

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ, КАК ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ НЕЗАВИСИМОСТИ УКРАИНЫ

У статті проведено аналіз стану, проблем та перспектив розвитку сучасної електроенергетики. Визначено напрямки її розвитку з урахуванням вибору техніко-економічного сценарію розвитку, супутніх факторів і їх взаємного впливу. Метою роботи було визначення перспективних напрямків сталого розвитку національної електроенергетики щодо забезпечення енергетичної безпеки України, проведення порівняльного аналізу джерел електроенергії, підтвердження необхідності вдосконалення основних джерел – турбогенераторів. Визначено внутрішні та зовнішні загрози енергетичній безпеці України. Встановлено переваги і недоліки, світові тенденції подальшого використання сучасних джерел електроенергії - теплових (включаючи атомні) електростанцій і станцій від поновлюваних джерел енергії. Встановлено, що в зв'язку з активним ростом населення планети і зі збільшенням його енергетичної активності електроенергії від поновлюваних джерел енергії буде недостатньо, що найближчі 20-30 років основними джерелами електроенергії будуть атомні електростанції і це підтверджує необхідність проведення робіт по вдосконаленню турбогенераторів. Встановлені напрями вдосконалення конструкцій турбогенераторів і систем охолодження. Зазначено, що вдосконалення турбогенераторів вимагає одночасного підвищення ефективності і систем, що забезпечують їх роботу: систем постачання газом, водою і маслом, системи збудження. Показана необхідність повного впровадження автоматичного контролю стану турбогенераторів, використання прийомів сучасної технічної діагностики найбільш напружених вузлів і елементів як в режимі online, так і при проведенні планових і аварійних ремонтів. Підтвердження необхідності проведення робіт по вдосконаленню вітчизняних турбогенераторів викликано появою в загальній енергосистемі України нових типів електроенергетичних джерел, які користуються активною державною підтримкою. Відзначена перспективність використання поновлюваних джерел енергії з точки зору зниження екологічних проблем, але лише для індивідуальних споживачів. Проаналізовані переваги, недоліки і проблеми використання поновлюваних джерел енергії, які найбільш прийнятні для України. Бібл. 43, табл. 3, рис. 5.

Ключові слова: електроенергетика, енергетична незалежність, турбогенератор, енергозбереження, екологія, технічна діагностика, масогабаритні показники, підвищення потужності, поновлювані джерела енергії.

В статье проведен анализ состояния, проблем и перспектив развития современной электроэнергетики. Определены направления ее развития с учетом выбора технико-экономического сценария развития, сопутствующих факторов и их взаимного влияния. Целью работы являлось определение перспективных направлений устойчивого развития национальной электроэнергетики с целью обеспечения энергобезопасности Украины, проведение сравнительного анализа источников электроэнергии, подтверждение необходимости совершенствования основных источников – турбогенераторов. Установлены достоинства и недостатки, мировые тенденции дальнейшего использования современных источников электроэнергии – тепловых (включая атомные) электростанций и станций от возобновляемых источников энергии. Определены внутренние и внешние угрозы энергетической безопасности Украины. Установлено, что в связи с активным ростом населения планеты и с увеличением его энергетической активности электроэнергетики от возобновляемых источников энергии будет недостаточно, что ближайшие 20-30 лет основными источниками электроэнергии будут атомные электростанции и это подтверждает необходимость проведения работ по совершенствованию турбогенераторов. Установлены направления совершенствования конструкций турбогенераторов и систем охлаждения. Отмечено, что совершенствование турбогенераторов требует одновременного повышения эффективности и систем, обеспечивающих их работу: систем снабжения газом, водой и маслом, системы возбуждения. Показана необходимость полного внедрения автоматического контроля состояния турбогенераторов, использования приемов современной технической диагностики наиболее напряженных узлов и элементов как в режиме online, так и при проведении плановых и аварийных ремонтных работ. Подтверждение необходимости проведения работ по совершенствованию отечественных турбогенераторов вызвано появлением в общей энергосистеме Украины новых типов электроэнергетических источников, которые пользуются активной государственной поддержкой. Отмечена перспективность использования возобновляемых источников энергии с точки зрения снижения экологических проблем, но только для индивидуальных потребителей. Проанализированы преимущества, недостатки и проблемы использования возобновляемых источников энергии, которые наиболее приемлемы для Украины. Библ. 43, табл. 3, рис. 5.

Ключевые слова: электроэнергетика, энергетическая независимость, турбогенератор, энергосбережение, экология, техническая диагностика, массогабаритные показатели, повышение мощности, возобновляемые источники энергии

В работе используются сокращенные обозначения: ТГ – турбогенератор; АЭС – атомная электростанция; ТЭС – тепловая электростанция; ТЭЦ – теплоэлектроцентраль; ГЭС – гидроэлектростанция; ВИЭ – возобновляемые источники энергии; ВЭУ – ветроэнергетические установки; ОЭСР – Страны – члены Организации экономического сотрудничества и развития; ВТСП – высокотемпературный сверхпроводник; НТСП – низкотемпературный сверхпроводник.

