Integrated ontology of power and heat supply for digital twins of active distribution networks	179
<i>S.P. Kovalev, O.V. Lukinova</i>	
1.14. Methods for comprehensive development of heating systems	190
<i>V.A. Stennikov, I.V. Postnikov, A.V. Penkovsky, E.E. Mednikova</i>	
1.15. Multi-level modeling of heat networks for their design	207
<i>V.A. Stennikov, D.V. Sokolov, E.A. Barakhtenko</i>	
1.16. An aggregated model for long-term projection of regional electricity consumption	220
<i>A.G. Korneev</i>	
CHAPTER 2. SYSTEMS RESEARCH OF THE NATIONAL AND GLOBAL ENERGY INDUSTRY	231
2.1. Key aspects of the seventh energy transition and its point of divergence, and mutually acceptable international economic solutions for Russia	231
<i>A.A. Konoplyanik</i>	
2.2. A scientometric analysis of energy transition studies in the international research agenda	253
<i>A.V. Mikheev</i>	
2.3. Evaluation of the carbon footprint of Russian exports	266
<i>S.P. Filippov, N.A. Grigorieva, M.D. Dilman</i>	
2.4. Hydrogen market modeling	279
<i>D.A. Grushevenko, A.A. Galkina, V.A. Kulagin</i>	
2.5. Modeling of energy consumption in the transport sector	293
<i>D.A. Grushevenko, N.O. Kapustin</i>	
2.6. The main directions of the transformation of threats to Russia's energy security and analysis of their impact on the ability to meet the prospective demand for primary energy resources	305
<i>S.M. Senderov, V.I. Rabchuk</i>	
2.7. Formulation of Russia's Eastern energy policy: past, present, and future outlook	317
<i>B.G. Saneev</i>	
2.8. Development of RES in the Far East: assessment of implications for consumers	329
<i>O.V. Demina, S.N. Naiden</i>	
2.9. Factors influencing the new energy strategy of the Republic of Sakha (Yakutia)	348
<i>N.A. Petrov, V.V. Lepov, N.V. Pavlov, N.N. Pavlova</i>	

2.10.	Assessment of impact of greenhouse gas (CO ₂) emission restrictions on the innovative development of thermal power plants for the regions of Russia (a methodological approach and research findings)	364
	<i>B.G. Saneev, A.V. Lagerev, V.N. Khanaeva</i>	
2.11.	Corporate governance in power generation companies: leaders and outsiders.....	374
	<i>G.I. Sheveleva</i>	
2.12.	Research into national and regional coal industry development: methodology and tools	386
	<i>L.N. Takaishvili, A.D. Sokolov</i>	
2.13.	Systems analysis of opportunities for the use of new materials and technologies in the energy industry and manufacturing sectors of the Russian North and the Arctic	399
	<i>V.V. Lepov, N.A. Petrov, N.V. Pavlov</i>	
CHAPTER 3. TRANSFORMATION OF ENERGY SYSTEMS		414
3.1.	Contemporary challenges of the transformation of energy systems ..	414
	<i>V.A. Stennikov</i>	
3.2.	Transformation of world energy markets in the context of the energy transition.....	427
	<i>V.A. Kulagin</i>	
3.3.	Electricity and heat markets in today's Russia. Problems of operation and prospects for their development	439
	<i>V.A. Stennikov, V.O. Golovshchikov, S.I. Palamarchuk</i>	
3.4.	Study of the scale and integral energy and economic properties of low-carbon technological restructuring of the electric power industry to 2050	450
	<i>A.A. Khorshev, F.V. Veselov</i>	
3.5.	Effect of the transformation process of electric power systems on their reliability	466
	<i>D.S. Krupenev</i>	
3.6.	Systems research of energy supply diversification in Eastern regions of the Russian Arctic	481
	<i>I.Yu. Ivanova, A.K. Izbuldin, T.F. Tuguzova, V.A. Shakirov</i>	
3.7.	Impact of hydrogen energy on development of the coal industry of the world and Russia	494
	<i>L.S. Plakitkina</i>	
3.8.	DC power transmission lines in transition to renewable energy	505
	<i>A.S. Gerasimov, L.A. Koshcheev, A.A. Lisitsyn</i>	
3.9.	Advancement of approaches to attracting private investment in stand-alone generation in the Eastern and Arctic areas of the country	513
	<i>R.V. Gulidov, A.E. Kopylov, A.E. Vikhansky</i>	

