

Проблемы и методы решения для преимущественного использования возобновляемых источников энергии в ЕС

Рецензия эксперта на статью получена 25.07.2021 [The expert review of the article received on July 25, 2021].

Исследования, касающиеся возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в ЕС показали, что использование ветровой и фотоэлектрической энергии приобретает особое значение после постепенного отказа от использования ископаемых и ядерных источников энергии. В то время как использование биомассы, отходов и геотермальной энергии связано с определённым местом использования, электрическая энергия, выработанная ветром и солнцем, может передаваться на большие расстояния, даже через национальные границы, и храниться где угодно. Затраты по установке ветряных и фотоэлектрических систем, необходимых для преимущественно регенеративного энергоснабжения в ЕС, очень высоки, поскольку должны храниться большие объёмы генерируемой электроэнергии, чтобы обеспечить энергоснабжение потребителей в соответствии с потребностями. Использование аккумулирующих устройств требует в четыре раза больших мощностей энергоустановок. Сокращение необходимых установочных мощностей может быть достигнуто с помощью установок энергоснабжения, расположенных вблизи потребителей, и благодаря использованию различных источников энергии ветра.

Проблемы: на 2018 год энергия изведанных ископаемых источников энергии E_{R2018} в мире составила $41,45 \times 10^{15}$ кВт·ч (табл. 1) [1]. Предположим, что

$$E_{R2018} = E_{V2018} + E_{V2018} a_1 + E_{V2018} a_2 + \dots \quad (1)$$

где E_{V2018} — мировое потребление энергии в 2018 году.

Затраты по установке ветряных и солнечных систем, необходимых для преимущественно регенеративного энергоснабжения в Евросоюзе, очень высоки, поскольку большие объёмы генерируемой электроэнергии должны где-то храниться

С учётом того, рост потребления энергоресурсов составит $a_1 = 2\%$, а уменьшение их резервов $a_2 = 1\%$ в год:

$$a = \left(1 + \frac{a_1}{100\%}\right) \left(1 + \frac{a_2}{100\%}\right) = 1,0302. \quad (2)$$

Тогда по выражению (3) можно рассчитать период времени n , в течение которого эти ресурсы закончатся, считая с расчётного года:

$$n = \frac{\ln \left[\frac{E_{R2018} (a-1) + 1}{E_{V2018}} \right]}{\ln(a)} - 1 = \frac{\ln \left[\frac{41,45 \times 10^{15}}{159,5 \times 10^{12}} (1,0302 - 1) + 1 \right]}{\ln(1,0302)} - 1 = 72,28 \text{ года}. \quad (3)$$

Аналогичные расчёты, выполненные для 1987 года, дают отрезок времени:

$$n = \frac{\ln \left[\frac{1,5 \times 10^6}{10,47} (1,0302 - 1) + 1 \right]}{\ln(1,0302)} - 1 = 281 \text{ год}. \quad (4)$$

Следует отметить, что уменьшение временного интервала в 72,28 лет не исключено из-за роста численности населения, изменения климата и прочего.

УДК 620.92. Научная специальность: 05.14.08.

Проблемы и методы решения для преимущественного использования возобновляемых источников энергии в ЕС

Эдгар Харцфельд, Doctor of Engineering, Professor, Университет прикладных наук Штральзунда (г. Штральзунд, Германия); В. Ф. Белей, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электрооборудование судов и электроэнергетики», Калининградский государственный технический университет (КГТУ, Россия)

В работе дан анализ энергобаланса ЕС. Показано, что с целью уменьшения зависимости от использования ископаемых источников энергии планируется увеличение доли ВИЭ от 17 % в 2019 году до 67 % к 2070 году. Оставшаяся часть энергии может быть получена за счёт суперпозиции: использования энергии из других регионов мира с помощью системы аккумулирования энергии на основе метанола. Показано, что наилучшим вариантом передачи энергии от ВИЭ в ЕС является построение его энергосистемы на основе линий постоянного тока высокого напряжения (HVDC). При этом существующая сеть переменного тока на основе энергообъединения UCTE остаётся более низким уровнем новой энергосистемы. Отражено, что использование ВИЭ и систем аккумулирования энергии на основе метанола в региональных энергосистемах на третьем уровне иерархической системы ЕС позволит значительно повысить их энергобезопасность. Исследования экономической эффективности данного проекта требуют значительных инвестиций. Необходимые системы аккумулирования энергии на основе метанола составляют около 20 % от общего объёма инвестиций.

