

Энергетический переход с инженерной точки зрения

Energy transition from an engineering perspective

Дмитрий ХОЛКИН
Генеральный директор АНО «Центр
энергетических систем будущего «Энерджинет»
E-mail: dvh@internetofenergy.ru

Dmitry KHOLKIN
General Director of the Future Energy
Systems Center «Energynet»
E-mail: dvh@internetofenergy.ru

Игорь ЧАУСОВ
Директор аналитического направления АНО
«Центр энергетических систем будущего
«Энерджинет»
E-mail: chi@internetofenergy.ru

Igor CHAUSOV
Director of Analytic branch of the
Future Energy Systems Center
«Energynet»
E-mail: chi@internetofenergy.ru

Серверная комната в дата-центре

Источник: scanrail / depositphotos.com



Аннотация. Обосновывается необходимость введения понятия энергетического уклада, позволяющего рассматривать процессы трансформации энергетики с инженерной позиции. Демонстрируется корреляция между энергетическими укладами и историческими этапами развития техники. На основе нового технологического пакета, складывающегося в настоящее время, дается техническая характеристика следующего энергетического уклада. *Ключевые слова:* энергетический переход, технологический уклад, энергетический уклад, Интернет энергии.

Abstract. The necessity of introducing the concept of energy surges, which allows us to consider the processes of energy systems transformation from an engineering point of view, is underpinned. The correlation of energy surges and historical stages of technology development is demonstrated. Based on the new technological package, currently being developed, the technical characteristics of the following energy surge are given.

Keywords: energy transition, technological paradigm, energy surge, Internet of Energy.

“

История энергии — это история не переходов, а прироста. Меняется не только структура энергетического баланса, но и объем потребления



Дата-центр
Источник: Gorodenkoff / depositphotos.com

«Как вы яхту назовете, так она и поплывет...» – пели герои одного известного советского мультфильма. В этих словах есть определенная правда: в зависимости от того, какой термин вы используете для обозначения феномена, так вы и будете понимать сам феномен. Это особенно важно с позиции инженера, так как за его пониманием термина должна стоять практическая схема действия, конкретное представление о создаваемой системе.

Для определения периодов трансформации энергетики чаще всего используется понятие энергетического перехода. Оно имеет следующее каноническое определение: «Значительное структурное изменение в энергетической системе, в ходе которого увеличивается доля новых пер-

вичных источников энергии и происходит постепенное вытеснение старых источников в общем объеме энергопотребления» [1]. А значит, для того, чтобы совершить очередной энергетический переход, нужно, говоря несколько утрированно, строить новые первичные источники энергии. Но так ли это? В этом ли суть трансформации энергетики? Насколько данное понятие помогает объяснить прошлое и предсказать будущее?

Обсудим это понятие и его альтернативы с инженерной точки зрения, чтобы лучше понимать, какая нам предстоит работа в энергетической отрасли на ближайшие 10–20 лет.

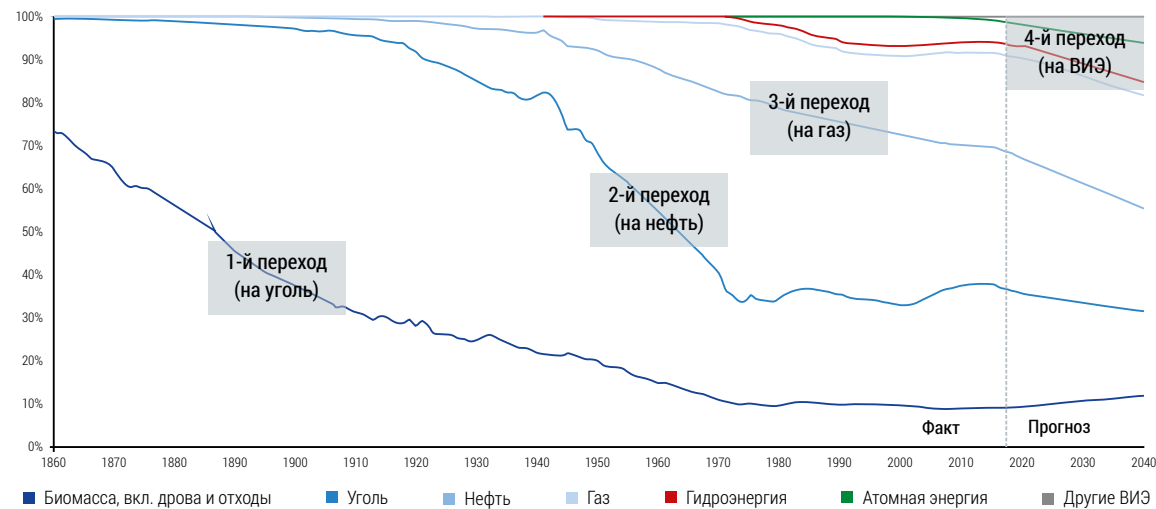


Рис. 1. Четыре энергоперехода

Источники: ИНЭИ РАН, МШУ Сколково

Критика понятия энергоперехода

Одним из первых понятие энергоперехода ввел в оборот чешско-канадский ученый и политический аналитик Вацлав Смил. Он его определяет как «время, прошедшее между введением нового источника энергии или первичного двигателя и таким состоянием, когда можно заявить о том, что они заняли существенную долю общего рынка». В. Смил подтверждает свое определение аналитикой по изменению энергобалансов стран и мировой экономики по отдельным видам первичных источников энергии в процентах от общего объема энергопотребления. Этот подход убедительно демонстрирует 3 исторических этапа, в которых происходит появление в энергобалансе значительной доли новых источников энергии [2]:

- первый энергопереход – от биотоплива (дрова, древесный уголь и т. п.) к углю (доля угля в первичной энергии в 1840 г. – 5%, в 1900 г. – 50%);
- второй энергопереход – увеличение доли нефти в первичной энергии (1915 г. – 3%, 1975 г. – 45%);
- третий энергопереход – расширение использования газа (1930 г. – 3%, 2017 г. – 23%).