3.10. Environmental and economic justification of the transition to alternative energy carriers in special nature management areas: methodological approach and research findings	523
<i>I.Yu. Ivanova, A.K. Izbuldin, E.P. Maysyuk, E.V. Gubiy</i>	
3.11. Estimation of Russia's long-term macroeconomic losses caused by accelerated transformation of the global energy	534
<i>V.A. Malakhov, K.V. Nesytykh</i>	
3.12. Development of intelligent control systems for microgrids and active energy complexes on the basis of state-of-the-art optimization and machine learning methods.....	549
<i>N.V. Tomin, V.A. Shakirov, A.N. Kozlov, V.G. Kurbatsky, D.N. Sidorov</i>	
3.13. Parameter optimization of co-generation plants of different types by the efficient step-wise optimization method	568
<i>A.M. Kler, P.V. Zharkov, Yu.M. Potanina, E.L. Stepanova, N.O. Epishkin</i>	
Conclusion	590

ВВЕДЕНИЕ

С начала 2000-х гг. при содействии ИСЭМ СО РАН и ИНЭИ РАН регулярно проводятся научные конференции – Мелентьевские теоретические чтения, на которых обсуждаются методологические аспекты, инструменты и результаты системных исследований в энергетике и их применение для решения актуальных задач.

21-23 сентября 2021 г. в г. Иркутске состоялись IX Мелентьевские теоретические чтения "Системные исследования энергетического перехода в России и мире", в которых приняли участие представители ИНЭИ РАН (Москва), ИСЭМ СО РАН (Иркутск), ИВТ РАН (Москва), ИЭОПП СО РАН (Новосибирск), ИПУ РАН (Москва), ООО "Газпром экспорт" (Москва) и др. Участники мероприятия отметили широту тематики и разнообразие мнений в представленных докладах, новизну и актуальность ряда исследований, а также научно-практическую значимость "Мелентьевских теоретических чтений", организуемых поочередно ИНЭИ РАН и ИСЭМ СО РАН.

В книге приведены новые результаты системных исследований в энергетике: развитие методологии и инструментов изучения энергетики как совокупности сложно организованных развивающихся систем и их применение в задачах управления, проектирования и прогнозирования развития энергетики мира, России, её регионов и городов в условиях начавшегося энергетического перехода к низкоуглеродной энергетике. Статьи подготовлены участниками IX Мелентьевских теоретических чтений на основе сделанных докладов, а также выполненных в 2019-2021 гг. фундаментальных и прикладных работ.

В разделе 1 «Методология системных исследований в условиях энергетического перехода» проанализированы достижения и проблемы системных исследований развития энергетики в России, их возможности в «цифровом» обществе, реалистичность энергоперехода к середине XXI века, пути трансформации электроэнергетики и нефтегазового сектора России. Показано значение углеродного регулирования для развития энергетики и ценовой политики в электроэнергетике, его роль в аспекте энергетической безопасности с макроэкономической оценкой её угроз. Обобщены методы, модели и опыт прогнозирования развития региональных топливно-энергетических комплексов Сибири. В четырёх статьях обсуждаются методы и результаты оптимизации рынков тепловой энергии, комплексного развития теплоснабжающих систем, моделирования тепловых сетей при их проектировании и при создании цифровых двойников активных распределительных сетей.

В разделе 2 «Системные исследования развития энергетики страны и мира» рассмотрены особенности энергетического перехода, его развилки, взаимоприемлемые внешнеэкономические решения для России, концепция водородного сотрудничества и неполнота действующих оценок выбросов парниковых газов при производстве продукции. Развиваются идеи энергоинформационного космизма России и выявления глобальных закономерностей развития энергетики с оценкой их влияния на

технологическое развитие мировой экономики. Показана трансформация в новых условиях наиболее значимых угроз энергетической безопасности, возможного развития энергетики в период до 2035 г. и восточной энергетической политики России.