Ключевые слова: энергосистема, энергия, мощность, возобновляемые источники энергии, метанол, суперпозиция, линия постоянного тока.

UDC 620.92. Scientific specialty number: 05.14.08.

Challenges and solutions for the prior use of renewable energy sources in the EU

Edgar Harzfeld, Doctor of Engineering, Professor, Hochschule-Stralsund (Germany); V. F. Beley, Doctor of Science, Professor, Head of the Department of Electrical Equipment of Ships and Electrical Power Engineering, Kaliningrad State Technical University (Kaliningrad city, Russia)

The paper analyzes the energy balance of the European Union. It is shown that in order to reduce dependence on the use of fossil energy sources, it is planned to increase the share of RES from 17 % in 2019 to 67 % by 2070. The remaining part of the energy can be obtained through superposition: the use of energy from other regions of the world using a methanol-based energy storage system. It is shown that the best option for transferring energy from renewable energy sources to the EU is to build its power system based on high-voltage direct current (HVDC) lines. At the same time, the existing AC power connection network, based on the Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity (UCTE), remains a lower level of the new power system. It is reflected that the use of renewable energy sources and methanol-based energy storage systems in regional energy systems at the third level of the EU hierarchical system will significantly increase their energy security. Research on the economic efficiency of this project requires significant investments. The necessary energy storage systems based on methanol account for about 20 % of the total investment.

Key words: energy system, energy, power, renewable energy sources, methanol, superposition, DC transmission line.

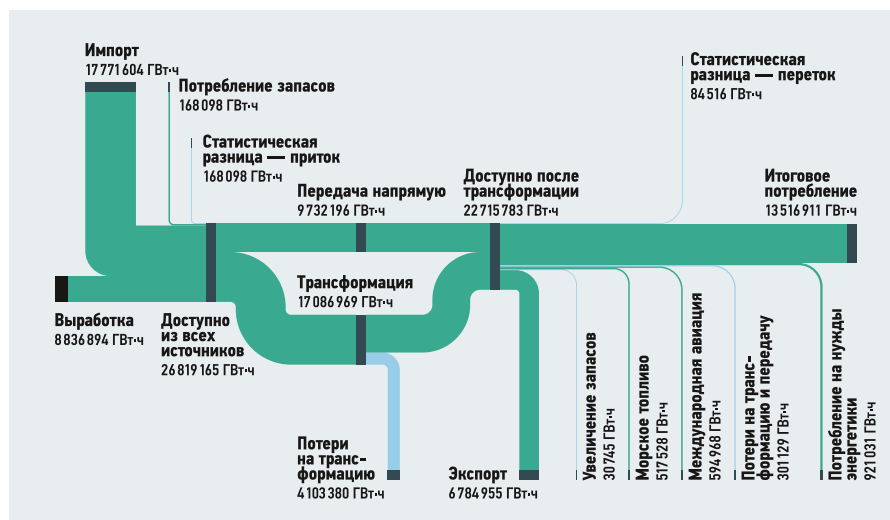


Рис. 1. Энергетический баланс Европейского союза (для 28 стран)

Потребность в электроэнергии

Анализ энергетических потребностей ЕС основан на первичной потребности в энергии, которая складывается из потребления ископаемого топлива, урана и возобновляемых источников энергии (рис. 1). Потребление ископаемого топлива и урана связано с удельной эффективностью преобразования энергии, которая определяется используемыми электростанциями, а регенеративная энергия от ветряных и фотоэлектрических установок может использоваться напрямую. Если рассматривать общие потребности ЕС, то в 2019 году использовано около 17% возобновляемой энергии и 83% ископаемой или ядерной энергии (рис. 2а).