По исторической аналогии и существующим трендам делается прогноз, что четвертый энергопереход будет переходом к возобновляемым источникам энергии:

ветру, солнцу, приливам и т. д. (2017 г. – 3%, 2022 г. – 12,2%). В целом, конечно, рост впечатляющий.

Может показаться, что понятие энергоперехода и его историческая подоплека вполне прозрачны и понятны. Однако есть и альтернативные точки зрения. В частности, французский историк науки, техники и окружающей среды Жан Батист Фрессоз утверждает, что «если история и учит нас чему-то, так это тому, что энергетического перехода никогда не было». Мы не переходим от дерева к углю, затем от угля к нефти, затем от нефти к ядерной энергии. История энергии – это история не переходов, а дополнений (прироста) [3].

Путаница, как он считает, возникла из-за того, что меняется не только структура энергетического баланса, но и объем потребления. Если посмотреть на огромное количество энергии, потребляемой человечеством, картина показывает постоянно растущее потребление, которое удовлетворяется постоянно растущим предложением всех первичных источников энергии, доступных человечеству. Например, увеличение использования угля в XIX веке не заменило потребление древесины, а привело даже к увеличению потребления древесины в экономике в целом. Потребление угля в абсолютном выражении за последние 200 лет только росло (см. рис. 2.). Это серьезная критика, указывающая на недостаточную релевантность понятия энергоперехода реально происходившим в истории процессам.

Прислушиваясь к критике понятия энергетического перехода, можно отметить, что каноническое его определение слишком узко, однобоко трактует цели и предмет рассматриваемых процессов

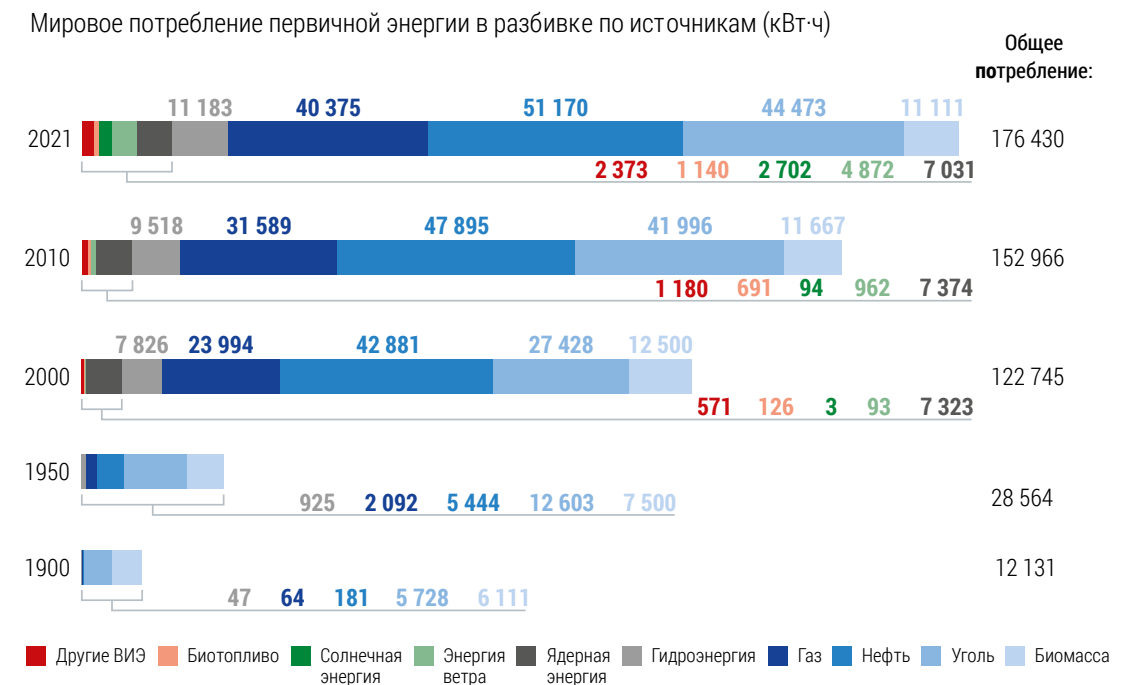
но до 1910 г. предприниматели выбирали старый добрый пар. Почему? На фабриках того времени производство организовывалось вокруг единой паровой машины, вращающей центральный вал. Вся логика производства строилась на этой технологической особенности. Некоторые предприниматели пробовали заменить паровую машину на электромотор, но экономия не оправдывала необходимые инвестиции. Для электрической революции не хватало главного – изменения образа мышления. Ведь электромоторы были способны на большее: они позволяли доставлять энергию точно тогда и именно туда, когда

Другой аспект критики понятия энергетического перехода связан с его акцентом исключительно на изменениях видов топлива (первичных источников энергии) и связанных с ними технологий: «Энергопереход – это изменение видов топлива (например, с дерева на уголь или с угля на нефть) и связанных с ними технологий (например, с паровых двигателей на двигатели внутреннего сгорания)» [4]. В то же время другие авторы пытаются более широко определить объект энергетического перехода: «Это созвездие входов и выходов энергии с участием поставщиков, дистрибьюторов и конечных пользователей, а также институтов регулирования, преобразования и торговли» [5], т. е. трансформация отрасли специфицируется качественными изменениями технологического, организационно-деятельностного и экономического характера. Происходить этот процесс может по всей технологической цепочке от присвоения первичной энергии до ее превращения в полезную работу.

Эту мысль можно пояснить ярким историческим примером столетней давности из времен начала масштабной электрификации. Технические решения для перехода промышленности на электричество были готовы уже в 80-е годы XIX века,

Рис. 2. Динамика потребления топливных энергетических ресурсов с 1900 г.