В разделе 3 «Трансформация энергетических систем» обсуждаются современные вызовы трансформации систем энергетики и мировых энергетических рынков, включая рынки электрической и тепловой энергии в современных условиях России, в процессе энергетического перехода. Рассматриваются оценки долгосрочных макроэкономических потерь России от ускоренной трансформации мировой энергетики, а также влияние трансформации энергетических систем на обеспечение их надежности. Даются результаты исследований масштабов и интегральных энерго-экономических характеристик низко-углеродной технологической перестройки электроэнергетики до 2050 г. Рассматриваются системные исследования диверсификации энергоснабжения в восточных регионах России. Анализируется влияние водородной энергетики на развитие угольной промышленности мира и России, а также роль электропередач постоянного тока в условиях перехода к возобновляемой энергетике. Рассматриваются проблемы привлечения частных инвестиций в автономную генерацию северных и арктических регионов страны и эколого-экономическое обоснование перехода на альтернативные энергоносители в зонах особого природопользования. Приведены результаты разработки интеллектуальных систем управления режимами микросетей и активных энергетических комплексов на базе методов оптимизации и машинного обучения.

Необходимо отметить, что рассматриваемые в книге результаты системных исследований в энергетике получены в условиях быстрых и радикальных трансформаций структуры и свойств систем энергетики под влиянием активного внедрения инновационных технологий в производство, передачу, распределение, хранение и потребление энергоресурсов, а также в информационно-коммуникационно-управляющих подсистемах современных систем энергетики. Это обстоятельство потребовало пересмотра, уточнения и модернизации, разработки новых соответствующих моделей и методов исследований для решения новых задач с использованием методологии системных исследований в энергетике. В книге приведены результаты решения некоторых таких задач. Однако это направление методологии системных исследований в энергетике еще требует своего развития, формализации постановок задач, разработки моделей и методов решения соответствующих задач управления развитием и режимами трансформирующихся систем энергетики и топливно-энергетического комплекса.

Книга предназначена для научных работников, аспирантов, специалистов, занимающихся системными исследованиями в энергетике: стратегическим планированием, экономико-математическим моделированием, а также прогнозированием развития российской и мировой энергетики и ее отраслевых комплексов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Глобальные тренды, происходящие в мире, существенным образом влияют на развитие и функционирование топливно-энергетического комплекса (ТЭК) и входящих в него систем энергетики, на системы управления ими и во многом обуславливают энергетический переход. В этих условиях важнейшей задачей настоящего и будущего развития и функционирования отечественных и мировых ТЭК и систем энергетики представляется сохранение устойчивости их функционирования и стабильной работы, обеспечивающих социально-экономический рост и энергетическую безопасность страны. Это выражается в удовлетворении растущих потребностей в экономически эффективных и экологически «чистых» энергетических ресурсах, доступность которых постоянно снижается из-за роста цен, невозможности воспроизводства многих их видов, негативного влияния на окружающую среду, происходящих изменений в социальной и политической сферах деятельности. В связи с этим достаточно активно пересматриваются используемые решения и ставится вопрос о развитии и применении новых энергетических технологий производства, транспорта, аккумулирования, распределения и потребления энергетических ресурсов. Этому же способствует усложнение структуры систем энергетики, передающих большие потоки энергии, усиление горизонтальных связей, необходимость совмещения территориально-технологического и временного аспектов управления, которые приводят к активному внедрению цифровых, информационно-коммуникационных и управляющих технологий, Интернета вещей. В результате они становятся человеко-машинными (киберфизическими) системами, взаимодействующими с множеством взаимосвязанных энергообъектов, распределенных на большой территории и функционирующих с одной целевой установкой обеспечения надежного качественного и доступного энергоснабжения. Технологически взаимосвязанные, организационно такие системы нередко бывают разрознены между субъектами отношений, которые в условиях рыночной экономики преследуют реализацию собственных, нередко несовпадающих интересов. Управление такими системами на всех этапах жизненного цикла становится сложной многофакторной задачей с наличием множества неопределенных параметров и быстро меняющимися процессами. В этих условиях актуальность использования теории системных исследований для принятия решений по развитию и функционированию систем энергетики и ТЭК в целом значительно возрастает.