Введение. В большинстве стран мира электроэнергетику рассматривают как самый важный сектор национальной экономики. Поэтому целью настоящей работы является определение перспективных направлений устойчивого развития национальной электроэнергетики с целью обеспечения энергобезопасности

Украины, проведение сравнительного анализа источников электроэнергии и подтверждение необходимости совершенствования основных источников – ТГ. При этом главный вопрос, одна из наиболее серьезных проблем для любого национального производителя – это энергосбережение [1-4]. Решение задачи энергосбережения особенно важно для Украины, где в настоящее время на производство единицы ВВП в среднем расходуется почти в 3 раза больше энергоресурсов, чем в европейских странах [1, 3, 5]. Энергосбережение входит в число важнейших факторов, способствующих повышению уровня энергетической безопасности, которое и для стран-экспортеров, и для стран-импортеров энергетических ресурсов является одним из важней-

ших элементов устойчивого экономического развития. Очевидно, что трудно решать проблему обеспечения энергетической безопасности страны, если энергоснабжение полностью или в значительной степени зависит от внешних поставщиков [3, 5]. Для Украины, как и для всех стран, основным требованием при выборе направлений развития электроэнергетики является надежное и эффективное энергообеспечение промышленности и населения с обязательным учетом требований экологической безопасности и социальной стабильности. Перспективные задачи энергетики едины для всех стран: это поиск новых источников и технологий получения электроэнергии, непрерывное увеличение объемов выработки, повышение эффективности при передаче и распределении, снижение потерь на всех указанных этапах [6-8].

При выборе направлений развития электроэнергетики необходимо учитывать весь комплекс факторов и их взаимное влияние: техническое состояние электрооборудования, национальные направления и приоритеты совместного развития экономики и промышленности; политические, экологические, демографические проблемы; технологические и ресурсные возможности не только электромашиностроительной промышленности, но и сопутствующих отраслей: турбиностроения, предприятий по созданию управляемых реакторов, добычи и переработки урана [5, 8].

В настоящее время необходимо выбрать: продолжать развитие разных направлений или развивать одно, конкретное направление; совершенствовать и развивать моно-энергетику с глобализацией в национальных масштабах или отдать приоритет развитию поли-энергетики (мини- и микро-ГЭС, солнечная и ветроэнергетика, мини-ТЭЦ и т.д.).

С конца 90-х годов XX века во всех странах особое внимание (и правительственная материальная поддержка) уделяется энергетике от ВИЭ, «зеленой энергетике» [2, 5]. Это важное направление, но оно не обеспечит возрастающие потребности населения планеты в электроэнергии, которые постоянно увеличиваются, особенно с учетом непрерывного увеличения удельного энергопотребления во всех странах мира, рис. 1, рис. 2, табл. 1 [3, 9, 10].



Рис. 1. Прогноз ежегодного роста спроса на электроэнергию (удельное энергопотребление), 2010-2040 годы

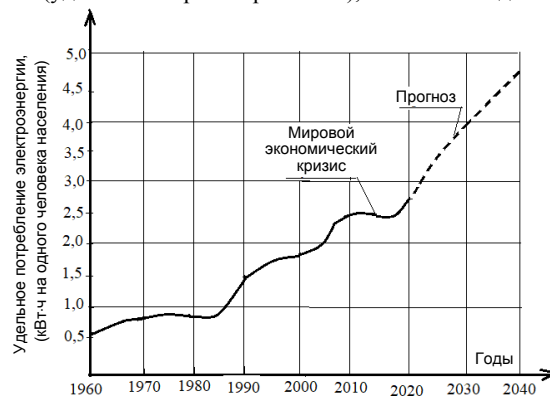


Рис. 2. Мировой рост удельного потребления электроэнергии (кВт·ч на одного человека населения)

Таблица 1

Проект существующего и перспективного роста численности населения и спроса на основные виды энергии в 2030 г.

№	Показатель	Мировые темпы прироста населения и спроса на основные виды энергии, % к уровню 1970 г.		
		1970-1990	1990-2010	2010-2030 (прогноз)
1	Количество населения	+1,8	+1,4	+1,0
2	ВВП	+3,5	+3,2	+4,0
3	Электроэнергия	+2,6	+3,2	+3,9
4	Энергия на душу населения	+0,5	+0,5	+0,7
5	Энергоемкость ВВП	-0,9	-1,4	-2,0

Анализ возможных сценариев и направлений развития мировой энергетики и энергетики Украины. В выбранной модели технико-экономического развития государства возможны разные сценарии: неблагоприятный (пессимистический), благоприятный (умеренный), максимально благоприятный (оптимистичный) [8-10]. Наиболее приемлемым для Украины, учитывая существующие внутренние и внешние факторы, является, на наш взгляд, умеренный сценарий, но и его реализации требует значительных структурных реформ. В долгосрочной перспективе развитие отечественной экономики и энергетики будет определяться сочетанием трех принципов – статического, циклического и динамического [9, 11-14]. Согласно этим принципам, в Украине до 2050 г. будет преобладать инерция экономического и энергетического развития с последующим циклическим повторением на более высоком уровне, а динамический принцип заставляет ожидать в перспективе острый комплексный

кризис, который разрешится, скорее всего, полной сменой направлений развития энергетики. За последние 100 лет можно отметить три подобных кризиса: начала 1930-х, начала 1970-х и кризис конца 2010-х годов [9, 11].

Кризис начала 1930-х годов привел к ускоренной индустриализацией и резкому росту спроса на электроэнергию и на продукты переработки нефти для промышленности. Кризис начала 70-х годов был вызван переходом США и Западной Европы к модели постиндустриального развития и окончанием холодной войны. При этом активизировалось частное предпринимательство, отмечено ускорение развития атомной энергетики, возрос спрос на газ, как на основное топливо для энергетики и т.д. В ходе кризиса темпы роста мирового энергопотребления снижаются и могут даже стать отрицательными, но после кризиса всегда наблюдается устойчивый рост (рис. 3) [9].