Аккумуляция энергии и принцип суперпозиции

Чтобы ответить на вопрос о том, как наиболее устойчиво преобразовать энергообеспечение Евросоюза, система преобразования энергии была настроена так, чтобы были включены все возможные ВИЭ.

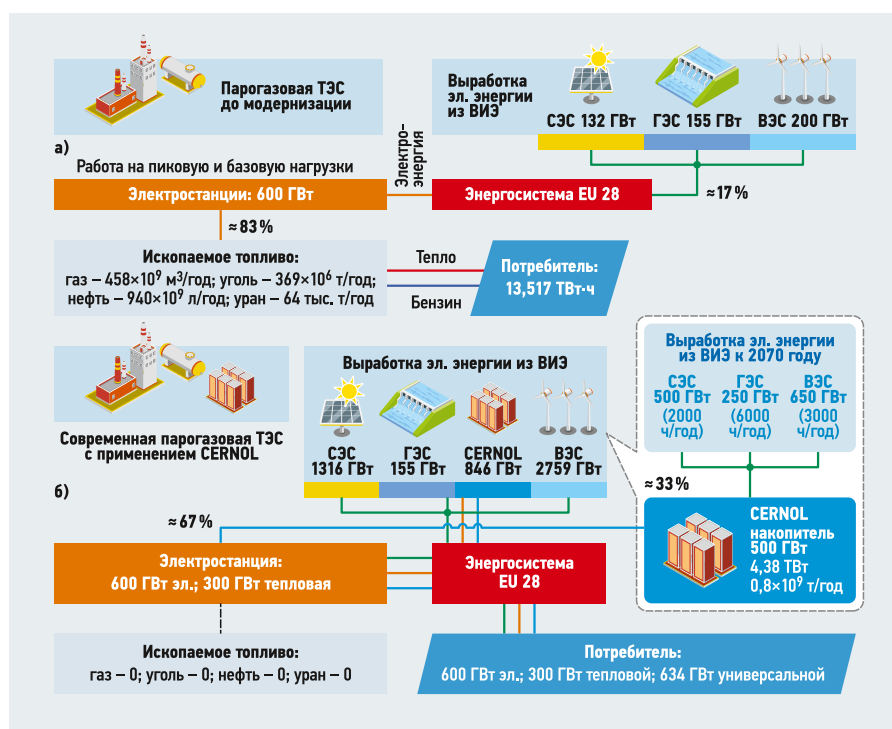


Рис. 2. Структура энергетического баланса Евросоюза на 2019 (а) и 2070 (б) годы

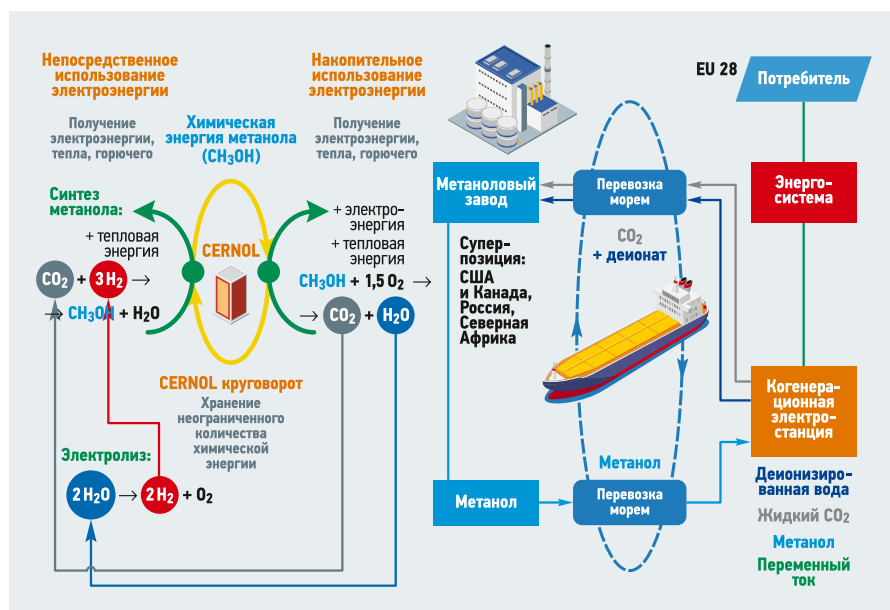


Рис. 3. Система получения, хранения и преобразования энергии метанола (а) и её реализация в международной энергетической стратегии (б)