Источник: Our World in Data



и где она была нужна. Это создавало возможности для организации труда по логике производственной линии, а не по логике ведущего вала. Электричество стало экономически привлекательным тогда, когда изменилась структура деятельности и производственных отношений. Именно это дало скачкообразный рост производительности труда в промышленности.

Еще один важный вопрос вызывает дискуссию относительно рассматриваемого понятия. Он касается целей энергетического перехода. Авторы из международного агентства IRENA делают упор на климатическое целеполагание: «В основе энергетического перехода лежит не-



Газовые электростанции Irsching 4 и 5, Германия
Источник: *hodmysley.ru*

обходимость сокращения выбросов CO₂ для ограничения изменения климата» [6]. Но есть ученые и эксперты, которые видят цели иначе: «Энергетический переход должен быть подобен энергетической «трансформации» или «революции», разрушительной или радикальной трансформации как технологий, так и социальных практик, часто направленной на расширение доступа к энергии или изобилию» [7]. Эта цитата указывает на важную мысль о том, что энергетический переход всегда приводил и, вероятно, должен приводить и далее к развитию экономики и общества. С политэкономической позиции энергетический переход связан, в первую очередь, с «просьюмеризмом» и «энергетической

демократией», а именно с «перераспределением политической и экономической силы в отношениях между владельцами средств производства энергии и обществом» [8].

Таким образом, прислушиваясь к разносторонней критике понятия энергетического перехода, можно отметить, что каноническое его определение слишком узко, односторонне трактует цели и предмет рассматриваемых процессов, в то время как они представляют собой гораздо более сложное и разнообразное явление. Кроме того, данное понятие недостаточно фундаментально историческими исследованиями. Жан Батист Фрессоз подчеркивает, что термин «энергетический переход» впервые был использован политиками, а не историками, для описания цели, которую необходимо достичь в будущем, а не как инструмент для анализа прошлых тенденций [3].

Для того, чтобы используемое понятие хорошо отражало историческую логику изменений в отрасли, необходимо, чтобы оно указывало на пакет сопряженных и синхронно появившихся технологий, на изменения по всей технологической цепочке: от присвоения первичной энергии до её превращения в полезную работу, на появление новых экономических практик, новых сторон жизнедеятельности, обеспечивающих развитие экономики и общества. Каноническое понятие энергоперехода в этом качестве не работает. Для более адекватного анализа сложных процессов трансформации энергетики с инженерной точки зрения необходим поиск другого понятия.

Изучение понятия технологического уклада

Близким к искомому является понятие технологического уклада, так как оно основывается на историческом анализе появления и масштабного использования новых технологий и связанными с этим экономическими циклами развития общества. Технологический уклад обычно определяется как совокупность сопряженных производств, имеющих единый технический уровень и развивающихся синхронно [9].

В России данное понятие ввели и развивали экономисты Д. С. Львов и С. Ю. Глазьев, а за рубежом синонимичный термин «технико-экономическая



Рис. 3. Промышленные революции по Клаусу Швабу

парадигма» был введен в дискурс английским экономистом Кристофером Фримэном и развит его ученицей, британовенесуэльским ученым Карлотой Перес. Данное понятие связано, с одной стороны, с марксистской традицией, с другой стороны, с работами таких экономистов, как Николай Кондратьев и Йозеф Шумпетер, занимавшихся периодизацией экономического развития и волнами инноваций, поэтому оно предполагает комплексное рассмотрение сферы производства и экономических отношений со всеми присутствующими ей явлениями (распределением доходов, технологиями, организационными и управленческими методами) [9].

Образование каждого нового уклада связано с технологической революцией, которую Карлота Перес определяет как мощный и хорошо заметный кластер новых и динамичных технологий, продуктов и отраслей, способных вызвать переворот во всей ткани экономики и стимулировать долгосрочный подъем развития. В связи с научным и технико-технологическим прогрессом посредством технологических революций происходит переход от более низких укладов к более высоким [9].

Однако с периодизацией укладов и технологических (промышленных) революций все не так просто. Благодаря книге немецкого экономиста, основателя и бессменного президента Всемирного экономического форума в Давосе Клауса Шваба «Четвёртая промышленная революция», наиболее расхожим является выделение трех промышленных революций в прошлом, и четвертой, текущей революции. Первая промышленная революция (конец XVIII в.) состоит в переходе от ручного труда к машинному и связана с появлением механического ткацкого станка и паровой

машины. Вторая промышленная революция (конец XIX в.) ассоциируется с электричеством, развитием конвейерного производства, системы телефонной связи и нефтяной экономики. Третья промышленная революция (конец XX в.) заключается в автоматизации производственных процессов и масштабным распространением информационных технологий. Четвертая промышленная революция связана с широким внедрением в производство киберфизических систем [10].

Однако, если мы посмотрим периодизацию технологических укладов у российских экономистов Д. С. Львова и С. Ю. Глазьева, то обнаружим не 4, а 6 промышленных революций, из которых последняя, разворачивающаяся на наших глазах, характеризуется кроме информационно-коммуникационных технологий также нано- и биотехнологиями [9].