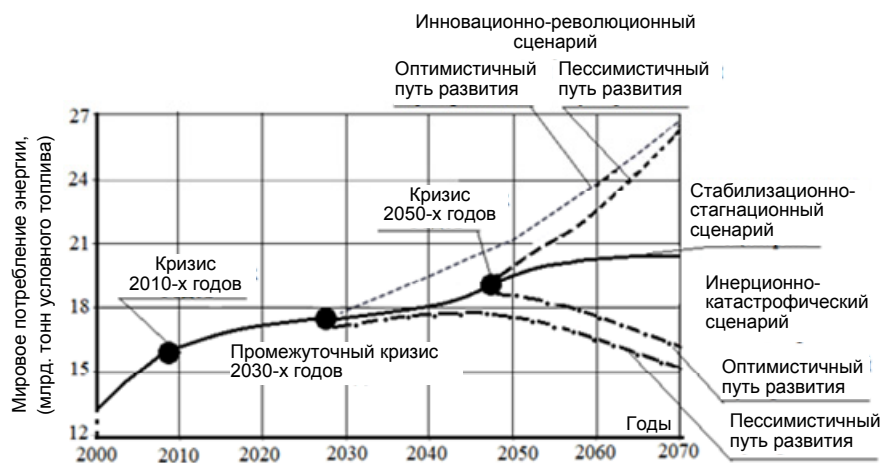


Рис. 3. Изменения в потреблении электроэнергии при различных сценариях развития электроэнергетики

Кризис конца 2010-х годов вызвал необходимость переоценки и прогнозирования новых направлений развития энергетики. Теоретической базой прогнозирования была выбрана теория циклического развития (теория «длинных волн» Н. Кондратьева), которая снижает ошибочность прогнозирования, позволяет учитывать экономические кризисы, требования энергосбережения и экологической безопасности, повышает точность определения стратегических проблем и объем достаточных инвестиций. Согласно этой теории, циклы развития экономики, промышленности и энергетики имеют продолжительность 50-55 лет и определяются [9, 11]:

- 1) случайными и временно действующими факторами (стихийные бедствия, войны, аварии);
- 2) постоянно действующими нециклическими факторами (научно-технический прогресс, демография, наличие и доступность природных ресурсов);
- 3) постоянно действующими циклическими факторами (для ТГ это электромагнитные и тепловые воздействия, вибрация, «старение»).

Анализ динамики развития энергетики, с учетом существующей цикличности, позволяет ожидать к 2040-2050 годам следующий кризис мировой экономики и энергетики, который приведет к новыми качественными, интеллектуальными, энергоинформационными уровнями в энергетике [9, 14-16].

После выхода из очередного кризиса каждому государству следует выбирать сценарии развития национальной энергетики из трех возможных вариантов:

- 1) инерционно-катастрофический;
- 2) стабилизационно-стагнационный;
- 3) инновационно-революционный.

Каждый сценарий имеет свои особенности и пути разрешения противоречий, свои масштабы спроса на энергоносители, особенности развития технологий производства первичных энергоресурсов и их потребления (см. рис. 3). Для каждого сценария характерно наличие двух этапов: первый, сохраняющий определенную инерционность предыдущего сценария, и второй, на котором инерция исчерпывается, наступает период стагнации с признаками скрытого или явного энергетического кризиса, а затем энергетика переходит в качественно новое состояние. На последнем этапе идет внедрение инноваций в науку и технику,

происходит максимальный подъем промышленности, формируются новые вопросы, которые на следующем этапе (цикле) необходимо решать и которые определят дальнейшее развитие [11, 12, 16].

Наиболее прогрессивным в вопросах развития энергетики является инновационно-революционный сценарий. Он предполагает качественные изменения современных направлений уже к 2020-2030 годам за счет совершенствования технологии получения электроэнергии, ее передачи и конечного потребления. В этом сценарии ключевыми тенденциями развития мировой энергетики будет повышение инвестиционной активности, развитие и внедрение новых технологий, увеличение доли электроэнергии в общем объеме используемой энергии, радикальное снижение потребления энергоресурсов, [4, 9, 14-16]. Инновационно-революционный сценарий предполагает формирование энергетики нового типа в развитых и в развивающихся странах; рост объема электроэнергии в общем мировом конечном энергопотреблении от 21,7 % (2010 г.) до 28,6 % (2030 г.) и до 36,8 % в 2050 г.

Можно ожидать, что к 2050 г. развивающиеся страны достигнут современного стандарта энергопотребления стран Европы и США, равного 5 МВт·час на человека в год. Количественные различия снизятся, но усилятся качественные различия, т.к. можно предположить, что после 2030 г. в развитых странах начнется формирование энергетических систем нового поколения, основанных на технологиях «умных сетей». И, несмотря на непопулярность, можно ожидать повышение роли атомной энергетики: практически вдвое – к 2030 г. и четверо – к 2050 г., т.к. только АЭС, как источники электроэнергии, смогут обеспечить ее необходимый объем, [6, 8, 10, 14, 17]. Ожидается, что развитие при этом получат: «тепловые» реакторы 3-4 поколения; реакторы на быстрых нейтронах; реакторные установки В-392, в которых используются новые решения для увеличения проектного срока службы корпуса реактора до 60 лет; «малая атомная энергетика», что несколько снизит потребление урана («урановая проблема») и проблемы хранения и переработки отработанного ядерного топлива. Можно считать, что ближайшие 20-30 лет атомная электроэнергетика – высокопроизводительная, с низким уровнем выбросов веществ, загрязняющих атмо-

сферу, и практически неограниченными запасами топлива, – будет основным источником электроэнергии [16, 18, 19].