Вместе с тем, вопрос об уровне востребованности методологии системных исследований и ее более широком применении для обоснования целевых прогнозов, энергетических программ и проектов заслуживает особого внимания. Теория системных исследований представляет инструмент фундаментальных исследований, ее применение направлено на различные аспекты получаемых научно-практических результатов, обеспечивающих новые качество и свойства энергетических систем. Она призвана определять миссию, аргументировать ключевые положения и предлагать новации в

энергетике. Наиболее продвинутыми в этом отношении могут быть направления исследований в сфере систем энергетики. Здесь прогрессивным движением представляется технологическая и организационно-экономическая трансформация систем, их цифровизация, интеграция энергетических, информационных, коммуникационных и интеллектуальных систем, преобразующие их в кибер-физические системы. Открытыми остаются вопросы прогнозирования развития ТЭК в современных условиях, учитывая цифровые и интеллектуальные тренды, технологические преобразования отраслей, углеродную нейтральность. В связи с этим аппарат системных исследований требует дальнейшего совершенствования и учета изменяющихся условий развития энергетики в контексте энергетического перехода. Традиционные математические модели и методы должны дополняться методами искусственного интеллекта (такими, как нейронные сети, машинное обучение, распознавание образов и др.), мультиагентными системами, технологиями распределенного реестра и др.

Дискуссионной (в части обоснованности) является климатическая повестка, получившая признание в ведущих странах мира. С одной стороны, она воспринимается как борьба с глобальным потеплением, сокращением парниковых выбросов и предотвращением глобальной экологической катастрофы, с другой стороны, она преподносится как инструмент очередного передела мирового (энергетического) рынка ресурсов, технологий и пересмотра конкурентных энерготехнологических ниш.

Зачастую энергопереход связывают с отказом от использования углеводородного топлива и сокращением выбросов двуокиси углерода, направлением, получившим название безуглеродной энергетики.

Безуглеродную экономику нередко считают первопричиной энергетического перехода и связывают с превалирующим негативным воздействием энергетики на глобальное потепление климата на земле. Вместе с тем, энергопереход – это нечто большее, не только решение климатических проблем, обеспечение энергетической независимости, основанное на энергоэффективности, снижении парниковых выбросов, использовании возобновляемых источников энергии. Энергопереход – это одно из средств трансформации человеческого общества, он затрагивает социальные, экономические, политические, экологические и другие сферы, поэтому его невозможно ассоциировать только с климатической повесткой. Трансформация систем энергетики и ТЭК в целом в аспекте энергетического перехода, в первую очередь, связана с проявлением активности потребителя в управлении своим энергоснабжением (как внутреннего фактора) и наличием доступного и развитого рынка технологий и оборудования (как внешнего фактора). Экологические вопросы в разных аспектах поднимаются на протяжении многих лет, начиная с Женевской конвенции 1979 г. Вместе с тем, до тех пор, пока не возросла роль общества как активного потребителя энергии, и не появились энергоэффективные, экологически чистые технологии и оборудование, в таком глобальном контексте они не ставились.

Безуглеродная экономика, включая и энергетику, и энергетический переход по своему содержанию представляют два самостоятельных направления. Первое связывается с устранением негативного влияния антропогенного углеродного воздействия на окружающую среду и изменение климата. Второе направление обусловлено естественным процессом смены

технологического уклада, направленного на формирование общества знания, интеллекта, нанотехнологий, наноэнергетики, микроэлектроники, биотехнологий, других наноразмерных производств.

Не следует абсолютизировать безуглеродную экономику или энергопереход как направления, которые могут избавить общество от накопившихся и будущих проблем. Каждый этап технологического развития порождает свои проблемы, решение которых приведет к очередному переходу и прорывным преобразованиям. Здесь важно уметь оперативно и правильно оценивать ситуацию и быть не в роли догоняющих, а иметь опережающее предвидение, выстраивать научно обоснованный перспективный план и ориентироваться не на импортозамещение, а на импортоопережение. Необходимо научиться формировать свою научно подготовленную опережающую повестку и действенные механизмы ее реализации, включая подстраивающиеся механизмы, механизмы, ослабляющие негативные проявления.