Последняя периодизация основывается на работах другого российского экономиста – Николая Кондратьева, который еще в 1920-е гг. описал периодические циклы сменяющихся подъёмов и спадов современной мировой экономики продол-

Важно выйти на характерные признаки технологического типа, так как они позволяют определять инженерные основы для развития энергетики и выявлять особенности влияния энергетики на экономику

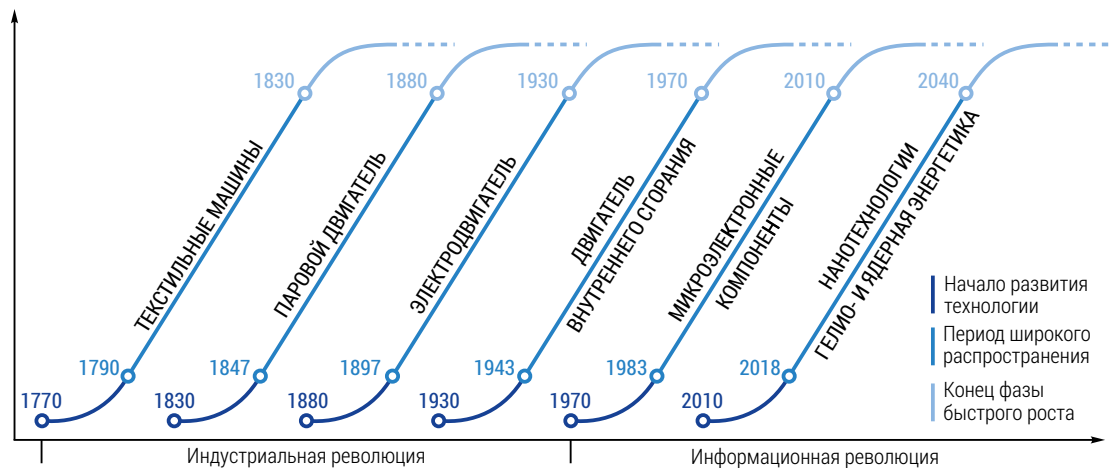
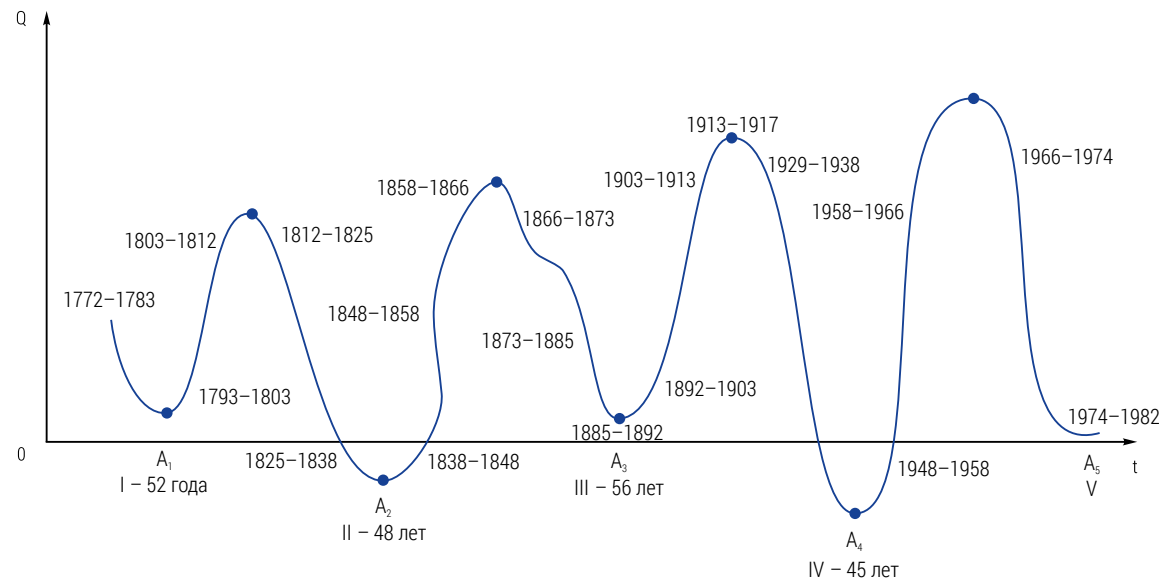


Рис. 4. Смена технологических укладов по Сергею Глазьеву

жительностью 45–60 лет. Н. Кондратьев в своих работах, базирующихся на эмпирическом анализе большого числа экономических показателей различных стран на довольно длительных промежутках времени, охватывавших 100–150 лет, отмечал, что в долгосрочной динамике некоторых экономических индикаторов наблюдается определённая циклическая регулярность, в ходе которой на смену фазам роста соответствующих показателей приходят фазы их относительного спада с характерным периодом этих долгосрочных колебаний порядка 50 лет. В дальнейшем он развил, охарактеризовал и обосновал обнару-

женную закономерность. Многие исследователи связывают смену этих К-волн с технологическими укладами. Прорывные технологии открывают возможности для расширения производства и формируют новые секторы экономики, образующие новый технологический уклад. Наблюдается некоторая несостыковка периодов промышленных революций у Шваба и смен технологических укладов у Львова и Глазьева. Помимо этого, существует еще множество других датировок технологических революций, например, в работах Ю. В. Яковца [11], С. П. Капицы [12], которые в большей или меньшей сте-

Рис. 5. Экономические циклы по Николаю Кондратьеву



пени отличаются от первых двух. По всей видимости, это связано с тем, что разные авторы выбирают разные характерные признаки для периодизации. В нашей работе важно выйти на характерные признаки технологического типа, так как они позволяют определять инженерные основы для развития энергетики, а также выявлять особенности влияния энергетики на другие отрасли экономики. Специалисты по истории техники выделяют еще столетние циклы, связанные с научными открытиями, изобретениями и техническими нововведениями. В определенной степени они совпадают с временными границами кондратьевских циклов, объединенных в пары. При этом некоторые исследователи различают в этих парах «волны-предвестники», по появлению которых можно судить о следующей, более мощной технологической революции [13]. В этом подходе мы можем выделить 3 укрупненных технологических уклада, различать которые мы будем на основе этапов развития техники. В своем развитии техника имеет ряд этапов: орудийный (его мы далее рассматривать не будем), механический, электрический (или электромеханический) и электронный (или киберфизический). Каждый из последующих этапов качественно отличается от предыдущего и включает его технологии в свой состав как неотъемлемый элемент. Каждый этап определяется специфическим технологическим пакетом, придающим новые возможности для техники, и задает тем самым новую форму производства. Начало механического этапа совпадает со ста-

На механическом этапе массово появилась практика проектирования, на электрическом – практика исследования, а на электронном этапе предположительно появилась практика программирования

новлением машинно-фабричного способа производства. Электрификация технических средств дает начало конвейерным формам труда. Начало киберфизического этапа автоматизации приходится на период становления качественно нового, системно-автоматизированного способа производства. Таким образом, для периодизации технологических укладов мы будем использовать этапы развития техники, что лучше соответствует целям анализа истории развития технологий и отраслей промышленности, в т. ч. энергетики. Данный подход хорошо коррелирует с экономическими циклами Кондратьева и промышленными революциями (см. таблицу 1). Правда, в нашем случае третья и четвертая промышленные революции по Швабу объединяются в одну, в которой бурные процессы автоматизации производства и информатизации деловых процессов конца XX в. являются «волной-предвестником» нынешней революции киберфизических систем.