При этом было установлено, что региональные энергетические ресурсы недостаточны для удовлетворения региональных энергетических потребностей. Кроме того, было выявлено, что только при использовании устройств аккумуляции можно достичь почти полного покрытия потребностей. Эксплуатация существующих систем аккумуляции связана с потерей энергии и привязана территориально. В итоге это приводит к увеличению установочных мощностей генерирующих установок, таких как ветряные и фотоэлектрические. Причём в то время, как фотоэлектрические системы занима-

ют очень много места и имеют небольшое количество часов полной нагрузки (около 1100 ч/год), то ВЭУ при потребности в небольших площадях обеспечивают в два-три раза большую полную загрузку — около 2500 ч/год.

Одним из эффективных способов аккумуляции энергии является система, базирующаяся на метаноле: синтез, хранение и транспортировка, преобразование в топливных элементах в электроэнергию (рис. 3а). Расчёты преимущественно регенеративного энергообеспечения Евросоюза учитывают возможность обмена энергией через границы ЕС. Рассматриваемый здесь обмен энергией предполагает, что обменная энергия генерировалась регенеративно и соответствует тем же стандартам, которые используются в ЕС для сферы использования возобновляемых источников энергии.

Особое преимущество использования энергетического обмена через границы Евросоюза, которое здесь называется суперпозицией, является результатом использования «различных источников энергии» (рис. 36). Под «различными источниками» понимается, в частности, использование источников энергии ветра и солнца. В то время как Гольфстрим является одним из наиболее важных источников ветра в ЕС, ветер Баренцева моря особо важен для Северной Европы.

Соединение этих источников ветра может способствовать увеличению вдвое количества часов полной нагрузки в узле запитки в Северной Германии (например, в Любмине). Это могло бы помочь вдвое снизить установочную мощность ВИЭ в Северной Германии. Этот эффект также может быть исследован для большого числа других мест, причём основной целью должно быть снижение пока ещё очень высокой установочной мощности ветровых и солнечных установок.

Результаты моделирования

Исходя из текущих потребностей Евросоюза в энергии потребуются очень высокие установленные мощности ветровой и солнечной энергии, которые, вероятно, неосуществимы. Это связано как с жизнеспособной окружающей средой и природой, так и с имеющимися для установки зонами. При условии, что принцип суперпозиции может быть одним из вариантов, расчёты моделирования для преимущественно регенеративного энергоснабжения в Европе показывают, что собственная доля регенеративного энергоснабжения составит около 67%, а суперпозиция около 33% в 2070 году (рис. 26). При этом доля суперпозиции подразделяется на разные регионы мира. Представленные здесь исследования касаются, в частности, Канады, США, России и Северной Африки. В качестве возобновляемых источников энергии здесь служат в основном гидроэнергия, энергия ветра и солнца. Поскольку необходимые источники энергии могут быть разработаны не обязательно самими регионами суперпозиции, потребуются значительные инвестиции, чтобы обеспечить разработку, использование и передачу или транспортировку.

Так как регионы суперпозиции неизбежно должны находиться в непосредственной близости от ЕС, то, возможно, потребуются исследования условий передачи или транспортировки. При этом в любом случае необходимо учитывать, что имеющиеся ресурсы требуемого сырья, такого как медь, цинк, алюминий, железо и другие металлы, ограничены.