Вместе с тем, для Украины инновационно-революционный сценарий развития энергетики, экономики и промышленности недостижим по технико-экономическим и политическим показателям. Украина по макроэкономическим показателям является одной из самых бедных европейских государств, с низкими доходами населения, что приводит к отсутствию социального и экономического фундамента устойчивого развития. По данным International Finance Corporation [12, 17], энергоемкость валового внутреннего продукта (ВВП) на 1 USD в нашей стране приблизительно в 2-3 раза выше, чем в развитых европейских государствах. Поэтому, можно утверждать, что для Украины наиболее вероятен стабильно-стагнационный сценарий развития [9, 18]. При этом, пока нет новых источников электроэнергии и устойчивых систем ее аккумулирования, следует продолжать развивать атомную энергетику и поддерживать в рабочем состоянии тепловую (ТЭС, ТЭЦ) с обязательным соответствием национальной экологической политики мировым требованиям: Киотскому протоколу (2005 г.) и Конференции по климату в Париже (Парижское соглашение, 12.12.2015 г.) [18-20].

Следует отметить, что существуют угрозы энергетической безопасности Украины, как внутренние, так и внешние. Морально и физически устаревшее электрооборудование энергетического комплекса, устаревшие технологические линии для изготовления нового оборудования, зависимость от экспорта как оборудования, так и топливных ресурсов, недостатки обслуживания, диагностики и ремонта привело к тому, что энергосистема Украины имеет одни из наибольших потерь электроэнергии в цикле «выработка – передача – распределение – потребление», ставит вопрос энергетической безопасности страны. Например, потери энергии в распределительных сетях доходят до 25 % [5, 21].

К внутренним факторам относятся:

- чрезмерная энергоемкость ВВП, которая за последние годы выросла в 1,5 раза. Расходы энергоносителей на изготовление основных видов электротехнической продукции в Украине в 3,5-9 раз выше, чем в развитых странах мира [4, 16, 22];
- износ основных фондов топливно-энергетического комплекса [16];
- недостаточный объем инвестиций в электроэнергетику, в том числе в развитие электромашиностроения и в обновление оборудования электростанций, в научные исследования, в совершенствование технологических процессов на промышленных предприятиях и в систему образования [4, 23];
- несовершенство нормативно-правового обеспечения деятельности отрасли в рыночных условиях, кризис платежей на всех уровнях [4, 13].

К внешним факторам следует отнести высокий уровень монополизации в электроэнергетическом секторе, нерегулируемые государством поставки импортных топливно-энергетических ресурсов и электрооборудования [16, 24], а также зависимость атомной энергетики, основного поставщика электроэнер-

гии в Украине, от импорта ядерного топлива и оборудования, существующие проблемы хранения отработанного ядерного топлива и ядерных отходов [8, 16, 24]. Следует отметить и более удаленные проблемы атомной энергетики: вывод из эксплуатации блоков АЭС, которые отработали срок (с учетом возможного продления этого срока), и задачи их последующего содержания. Это общая проблема, над решением которой работают во всем мире.

Можно сделать вывод, что направление развития электроэнергетики носит явно выраженный национальный характер, но очевидно, что при любом сценарии развития и любом технико-экономическом состоянии государства непрерывно должны вестись работы по совершенствованию ТГ – основных источников электроэнергии еще на очень длительное время [16]. Для электроэнергетики Украины при постройке новых блоков и модернизации работающих необходимо использовать ТГ большей единичной мощности, продолжать работы по их совершенствованию. Это обеспечит страну достаточным объемом электроэнергии, т.е. обеспечит ее энергетическую независимость, а также ТГ станут предметом экспорта во многие страны мира, что сохранит значимость украинской продукции на мировом рынке [16, 25].

Такая оценка будущего атомной электроэнергетики может вызывать вопросы и возражения на фоне всеобщего увлечения «зеленой» энергетикой. Но уже в 2018 г. МАГАТЭ пересмотрело свои прогнозы развития ядерной энергетики. МАГАТЭ прогнозирует рост производства энергии на АЭС до 2050 г.: при оптимистическом сценарии – 3969 ТВт·час в 2030 г. (11,5 % общего мирового объема производства электроэнергии) и 6028 ТВт·час в 2050 г. (11,7 %). При пессимистическом сценарии эти цифры составят 2732 ТВт·час в 2030 г. (10,3 % мирового объема генерации электроэнергии) и 2869 ТВт·час в 2050 г. (5,6 %) [8, 10, 13, 26].

Сегодня в мире насчитывается 450 действующих энергоблоков АЭС. По мнению экспертов, расширение мощностей в настоящее время, а также ближайшие и долгосрочные перспективы роста характерны, главным образом, для Азии. Из 34 строящихся реакторов 19 находятся в Азии, там же размещены 28 из введенных в последнее время в эксплуатацию 39 реакторов, которые были подключены к энергосетям [26]. Большая часть энергоблоков эксплуатируется в США (100), Франции (58), Японии (43), России (36) и в Китае (36). Общая генерирующая мощность АЭС составляет свыше 392 ГВт. С 2018 г. ввод новых мощностей составил 302 ГВт, из эксплуатации выведено 117 ГВт, в результате чистый прирост установленных мощностей АЭС равен 185 ГВт [10, 24]. По прогнозам, к 2030 г. суммарная мощность ядерных установок (при инновационно-революционном сценарии развития) возрастет на 88 % [24].