Таблица 1. Соотношение между экономическими циклами Кондратьева, этапами развития техники и промышленными революциями по Клаусу Швабу

Периоды времени	Волны Кондратьева	Этапы развития техники	Промышленные революции
1750–1775	Первая волна	Механический	Первая промышленная революция
1775–1800			
1800–1825			
1825–1850			
1850–1875	Вторая волна	Электрический	Вторая промышленная революция
1875–1900			
1900–1925	Третья волна		
1925–1950			
1950–1975	Четвертая волна	Электронный (киберфизический)	Третья промышленная революция
1975–2000			
2000–2025	Пятая волна		
2025–...	Шестая волна		



Угольная котельная в Ижевске

Источник: Пресс-служба ПАО «Т Плюс»

Предлагаемый подход позволяет нам четко соотнести каждый исторический этап промышленного развития цивилизации с той или иной парадигмой техники, а значит – лучше понять особенности технического устройства как прошедших технологических укладов, так и нового, становящегося на наших глазах. Важно также отметить, что за каждым таким изменением парадигмы техники стоит и изменение способов и средств мышления о системах. Исследователи отмечают, что на механическом этапе массово появилась практика проектирования, на электрическом – практика исследования, а на электронном этапе предположительно появилась практика

программирования (в широком смысле данного слова) [14].

Конструирование понятия энергетического уклада

Понятие энергетического уклада строго не введено. Иногда под ним понимается установившийся порядок после революционной фазы энергетического перехода, когда новый энергетический ресурс уже занял значимую долю в балансе и эволюционно продолжает свой рост. Иногда – качественно изменившееся технологическое устройство энергетики, характерное для того или иного технологического уклада. Более продуктивно с инженерной точки зрения рассматривать второй вариант трактовки данного понятия. Его мы и будем использовать далее.

Очень близким к энергетическому укладу понятием, которое изредка встречается в литературе, является энергетическая эпоха. Выделяются 4 эпохи: энергии воды, пара, электричества, атомной энергии [15]. Обратите внимание, что в названии эпох, кроме одного случая (эпохи атомной энергетики), не присутствует указание на тот или иной энергоресурс. В отличие от энергетических переходов,

Под энергетическим укладом понимается установившийся порядок после «революционной» фазы энергоперехода, когда новый энергоресурс уже занял значимую долю в балансе и продолжает свой рост

которые принято маркировать названиями доминирующих источников энергии (уголь, нефть, газ, ВИЭ), энергетические эпохи соотносятся с целостными характеристиками систем энергоснабжения и маркируются доминирующими способами превращения энергии в полезную работу, что нам и требуется.

Суть каждой эпохи состояла в том, что появившееся технологическое ядро обеспечивало формирование новых свойств систем энергоснабжения, которые были принципиально важны для появления и качественного развития новых отраслей экономики, практик, сторон жизнедеятельности. Проследим это на примере развития промышленности:

1. В эпоху энергии воды (со времен Древнего Рима) первичная энергия воды (или ветра) превращалась в механическую и могла использоваться для выполнения полезной работы. Однако это было возможно сделать только в месте непосредственного присвоения первичной энергии. По этой причине Европа в Средневековье стала новым центром экономического роста, так как обладала огромным водно-энергетическим потенциалом.

2. В эпоху пара (начало датируется XVIII в.) удалось разнести в пространстве место добычи первичной энергии (прежде всего, угля) и место ее превращения посредством пара в полезную работу. Это позволило более свободно размещать промышленные производства с учетом других факторов (доступ к сырью, трудовым ресурсам, рынкам сбыта) и при этом наращивать механизацию труда.
3. В эпоху электричества (начало датируется концом XIX в.) появилась еще одна «степень свободы», содержащаяся в гибкой и точечной доставке энергии к месту производства полезной работы. Она обеспечивалась превращением первичной энергии в более удобную для транспортировки и распределения вторичную форму – в электричество. В частности, это новое свойство энергетики позволило перейти к конвейерному производству и в разы увеличить производительность труда.
4. Эпоха атомной энергетики (начало датируется второй половиной XX в.) не признается специалистами однозначно, так как не очевидно, что

Строительство Белорусской АЭС-1

Источник: Аркадий Сухонин / «Росатом»



в данный период времени появились качественно новые энергетические возможности для потребителей. Однако, в эту эпоху сформировались большие энергетические системы, которые выступили инфраструктурной основой для концентрации промышленных объектов и масштабной урбанизации.

Сопоставляя энергетические эпохи с периодизацией развития техники, мы увидим хорошую корреляцию: эпоха энергии воды поддерживала орудийный уклад, эпоха энергии пара обеспечила переход к механическому укладу, эпоха электричества привела к электрификации промышленного производства. А вот период появления и развития атомной энергетики, скорее всего, надо отнести к некоторому этапу эпохи электричества, а не к самостоятельной эпохе. Хотя нужно признать, что в конце XX века действительно появились «предвестники» новой энергетической эпохи.