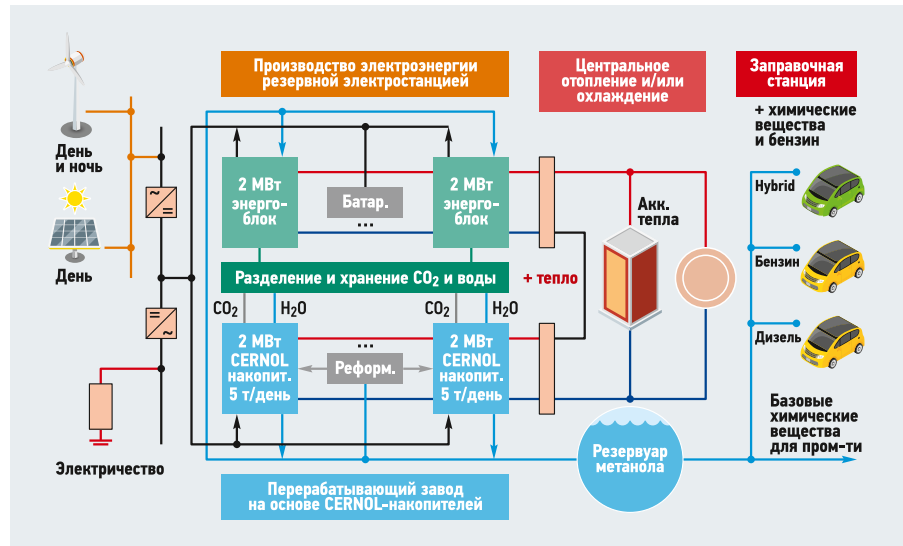


Рис. 4. Региональная энергетическая система

Наилучшим вариантом для передачи будущего первичного источника энергии (энергии ветра или фотоэлектрической) является передача постоянного тока высокого напряжения (High-Voltage Direct Current, HVDC). При этом вполне возможно включить трёхфазные передачи высокого напряжения для оптимизации поддержания напряжения.

Кроме того, также возможно установить аккумулирующие устройства уже в месте генерации энергии, которые преобразуют часть вырабатываемой энергии в легко сохраняемую среду — например, метанол. Тогда танкеры смогут транспортировать большие объёмы накопленной энергии в любую точку мира (рис. 36).

В Евросоюзе потребуются очень высокие и неосуществимые установленные мощности ВИЭ

Система передачи энергии

Развитие регенеративной энергии приводит к очень высоким установочным мощностям энергии ветра в Северной Европе и солнечной энергии в Южной Европе. Зимой возникают большие возможности выработки электроэнергии ветром, которую затем необходимо передать в Южную Европу из-за ограниченного числа хранилищ. А летом в Южной Европе имеются большие возможности выработки электроэнергии солнцем, которую необходимо передавать в Северную Европу. Большая часть энергетического обмена между Северной и Южной Европой может осуществляться через имеющуюся сеть, базирующуюся на основе энергообъединения стран ЕС — Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity (UCTE). Любые дополнительные резервные или высокоуровневые сети или резервные сети могут быть усилены до высоковольтных пере-

дач постоянного тока, при этом в странах с очень высокими потребностями в энергии региональные кольцевые сети HVDC могут обеспечивать стабильность в сетях более низкого уровня.

Система регионального энергоснабжения (система быстрого ожидания)

Поддержание или создание стабильности в высоко- и сверхвысоковольтных сетях играет в ЕС особую роль, особенно в условиях преимущественного энергоснабжения из ВИЭ. В то время как немногочисленные, но мощные концентраторы HVDC на уровне сверхвысокого напряжения обеспечивают возможность беспрепятственного протекания и распределения больших питающих мощностей из регенеративных источников по территории энергопотребления Евросоюза, децентрализованные региональные энергетические установки заботятся о том, чтобы полученная из регенеративных источников энергия могла храниться с максимальной эффективностью и при необходимости вновь возвращаться в сеть.

Система регионального энергоснабжения получает регенеративную энергию из ветровых и/или фотоэлектрических парков (рис. 4). Энергия передаётся через сеть высокого и/или среднего напряжения в место расположения региональной системы энергоснабжения. В месте расположения системы регенеративная энергия подаётся непосредственно в сеть потребителя, аккумулируется или возвращается обратно. Прямая подача используется, когда генерация и спрос совпадают. Если выработанной энергии много, то избыточная энергия сохраняется в региональной системе энергоснабжения с использованием технологии Power to Methanol. Данная технология состоит из выпрямительного блока, электролизной установки, блока синтеза метанола, системы резервуаров и установки регенерации.