Катастрофы на Чернобыльской АЭС (1986 г.) и на АЭС «Фукусима-1» (2011 г.) привела к переосмыслению идеи о том, что атомная генерация – это безопасный способ получения электроэнергии. В результате власти Японии приняли решение вести работы по закрытию всех атомных реакторов в стране. Германия, которая до катастрофы была одним из крупнейших потребителей атомной энергии, в настоящее вре-

мя закрыла 8 из 17 реакторов. Другие европейские страны также сократили свои планы по развитию атомной энергетики. Однако, это не заставило некоторые страны отказаться от планов по строительству АЭС в дополнение к существующим ГЭС и ТЭС (на угле и газе). В ряде стран, где недостаточно углеводородных ресурсов, атомная энергетика воспринимается, как эффективный и экономичный способ получения электроэнергии. Всемирная ядерная ассоциация (World Nuclear Association, WNA) заявляет, что более 45 стран активно стремятся к развитию ядерных программ [10, 18, 24, 26].

Одним из дополнительных факторов, подтверждающих необходимость строительства новых блоков АЭС, можно считать недопустимость строительства блоков ТЭС, потому что именно выбросы ТЭС определяют основную угрозу экологии. Следует отметить, что для стран с развитой ядерной энергетикой технологии утилизации радиоактивных отходов менее затратны, чем технологии утилизации отходов ТЭС, направленные на снижение вредных выбросов до необходимых уровней [18, 27].

Получение электроэнергии от возобновляемых источников энергии (ВИЭ) можно считать перспективной альтернативой. Согласно прогнозу Мирового Энергетического Совета (World Energy Council, WEC), на долю энергии от ВИЭ к 2025 г. будет приходиться 1150-1450 млн. т. условного топлива (5,6-5,8 % общего энергопотребления) [8, 13]. При этом ожидается, что доля отдельных видов составит: биомасса – 35 %, солнечная энергия – 13 %, гидроэнергия – 16 %, ветроэнергия – 18 %, геотермальная энергия – 12 %, энергия океанов – 6 %. Планировалось, что к 2030 г. альтернативные источники могут дать до 40-50 % энергии современного уровня ее потребления, что наибольший прирост производства электроэнергии до 2040 г. определяют развивающиеся страны Азии (до 45 % от мировой выработки электроэнергии, [15]) и что к 2040 г. мировое производство электроэнергии от ВИЭ, превысит 50 %. Предполагают, что в странах Европы доля ВИЭ (с учетом гидроэнергии) достигнет 68-72 %, а только ВИЭ (без гидроэнергетики) обеспечат от 51-56 %. Т.е. Европа станет вторым регионом после Центральной и Латинской Америки, в котором до 2040 г. ожидается получение большей половины электроэнергии за счет неископаемого топлива (все виды ВИЭ, включая гидроресурсы) [12]. В то же время, согласно прогнозу, ожидается, что к 2040 г. доминирующим источником генерации в развивающихся странах Азии останется уголь; в Северной Америке, на Ближнем Востоке и в Африке – газовые ТЭС; в Южной и Центральной Америке первое место сохранится за выработкой электроэнергии на гидроэлектростанциях, и только в Европе основными могут стать ВИЭ. Поэтому утверждение, что без альтернативных атомной энергетике источников энергии у человечества нет будущего, является, на наш взгляд, слишком категоричным, но это только лишний раз подчеркивает необходимость поиска, исследования и внедрения новых источников электроэнергии, например, водородной энергетике или энергии управляемого термоядерного синтеза.

Основными недостатками ВИЭ следует считать низкую удельную плотность и непостоянство выработки электроэнергии, зависимость от погодных условий, времени года и суток, невысокий коэффициент полезного действия (за исключением гидроэлектростанций), высокая стоимость при малой единичной мощности энергоустановок. Непостоянство первичных энергоресурсов (ветер, солнце), вплоть до полного отсутствия, вызывает необходимость устанавливать и обслуживать дополнительные аккумуляторы энергии и/или резервные источники. В результате, стоимость производимой энергии оказывается высокой даже при отсутствии топливной составляющей в конечной цене электроэнергии.

Низкая удельная мощность ВИЭ требует увеличение количества энергоустановок. Например, среднегодовое значение удельной мощности солнечных батарей для самых солнечных районов земного шара (с учетом сезонных и погодных колебаний) не превышает 250 Вт/м², а на территории Украины средняя плотность солнечного излучения на поверхности земли в полдень ясного дня составляет около 120 Вт/м². В наших широтах даже в безоблачную погоду солнечные батареи редко работают на полную мощность, в среднем этот показатель составляет 50-60 % летом и 10-15 % зимой, т.е. панель мощностью 275 Вт в летний день будет генерировать около 140-145 Вт·час. В среднем в Украине солнечная панель мощностью 1 кВт в год вырабатывает 1100 кВт·час электроэнергии (рис. 4) [2, 16, 28]. Аналогично, и ветроэнергетика имеет низкую удельную мощность: средняя удельная плотность энергии потока ветра, как правило, не превышает нескольких сотен Вт/м². При скорости потока ветра 10 м/с удельная плотность энергии будет около 500 Вт/м².

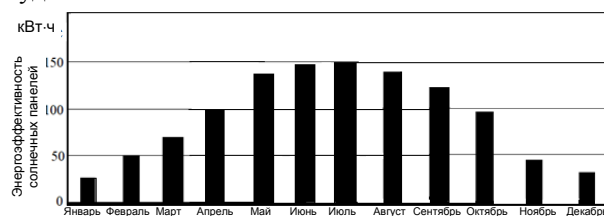


Рис. 4. Среднее выработки электроэнергии солнечными панелями в Украине на 1 кВт установленной мощности

В Украине только в некоторых регионах (4 % территории) устойчивая скорость ветра («роза ветров») составляет 4-4,5 м/с, поэтому удельная плотность энергии незначительна, до 100 Вт/м². Для сравнения, плотность энергии водного потока, имеющего скорость 1 м/с, составляет около 500 Вт/м², а плотность теплового потока, который «давит» на стенки паровых котлов ТЭС и АЭС, достигает нескольких сотен кВт/м² [16, 29, 30].