Чтобы полноценно перейти от понятия энергетической эпохи к понятию энергетического уклада, который должен четко охарактеризовать особенности техноло-

гического устройства энергосистем, нам потребуется более детально разобрать, как менялся технологический пакет в энергетике. Для этого необходимо идентифицировать для каждой эпохи базовые технологии преобразования энергии, передачи энергии, управления энергопотоками, а также принципы инженерной сборки систем энергетики.

Прежде всего, смена энергетических укладов связана со сменой определяющей технологии преобразования и передачи энергии (см. таблицу 2). До появления в XIX в. первых паровых машин основным способом преобразования и передачи энергии оставались парус, ветровое и водяное колесо, а также механические передачи. Паровая машина, а затем и другие тепловые машины – турбины и двигатели внутреннего сгорания – позволили преобразовывать более концентрированную энергию ископаемого топлива в механическую энергию. С освоением тепловых машин передача энергии в промышленных и транспортных системах (паровозах, пароходах) начала осуществляться пневмогидравлически – при помощи трубопроводов. С постепен-



Высоковольтные ЛЭП
Источник: Johannes Plenio / Pixabay

ным освоением электрических машин – генераторов, трансформаторов, электродвигателей – началась эпоха электричества, в рамках которой различные виды первичной энергии преобразуются в форму электроэнергии, передаваемой по сетям переменного тока с синхронным режимом. Кроме того, смена энергетических укладов связана и со сменой технологий и принципов сборки (интеграции) энергосистем и управления ими от ручного управления локальными механическими системами (мельница, парусник) до автоматического управления большими энергетическими системами.

Необходимо отметить, что технологии прежних укладов не уходят из обращения при их смене, но место этих технологий в энергосистемах переопределяется и оказывается подчинено логике устройства энергосистем на основе новой ведущей технологии. Так, и в современных электростанциях используются механические, гидравлические и пневматические узлы, передачи, агрегаты и системы, но их использование подчинено логике работы генераторов по производству электроэнергии.

После, введя понятие энергетического уклада, мы можем подступиться к обсуждению технологического устройства новой эпохи. Её уникальное содержание в соответствии с ранее введенными представлениями о развитии техники характеризуется переходом к электронным, киберфизическим системам.

Характеристика нового энергетического уклада

В основе нового уклада находятся технологии твердотельной инженерной физики (электроники и электрохимии) как основного способа преобразования энергии из одних видов в другие или изменения параметров энергетических потоков, осуществляемого на уровне электронной структуры кристаллов и гетероструктур. Например, солнечные панели, компоненты инверторов и других силовых устройств представляют собой «системы на кристалле», которые преобразуют излучение в электроэнергию и позволяют осуществлять управление параметрами электрического тока при его прохождении через эти компоненты. Компоненты электрохимических установок, таких как аккумуляторы или топливные элементы, также представляют собой твердотельные и композитные элементы с микроскопической или даже наноразмерной функциональной структурой поверхности, осуществляющие прямое преобразование энергии из электрической формы в химическую и обратно. Особенностью этих технологий является получение электрической энергии без промежуточного получения энергии пара и вращения валов машин.

Пока «электронная генерация» интегрируется в системы передачи электроэнергии предыдущего уклада: электроэнергия, например от ВИЭ, транспортируется при помощи сетей переменного тока с синхронным режимом электропередачи. Но постепенно появляются и новые возможности для передачи энергии, основанные на активном управлении параметрами режима за счет устройств силовой электроники, таких как энергетические роутеры – управля-

Постепенно появляются и новые возможности для передачи энергии, основанные на управлении параметрами режима за счет устройств силовой электроники, таких как энергетические роутеры

Таблица 2. Инженерно-технологические аспекты различных энергетических укладов

Энергетический уклад	Технология преобразования энергии (генерация, потребление)	Технология передачи энергии (транспорт, распределение)	Технология управления	Принцип системной сборки
I. Энергии воды	Механические машины (парус, ветроколесо, водяное колесо)	Механическая передача	Ручное управление	Прямой привод от источника энергии
II. Пара	Тепловые машины (паровая машина, паровая турбина, двигатель внутреннего сгорания)	Гидравлическая, пневматическая, механическая передача	Аналоговое диспетчерское управление	Локальная линейная группа приводов, подключенных к паропроводу или валу
III. Электричества	Электрические машины (генератор)	Электрическая передача с синхронным режимом	III(а). Аналоговое автоматизированное управление III(б). Цифровое автоматизированное управление	Централизованная (древовидная) сеть с иерархическим (диспетчерским) управлением
IV. Интернета энергии	Электронные и электрохимические машины (солнечные панели, инверторы и др. преобразователи, аккумуляторы, топливные элементы)	IV(а). Электрическая передача с синхронным режимом IV(б). Пакетная электрическая передача (в сетях с управляемыми вставками постоянного тока) IV(в). Беспроводная электромагнитная пакетная передача	Цифровое автоматическое (роботизированное) управление (с элементами слабого искусственного интеллекта)	Децентрализованная (ячеистая) сеть с распределенным (транзакционным) управлением

Электросети станут сетями «смешанного» тока: множества участков сетей переменного и постоянного тока, связанных транзитами. На смену синхронному режиму придет управление перетоками

емые вставки постоянного тока. Интеграция большого числа источников энергии и гибкости, включенных в систему через инверторы, а также использование энергетических роутеров поменяют принцип передачи электроэнергии. Электрические сети станут сетями «смешанного» тока: множества участков сетей как переменного, так и постоянного тока, связанных транзитами. На смену синхронному режиму придет активное управление перетоками через вставки и участки постоянного тока. В пределе применение указанных технологий позволит реализовать пакетную передачу электроэнергии между отдельными режимными участками и зонами сети, аналогичную передаче информации в современных компьютерных сетях. Наконец, стоит ожидать появления и аналогичных современной беспроводной связи систем беспроводной передачи электроэнергии. Такого типа системы малых мощностей, используемые для зарядки персональной цифровой техники, уже появились в массовой практике. Следующий шаг – выход на рынок систем беспроводной зарядки электрического транспорта и дронов. Но можно ожидать и появления более мощных систем беспроводной передачи электроэнергии, в том числе с использованием лазерной техники. Особенностью новых технологий передачи энергии является дискретность энергетических потоков и активное управление их режимами.