Разведанные запасы ископаемых источников энергии в мире

табл. 1

Источник энергии	Нефть	Природный газ	Уголь
E_{R2018} , кВт·ч	$30,7 \times 10^{15}$	$2,16 \times 10^{15}$	$8,59 \times 10^{15}$

При этом избыточное электричество берётся из сети и используется для производства водорода. Поскольку водород очень сложно хранить, он связывается посредством углекислого газа в синтезе метанола (химическая формула CH_3OH) и преобразуется в «жидкий» энергоноситель, который может храниться в больших количествах без особых затрат.

Отметим, что химическая энергия, заключённая в стальном цилиндрическом резервуаре 20×6 м с метанолом, составляет приблизительно 8 ГВт. Европейский город средних размеров, такой как Штральзунд (Stralsund, Германия), потребляющий в среднем около 40 МВт·ч, может быть обеспечен бесперебойной подачей электроэнергии, тепла и топлива в течение более 100 ч или около четырёх дней, используя сохранённую химическую энергию. Кроме того, метанол является одним из основных соединений для химической промышленности, которое может использоваться повсеместно. Метанол может использоваться для производства не только бензина высшего качества или более качественного дизельного топлива, в данном случае диметилевого эфира (ДМЭ), но и всех других продуктов, которые ранее получались из нефти или природного газа.

Отсюда имеет смысл рассматривать новые технические системы энергоснабжения в качестве новых «автозаправочных станций» с подключением к системе централизованного теплоснабжения, которые могут накапливать избыточное электричество либо отдавать его обратно, а выработанное ими тепло будет доступно для систем централизованного теплоснабжения. Полученный метанол может использоваться и в качестве топлива для всех типов транспортных средств (бензиновых, дизельных или гибридных транспортных средств).

Для достижения ещё большей гибкости при хранении источника «жидкой» энергии, в данном случае метанола, можно также построить трубопроводное кольцо вокруг больших городов, которое соединит большую часть технических хранилищ, благодаря чему будет происходить постоянное выравнивание объёмов хранения накопителя энергии, в данном случае метанола. Это устранил необходимость в перевозках автоцистернами, и предприятия, потребляющие метанол, могут легко получать необходимый продукт.

Установки регенерации в региональной системе энергоснабжения могут не только полностью снабжать подключённую зону электроснабжения, но и способствовать установлению стабильности в «вышестоящей» высоковольтной сети.

Взаимодействие узлов HVDC и систем регионального энергоснабжения должно быть скоординировано, чтобы по возможности достигалось устойчивое использование хранилища, то есть при региональном избытке электроэнергии сначала региональные системы энергоснабжения, и лишь затем узлы HVDC принимают избыточное электричество и направляют его в другие регионы. Следует избегать регенерации электричества с целью питания узлов HVDC, поскольку дополнительные преобразования энергии могут привести к снижению уровня эффективности.

Экономичность

Исследования экономической эффективности использования ВИЭ в Европе показывают, что здесь требуются очень большие инвестиции. Инвестиции, в частности, связаны с расширением ветровой и фотоэлектрической энергетики. Ниже приведены результаты моделирования общего размера инвестиций в проект:

- инвестиции для материковой части — $I_{\text{осн.}} = 9,81 \times 10^{12}$ € (2070);
- поэтапные инвестиции — $I_{\text{позтап.}} = 3,14 \times 10^{12}$ € (2070);
- общие инвестиции — $I_{\text{общ.}} = 12,95 \times 10^{12}$ € (2070).

Следующие расчёты показывают влияние инвестиций на жителей Европы в зависимости от времени перехода на новую систему энергообеспечения:

$$C_{\text{жит.ЕС}} = \frac{I_{\text{общ.}}}{n_{\text{жит.ЕС}} t_{\text{время перех.}}} = \frac{12,95 \times 10^{12} \text{ €}}{513 \times 10^6 \times 50 \text{ лет}} = 505 \frac{\text{€}}{\text{год}};$$

$$E_{\text{жит.ЕС}} = 5000 \frac{\text{кВт·ч}}{\text{год}} \text{ (электр.+тепло+газ);}$$

$$k_{\text{перех.}} = \frac{C_{\text{жит.ЕС}}}{E_{\text{жит.ЕС}}} = \frac{505 \text{ €}}{5000 \text{ кВт·ч/год}} = 10 \frac{\text{€}}{\text{кВт·ч}};$$

$$c_{\text{пр-во}} = \frac{I}{E} \left(a + \frac{\beta}{100\%} + \frac{\gamma}{100\%} \right),$$