Пандемия Covid-19 (2020-2021 гг.) внесла изменения в прогнозы развития электроэнергетики, вызвала больше нарушений в энергетическом секторе, чем любое другое событие, и следует ожидать, что ее последствия будут ощущаться еще долгие годы. Пока трудно оценить, как повлияет настоящий кризис на развитие электроэнергетики: ускорит или замедлит создание безопасной и устойчивой энергетической системы. Пандемия еще не завершилась, что вносит

неопределенность в вопросы энергопотребления, и, вероятно, важные решения в области энергетической политики прогнозировать рано. Кроме того, экономический кризис вызывает значительные изменения в стратегической ориентации энергетических компаний и инвесторов, в активность потребителей энергии. В Программе «Перспективы развития мировой энергетики» [3, 12, 21], заложены два возможных сценария: оптимистичный (The Stated Policies Scenario, STEPS – сценарий перспективной политики) и пессимистичный (Delayed Recovery Scenario, DRS – сценарий отложенного восстановления). Согласно прогнозу STEPS, мировой спрос на энергию восстановится до уровня начала пандемии к началу 2023 г., но в случае затяжной пандемии ожидается еще больший спад (согласно DRS) и спрос восстановится только к 2025 г.

До эпидемии был составлен прогноз, что потребление электроэнергии за период 2019-2030 гг. вырастет на 12 %. В настоящее время прогноз прироста изменился до 9 % (STEPS) или до 4 % (DRS). И этот рост в основном будет определяться развивающимися странами (Китай, Индия). В странах с развитой экономикой спрос на электроэнергию снижается, сокращаются инвестиции в энергетику, в производство новой техники, уменьшаются объемы строительных работ [24]. Но при любых сценариях и особенностях текущего периода все исследователи прогнозируют рост энергопотребления. Поэтому можно утверждать, что ближайшие 20-30 лет, со всем пониманием проблем атомной энергетики, ежедневное, устойчивое обеспечение электроэнергией населения планеты будет обеспечиваться АЭС, т.е. ТГ, установленными на блоках [8, 13, 19, 24].

Основные направления и проблемы создания современных ТГ. В мировой практике с середины прошлого века единичная мощность ТГ возросла в 7-7,5 раз, от 200 до 1500 МВт, а если вести отсчет от 1898 г., когда фирма Charles Brown (с 1971 г. Abegg and Rauhut) выпустила первый 6-ти полюсный ТГ мощностью 100 кВА, мощность увеличилась в 15000 раз. При этом увеличивались габариты и масса ТГ, что в определенный момент создало проблему их создания и перевозки по железной дороге и определило задачу минимизации объема и веса при возрастающей мощности. До 2000 г. недостаточная мощность электрических сетей также ограничивала мощность ТГ, т.к. при аварийном отключении мощного генератора возникали проблемы с устойчивостью работы сети. В настоящее время общая мощность электрических сетей стала выше, они стали устойчивее к внезапным отключениям генерирующих единиц, и увеличение мощности ТГ стало возможным. Перспективность увеличения мощности подтверждается и международной практикой (фирмы Siemens, ABB Alstom Power, Hitachi, General Electric, Westinghouse): в Великобритании и США проектируют ТГ мощностью 2000 МВт, во Франции уже работают два ТГ мощностью 1550 МВт, «General Electric» разрабатывает два ТГ мощностью 1750 МВт для китайских АЭС. Следует подчеркнуть, что все мировые фирмы ориентируются на 4-х полюсное исполнение генераторов [16, 30-33].

Для увеличения мощности логично было бы увеличить габариты и вес машин, но, как было указано, это усложняет их изготовление и транспортировку, увеличивает стоимость. Поэтому увеличение мощности в настоящее время рассматривается без изменения габаритов. При проектировании учитываются технологические возможности смежных производств: возможности металлургических предприятий, предприятий турбиностроения, предприятий по созданию управляемых ядерных реакторов, возможность транспортировки ТГ к потребителю [34-36]. Увеличение мощности целесообразно и с точки зрения экономических показателей. Например, общая масса, стоимость и потери нескольких ТГ всегда больше массы, стоимости и потерь одной машины такой же мощности. Подсчитано, что при использовании одного ТГ вместо нескольких, мощность которых в сумме равна мощности одного ТГ, масса, стоимость и потери уменьшаются примерно в $\sqrt[4]{m}$ по сравнению с такими же показателями m ТГ меньшей мощности. На примере ТГВ-300-2 показана возможность увеличения мощности от 300 МВт до 500 МВт за счет изменения электромагнитных и геометрических параметров конструкции (в допустимых пределах) практически с сохранением габаритов [16].

На электростанциях каждой энергосистемы работает сотни ТГ, т.е. любой ТГ на блоке работает параллельно с другими генераторами энергосистемы. Для стабильности работы все они должны генерировать согласованное напряжение, иначе между машинами, работающими параллельно на одну электрическую сеть, возникнут уравнивающие токи. Для этого роторы всех генераторов должны вращаться с синхронной скоростью и в каждый момент времени занимать определенное угловое положение. В случае потери устойчивости происходит массовое отключение генераторов, энергосистема «разваливается». Именно из-за этого в 1965 г. в США произошла крупная авария [37]. 7 штатов с населением около 30 млн. человек остались без электричества, ущерб превысил 100 млн. USD. Единственная часть энергосистемы, которая не пострадала, – это район форта Эри возле Буффало (штат Онтарио), который питался от старых генераторов с частотой 25 Гц. В течение 5 мин в системе распределения электроэнергии на северо-востоке США царил хаос, так как из-за перегрузок, которые каскадом распространились по всей сети, произошло отключение ТГ системой защиты.