Все это открывает возможность и для смены принципов сборки энергосистем и управления ими. Распределенные электронные источники энергии и энергетической гибкости, связанные электрическими сетями с активным управлением параметрами режима или даже пакетной передачей энергии позволяют перейти

от энергосистемы как древовидной, централизованно управляемой диспетчерами сети к ячеистой структуре энергосистемы. В новом укладе энергосистема будет представлять собой децентрализованную и гетерархическую ячеистую (ризоматическую) сеть распределенной генерации, микрогридов и просьюмеров. Управление такой энергосистемой будет осуществляться не за счет централизованного диспетчирования, а за счет распределенного транзакционного управления договорными перетоками энергии и ее распределением в рамках транзакций между пользователями – генераторами, просьюмерами, потребителями и провайдерами энергетических услуг. Особенностью технологий интеграции и управления в энергосистемах нового уклада является преодоление порядкового роста сложности управления за счет применения цифровых технологий и искусственного интеллекта.

Этот набор технологий позволяет преобразовывать в электрический ток со стабильными параметрами солнечную и ветровую энергию, а также энергию новых типов энергоносителей (водорода, метанола, аммиака и т. д.), управлять параметрами режима передачи электроэнергии, формировать электрические сети со сложно-замкнутой топологией, управлять потреблением электроэнергии за счет частотно-регулируемых приводов. В пределе можно себе представить энергосистемы, полностью построенные на новом технологическом пакете, их организация

ВЭС в Северном море

Источник: equinor.fotoware.cloud



СЭС Apodi в Бразилии

Источник: equinor.fotoware.cloud

и принципы работы будут очень напоминать информационно-коммуникационные системы и интернет.

В рамках такого энергетического уклада реализуются новые потребительские свойства энергоснабжения, недоступные в предыдущих укладах. Эти свойства – автономность, мобильность и интеллектуальность энергоснабжения.

Автономность – возможность эффективного использования локальных, в первую очередь, низкоуглеродных источников энергии для обеспечения энергобезопасности и дешевого, доступного энергоснабжения, зависимость которого от поставок электроэнергии от крупной централизованной генерации и поставок топлива значительно снижена по сравнению с энергосистемами предыдущего уклада. На практике речь идет о существенной диверсификации источников энергии при помощи местных ресурсов. Это свойство достигается эффективным образом за счет управления энергетической гибкостью, позволяющей повышать КИУМ генерации на основе ВИЭ и других локальных источников энергии.

Мобильность – возможность быстро развернуть систему энергоснабжения вплоть до применения собственно мобильных систем энергоснабжения. Компактизация источников энергии, рост плотности их мощности, переход к использованию распределенных источников энергии с малыми мощностями и габаритами, достигаемое применением ВИЭ, аккумуляторов

и топливных элементов, позволяют быстрее и с меньшими трудозатратами создавать новые системы энергоснабжения, как автономные, так и присоединенные к электрическим сетям из предыдущего уклада. Эти же факторы обеспечивают рост удельной мощности транспортных энергоустановок, тяговооруженности транспорта, его весового совершенства и, таким образом, обеспечивают возможность появления новых видов транспорта – от уже распространенных электросамокатов и электроскутеров до испытываемых аэротакси, тяжелых дронов и проектируемой водородной сверхзвуковой пассажирской авиации.

Интеллектуальность связана с возможностью гибкого автоматического управления существенно более сложными энергосистемами. Причинами растущей сложности являются уже упомянутая диверсификация источников энергии и их гибридизация, порядковый рост числа акторов, задействованных в производстве, передаче и потреблении энергии, запрос на кастомизацию электроснабжения, выражающуюся в том, что качество электроэнергии, ее стоимость, ее происхождение, ее углеродный след зависят от выбора потребителя. Кроме того, в условиях нового уклада возникают мультиинфраструктуры – системы, в которых электроснабжение объединено в технологический комплекс с теплоснабжением, водоснабжением и водоотведением, вентиляцией

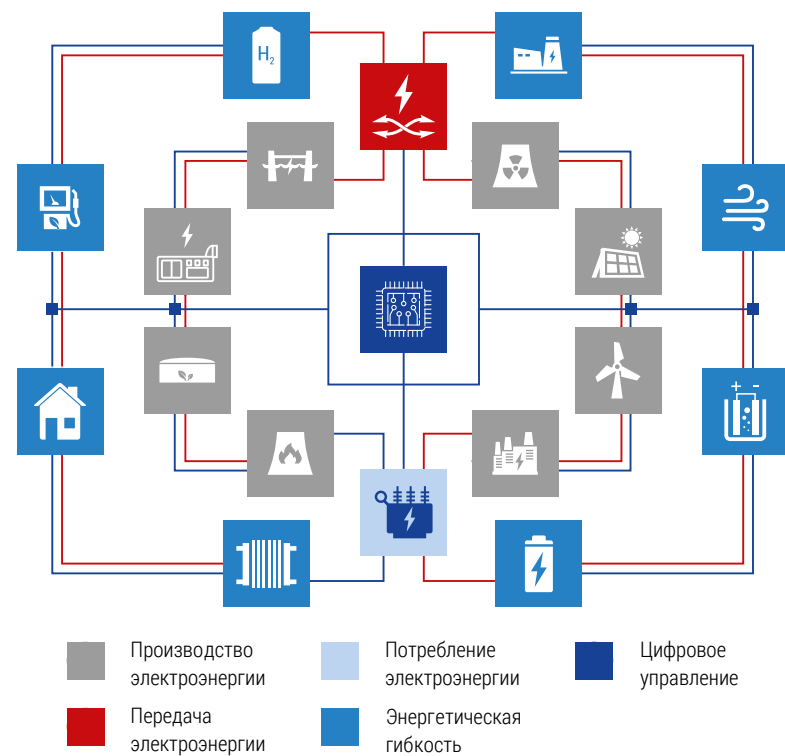


Рис. 6. «Ген» нового энергетического уклада – ячейка Интернета энергии

и кондиционированием, газоснабжением, зарядкой и заправкой электрического и водородного транспорта, переработкой отходов. Управление такими мультиинфраструктурными комплексами также требует свойства интеллектуальности.