где I — инвестиции; E — энергопотребление ЕС; α — годовое изменение:

$$\alpha = \frac{(1+z)^n z}{(1+z)^n - 1} = \frac{(1+0,03)^{50} \times 0,03}{(1+0,03)^{50} - 1} = \frac{0,1315}{3,389} = 0,039 \frac{1}{\text{год}},$$

где z — процент ($z = 0,03$); n — количество лет ($n = 50$); β — обслуживание (2 % инвестиций в год); γ — страхование (2 % инвестиций в год);

$$c_{\text{пр-во}} = \frac{12,95 \times 10^{12} \text{ €}}{13,517 \times 10^{12} \frac{\text{кВт·ч}}{\text{год}}} \times (0,039 + 0,02 + 0,02) \frac{1}{\text{год}} = \frac{12,95 \times 0,079 \text{ €}}{13,517 \frac{\text{кВт·ч}}{\text{год}}} = 7,6 \frac{\text{€}}{\text{год}}.$$

Отсюда выгода составит:

$$P = (0,1 - 0,076) \frac{\text{€}}{\text{кВт·ч}} \times 13,517 \times 10^{12} \frac{\text{кВт·ч}}{\text{год}} = 0,3244 \times 10^{12} \frac{\text{€}}{\text{кВт·ч}} = 324,4 \frac{\text{млрд €}}{\text{кВт·ч}}.$$

Требуемые системы хранения метанола, как носителя энергии, занимают около 20 % от общего объёма инвестиций. Использование налаженной и устойчиво работающей сети передачи HVDC, а также множества региональных технических систем энергоснабжения позволяет стабильно и с низкими потерями передавать большие объёмы энергии от ветряных и солнечных станций на большие расстояния. Расположенные вблизи потребителей системы регионального энергоснабжения могут в полном объёме снабжать жилые районы, больницы, школы, субъекты малого и среднего предпринимательства (МСП), крупные предприятия, порты, аэропорты и других потребителей всеми необходимыми видами энергии (электрической, тепловой или химической).

Многочисленные синергии в использовании энергии приводят к высокой общей эффективности, которая помогает достичь ранней амортизации систем. Региональная система энергоснабжения с подключённой нагрузкой около 20 МВт может окупиться примерно через 5,7 года.

Итак, развитие энергосистемы Евросоюза в будущем основывается на преобладании в его энергобалансе возобновляемых источников энергии. Для реализации этой концепции показана необходимость построения: энергосистемы ЕС на основе линий постоянного тока высокого напряжения (HVDC) для передачи больших объёмов энергии; системы аккумулирования энергии на основе метанола, что позволит использовать принцип суперпозиции; региональных систем на основе использования в регионе ВИЭ и системы аккумулирования энергии на основе метанола, что позволит значительно повысить энергобезопасность всей системы. ●

1. Statistical Review of World Energy. BP p.l.c. Web-source: bp.com. Access data: June 25, 2021.
2. European Statistical Recovery Dashboard. Eurostat. Web-source: ec.europa.eu. Access data: June 20, 2021.

References — see page 79.

[Challenges and solutions for the prior use of renewable energy sources in the EU.](#)
[Pp. 74–77.](#)

Edgar Harzfeld, Doctor of Engineering, Professor, Hochschule-Stralsund (Germany);
Valery F. Beley, Doctor of Science, Professor, Head of the Department of Electrical Equipment of Ships and Electrical Power Engineering, Kaliningrad State Technical University (Kaliningrad city, Russia)

-
1. Statistical Review of World Energy. BP p.l.c. Web-source: bp.com. Access data: June 25, 2021.
 2. European Statistical Recovery Dashboard. Eurostat. Web-source: ec.europa.eu.