К сожалению, чем больше мощность ТГ, тем он менее «стабилен» при параллельной работе. Это происходит потому, что при росте единичной мощности ТГ их массу и габариты стараются не менять. В мощных ТГ роторы становятся относительно легче, менее инерционными и, следовательно, менее устойчивыми в аварийных режимах (табл. 2). С каждым новым шагом увеличения мощности ТГ проблема снижения устойчивости становится все более актуальной и требует дополнительных исследований.

На рис. 5 показана тенденция изменения относительной массы ротора (отношение массы ротора к общей массе ТГ, в %) при изменении мощности ТГ.

Данные ТГ мощностью 63-1200 МВт

ТГ	Мощность, МВт	Вес ротора, т	Вес ТГ, т	Отношение массы ротора к общей массе ТГ, %	Изготовитель
ТВФ-63-2	63	25,4	123,6	20,6	АО «Электросила»
ТВФ-110-2Е	110	28,9	151	19,1	
ТВФ-120-2	120	30,8	179	17,2	
ТВВ-200-2	200	41,8	265	15,8	
ТГВ-200-2	200	48,7	321	15,2	ГП «Завод «Электротяжмаш»
ТГВ-200-2М	200	48,1	256	18,1	
ТГВ-300-2	300	55,8	364	15,3	
ТВМ-300-2	300	50,4	333	15,1	АО «Электросила»
ТВВ-320-2	320	55,1	340	16,2	
ТВВ-500-2	500	65	444	14,6	
ТВВ-800-2	800	84,0	615	13,7	
ТВВ-1000-2	1000	86,5	641	13,5	
ТВВ-1200-2	1200	96	670	14,3	

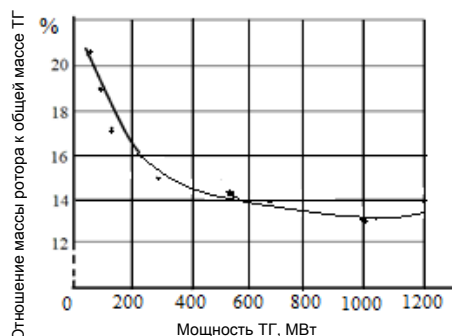


Рис. 5. Зависимость отношения массы ротора к общей массе ТГ в зависимости от мощности

Снижение устойчивости системы из-за относительного уменьшения массы роторов генераторов компенсируют за счет использования быстродействующих тиристорных систем регулирования возбуждения и автоматических регуляторов напряжения: при меньшей массе ротора его инерция уменьшается и при переходных процессах (или при коротком замыкании) ротор ТГ начинает «качаться», т.е. снижается устойчивость его параллельной работы с электрической сетью, но система автоматического регулирования возбуждения увеличивает ток возбуждения. При этом в генераторе нарастают электромагнитные силы, которые как бы связывают его с другими ТГ, что защищает энергосистему от развала.

Для поддержания характеристик отечественных ТГ на мировом уровне, кроме указанных выше задач, нужны дополнительные исследования по обеспечению безаварийной работы ТГ в переходных режимах, связанных с «пиками» и «провалами» энергопотребления, работы в режимах потребления реактивной мощности, необходимо снижение расходов на обслуживание и ремонты, на обеспечение надежности и долговечности отдельных узлов и деталей. Повышение эффективности ТГ требует также совершенствования обеспечивающих систем (систем снабжения газом, водой и маслом), совершенствования и повышения надежности системы возбуждения, внедрения автоматических систем контроля состояния ТГ, использования приемов современной технической диагностики наиболее напряженных узлов и элементов как в оперативном режиме (online), так и при проведении плановых и аварийных ремонтов.

Современный этап характеризуется появлением новых типов ТГ, марок сталей и изоляционных мате-

риалов, разработкой новых способов продления сроков эксплуатации ТГ, установленных на блоках ТЭС и АЭС [23, 36]. Для установления предаварийного состояния ТГ, выявления дефектов, исключения длительных простоев из-за аварийных отключений необходимо внедрять комплексные системы диагностики, [25, 30]. Продолжаются работы по дальнейшему увеличению мощности в единице исполнения за счет внедрения новых электроизоляционных материалов, поковок с более высокими прочностными характеристиками, электротехнических сталей с меньшими удельными потерями, по интенсификации охлаждения обмоток и сердечников [30-32].

Также при создании современных ТГ необходимо комплексное решение научных проблем, связанных как непосредственно с ТГ, так и с системами возбуждения, регулирования, контроля и защиты [16, 31]. При разработке новых конструкций необходимо учитывать особенности работы энергосистемы и, соответственно, работы ТГ в ненормальных режимах: при «пиках» и «провалах» нагрузки, работы с условием обеспечения баланса активной и реактивной энергии в сети и т.д. Установленные на электростанциях ТГ не рассчитаны на такие условия работы: они недостаточно маневренны и ограничены в решении вопроса регулирования реактивной мощности; имеют сроки эксплуатации, превышающие сроки, установленные заводом-изготовителем. Последнее вызывает дополнительные проблемы: «старение» изоляции и износ конструкционных материалов, снижение механической надежности и целостности шихтованных сердечников статора, элементов крепления и т.д. [16, 36]. Поэтому при проектировании ТГ следует устанавливать дополнительные требования:

- обеспечение повышенной маневренности ТГ с возможностью хотя бы кратковременного потребления реактивной энергии из сети. Потребление реактивной энергии должно ограничиваться только стабильностью работы генератора в энергосистеме, а не тепловыми и механическими процессами в машине;
- обеспечение высокой управляемости, возможности регулирования частоты вращения ТГ (до кратковременных асинхронных режимов) при сохранении мощности, обеспечение их стабильной связи с сетью с целью повышения экономических и эксплуатационных показателей электростанции [27, 31];
- обеспечение возможности при проведении ремонтов и модернизации ТГ повышать их мощность в уста-

новленном габарите, совершенствовать систему охлаждения, вносить необходимые изменения в конструкцию неактивных элементов ТГ с использованием современных расчетов, технологий и новых материалов.