На практике мы видим, что в мире не только вводятся колоссальные мощности ВИЭ (предвестники новой эпохи), но и создаются принципиально новые подходы, технологии и решения по организации энергосистем, что является инженерной сутью нового энергетического уклада [16]. Без этого невозможно достичь декларируемых целей по декарбонизации, не обеспечить дальнейшего развития экономики и общества на базе открывающихся энергетических возможностей.

В России также реализуются программы развития возобновляемой энергетики, промышленного освоения технологий накопления энергии и водородной энергетики, перехода к электромобильности и цифровой трансформации отрасли. Однако в России не сформировались еще собственные представления о том, как использовать возможности нового энергетического уклада не только для выполнения климатических обязательств, но и для

развития экономики и общества. Для этого как раз и следует перейти от политического понятия энергетического перехода к инженерному понятию энергетического уклада. Это позволит поменять точку зрения и увидеть, насколько велика значимость технологического развития энергетики для страны. Ведь только решения нового энергетического уклада позволят энергетике стать более живучей в условиях климатических изменений, смогут радикально повысить производительность хозяйственной системы за счет роста ее энергооборуженности и интенсивности процессов, позволят масштабно экономически осваивать территории Сибири, Дальнего Востока и Арктики, обеспечат переход к новой мобильности и роботизации в транспорте, промышленности и сельском хозяйстве, будут содействовать постиндустриальному развитию городов на основе динамичных требований новых экономических практик и высоких экологических стандартов.

Необходимо отметить, что существенные заделы в сфере подготовки перехода к новому энергетическому укладу сделаны в рамках Национальной технологической инициативы по направлению «Энерджи-нет». Разрабатываются критические тех-

нологии, реализуются пилотные проекты, готовятся нормативные правовые и технические документы. В частности, разработан архитектурный подход (фреймворк) к созданию на основе новых принципов и технологий энергетических систем следующего поколения, так называемого «Интернета энергии» [17]. Уже с 1 июля текущего года решением Росстандарта вводятся в действие 2 предварительных национальных стандарта по терминам и определениям, а также по архитектуре систем Интернета энергии.

Четвертую энергетическую эпоху (уклад), чтобы она соответствовала современному этапу развития техники, следовало бы назвать эпохой цифровой энергии или эпохой Интернета энергии. Она, с инженерной точки зрения, точно не может быть маркирована только атомной энергетикой или ВИЭ. Новый энергетический уклад станет сложным конгломератом старых и новых источников энергии, множества просьюмеров, распределенной генерации, интеллектуальных сетей, мобильных устройств, зарядных инфраструктур, цифровых энергетических сервисов. Понимая это, давайте «яхту» сразу назовем правильно!

Заключение

С инженерной позиции, для исторического анализа развития энергетики, а также для определения очертаний ее будущего, не годится понятие энергетического перехода, оно слишком однобоко отражает процессы трансформации. Лучше подходит сконструированное нами понятие энерге-

тического уклада. Во-первых, в нем речь идет о целостной технологической цепочке от получения первичной энергии до её превращения в полезную работу, а не только об источниках энергии. Во-вторых, увязка энергетических укладов с технологическими революциями указывает на объективные предпосылки для развития энергетики и приобретения ею новых полезных свойств. И в-третьих, рассматривая корреляции между трансформацией энергетики и процессами революционных изменений в промышленности, в транспорте, в сельском хозяйстве, в социальной жизни мы можем с очевидностью судить о влиянии новой энергетики на экономический рост и развитие общества.



Цифровой двойник месторождения
Источник: imghub.ru

Использованные источники

1. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Энергетический_переход
2. Smil, Vaclav. *Energy Myths and Realities: Bringing Science to the Energy Policy Debate*.
3. *POUR UNE HISTOIRE DÉSORIENTÉE DE L'ÉNERGIE* Jean-Baptiste Fressoz
4. Hirsh, F. Richard. Jones, F. Christopher. *History's contributions to energy research and policy*.
5. Araújo, Kathleen. *The emerging field of energy transitions: Progress, challenges, and opportunities*.
6. URL: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Outlook>
7. Sovacool, K. Benjamin. *How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions*.
8. Jakimowicz, A. *The Energy Transition as a Super Wicked Problem: The Energy Sector in the Era of Prosumer Capitalism*. Energies. 2022.
9. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Технологический_уклад
10. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Четвертая_промышленная_революция
11. Яковец Ю.В. *Циклы. Кризисы. Прогнозы*. – М., 1999.
12. Капица С. П. *Парадоксы роста: законы глобального развития человечества*. – М., 2012.
13. Орехов В.Д. *Прогнозирование развития человечества с учетом фактора знания: Монография*. – Жуковский: МИМ ЛИНК, 2015.
14. Щедровицкий П.Г. *Вверх и вниз по волнам промышленных революций* // URL: <https://shchedrovitskiy.com/app/uploads/vverh-i-vniz-po-volnam-promyshlennyh-revoljucij-1.pdf>
15. Уильямс Дж. *Лекция об истории энергетики* // URL: <https://energoworld.ru/blog/istoriya-energetiki/>
16. Холкин Д.В. *Интеллектуальная и гибкая система электроснабжения* // Разбор британского доклад «Smart Systems and Flexibility Plan 2021».
17. Холкин Д.В. и др. *Архитектура Интернета энергии (IDEA)*.