Новая тенденция в методологии системных исследований в энергетике связана с применением методов и подходов искусственного интеллекта. В этом отношении здесь также присутствуют определенные риски. С одной стороны, существует опасение, что искусственный интеллект может привести к неправильным и даже опасным решениям, а также возможному вытеснению человеческого труда. С другой стороны, существует мнение о необходимости более широкого вовлечения искусственного интеллекта в энергетику и экономику в целом для повышения эффективности управления ими. Нередко эти подходы противопоставляются традиционно применяемым методам оптимизации, оценки и расчета, что, вместе с тем, не следует допускать. Большая размерность задач, их многофакторность, неопределенные внешние условия, стремление получить наилучшие решения – все это останется в поле зрения оптимизационных моделей. Искусственный интеллект предоставляет новый инструментарий, он не отменяет, а дополняет и нередко использует в рамках своих подходов успешно работающий традиционный методический, вычислительный аппарат, он имеет свою область применения. Реализованный, например, в виде цифровых двойников, этот инструментарий позволит отслеживать весь жизненный цикл энергетических объектов и управлять ими на основе межмашинного взаимодействия и Интернета вещей (M2M и IoT). При этом не потребуется прибегать к сложным расчетам, экспериментальным исследованиям, которые невозможно выполнить в реальных условиях функционирования систем энергетики. Структурная сложность, технологическая и информационная интеграция систем, распределенная архитектура управления ими обуславливают все большую необходимость применения методов искусственного интеллекта. Эти подходы уже успешно применяются для прогнозирования нагрузок, планирования режимов и управления ими и решения многих других задач.

В отношении трансформации систем энергетики в условиях энергетического перехода нередко применяются конструкции в виде концепции 3Д (Декарбонизация, Децентрализация и Диджитализация), а в последнее время – 3С (Со-обеспечение, Со-организация, Со-развитие). Обе они имеют право на существование, тем более что построены на единых принципах, включающих удовлетворение потребностей в энергии из

окружающего пространства без ущерба для окружающей среды; развитие систем в виде распределенной архитектуры с коллективным участием в их управлении; интеллектуализацию процессов функционирования на базе человеко-машинных систем с координированным управлением. Вместе с тем, они лишь в общих чертах представляют очертания контура будущего энергетики, участвуют в виде неких ограничений, формирующих область допустимых решений и объективно не могут дать полноценного видения будущих систем, которое гораздо сложнее и многообразнее, чем то, что вкладывается в понятие этих ограничений. Принципиальным представляется то, что концепция ЗД отражает технологические аспекты трансформации систем, а концепция ЗС ее организационные стороны.

Для системных исследований энергетика будущего представляет новый объект изучения, характеризуемый появлением новых и развитием существующих его свойств, закономерностей, отличающийся принципами и архитектурой построения, технологиями производства, транспорта, аккумулирования, распределения и потребления энергии, технологиями функционирования и управления и другими особенностями с присущими ему техническими, экономическими, экологическими, социальными аспектами. Для исследования новых свойств и их обеспечения необходимо дальнейшее развитие методологии системного подхода, методов системного анализа, совершенствование модельного, вычислительного инструментария. При этом теория системных исследований в энергетике, находящаяся на стыке фундаментальных научных проблем, позволяет успешно решать задачи трансформирующихся систем энергетики в их взаимосвязи в ТЭК. Она призвана стать базовой теорией для научных исследований высокотехнологичного развития энергетики и их практических приложений. Теория системных исследований в энергетике должна развиваться синхронно с развитием систем энергетики и ТЭК как объектов ее исследований, обогащая и развивая методологию и инструментарий для этих исследований.

Научное издание

**СИСТЕМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ:
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПЕРЕХОД**

*Утверждено к печати Ученым советом
Института систем энергетики им Л.А. Мелентьева СО РАН*

Литературный редактор И.И. Золотарева
Технический редактор С.Ю. Павлова
Дизайн обложки Д.И. Золотарев

Подписано к печати 01.04.2022. Формат 70x100/16. Гарнитура ShoolBook.
Печать офсетная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 29,7. Тираж 500 экз.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130
тел. (3952) 500-646, <https://isem.irk.ru/>

Отпечатано в типографии «Дубль Принт»
664046, г. Иркутск, ул. Волжская, 14, оф. 112