Современные ТГ должны:

- поддерживать постоянными технические показатели при изменении режимов работы энергосистемы, знать допустимые пределы участия ТГ в поддержании баланса активной и реактивной мощностей;
- при повышении мощности ТГ в процессе их модернизации добиваться сохранения габаритов для использования существующих фундаментов и обеспечивающих систем;
- совершенствовать систему охлаждения ТГ, вести работу по замене охлаждающих агентов, в частности, в ТГ мощностью 300 МВт и более по замене взрыво- и пожароопасного водорода на воздух [30];
- для обеспечения конкурентоспособности ТГ продолжать работы по снижению их удельной массы (кг/кВт) за счет совершенствования конструкции неактивной зоны [7, 36];
- совершенствовать программы оценки технического состояния ТГ для определения возможности продления срока их эксплуатации, установления необходимого и достаточного объема ремонтных работ;
- продолжать исследования перспективности установки на блоках ТЭС асинхронизированных ТГ параллельно с работающими синхронными ТГ для повышения надежности и устойчивости их работы и работы системы [16];
- совершенствовать систему направленной подготовки и переподготовки специалистов всех уровней (квалифицированных рабочих, инженеров), решать вопросы обеспечения экономической заинтересованности работников электростанций для удержания их в национальной электроэнергетике [23].

Следует отметить, что создание современных ТГ необходимо не только для ТЭС и АЭС. Создание новых видов ТГ необходимо и для современной ветро-

энергетики. Повышение мощности ВЭУ требует увеличения мощности генераторов. При этом увеличивается вес машины, которую необходимо устанавливать на все большей высоте. Например, башня ВЭУ с ТГ мощностью 12 МВт (Haliade X, General Electric) имеет высоту 260 м [28, 40]. Для таких установок вопрос снижения веса каждого элемента и, в первую очередь, генератора – одна из основных задач.

Использование ТГ с магнитоэлектрическим возбуждением (с возбуждением от постоянных магнитов) вместо электромагнитного возбуждения, не решает эту задачу. Перспективным решением можно считать использование генераторов с обмотками из ВТСП, что позволит снизить массу и габариты сверхпроводящих генераторов в 3-4 раза по сравнению с обычными такой же мощности. Генератор с ВТСП обмотками для ВЭУ мощностью 8 МВт будет иметь диаметр 3 м и вес 120 т, тогда как обычный («теплый») ТГ такой же мощности будет иметь диаметр 9 м и вес 450 т, т.е. вес ТГ с ВТСП обмотками будет меньше в три раза. При этом стоимость ВЭУ также уменьшится от 6,7 до 3,2 млн. USD. Согласно проведенным исследованиям, вес дополнительного криогенного оборудования при разных конструкциях ВТСП генератора составляет менее 4 % от общего веса генераторов, т.е. добавка незначительная [38, 39].

Также при использовании для ВЭУ ТГ со сверхпроводящими обмотками снизятся необходимые для их установки производственные площади, которые обычно весьма значительны. Так, для оффшорной ветроустановки SG 14-222 DD (мощность 14 МВт, рабочий диаметр 222 м, длина одной лопасти 108 м) необходима площадь $39 \cdot 10^3 \text{ м}^2$ [21, 28, 40]. (Для сравнения, площадь одного энергоблока АЭС с генератором мощностью 1000 МВт, с реактором ВВЭР-1000 составляет около $9,1 \cdot 10^3 \text{ м}^2$). Некоторые параметры ВЭУ с ТГ мощностью 10 МВт с разными типами сверхпроводящих обмоток приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры ВЭУ с разными типами ТГ мощностью 10 МВт со сверхпроводящими обмотками

Параметр	ТГ с обмотками из НТСП проводников Nb ₃ Ti (General Electric)	ТГ с обмотками из ВТСП проводников (AMSC – American Superconductor)	ТГ с обмотками из НТСП проводников (MgB ₂) (Kalsi Engineering)
Частота вращения лопастей ВЭУ, об/мин	10	10	10
Номинальное напряжение обмотки статора генератора, кВ	3,3	0,69	4,5
Номинальный ток, А	1750	–	1360
Рабочая температура охлаждающей среды, К	4	80	30
Масса генератора с дополнительным криогенным оборудованием, т	143	150	52,5
Наружный диаметр генератора, м	4,0	4,5-5	5
Диаметр ветротурбины, м	160	190	150
Стоимость (на 2018 г.), тыс. USD	4963	–	3168,0

Для АЭС известны такие недостатки, как проблемы хранения и утилизации отработанного ядерного топлива. Но подобные проблемы есть и у ВИЭ – вопрос утилизации отработавших установок и их отдельных элементов. Утилизация больших ВЭУ, особенно их лопастей, – сложная задача. Лопасти конструируют так, чтобы они выдерживали экстремальные погодные условия: мороз, жару, ураганные ветры. По данным исследовательской компании Bloomberg New Energy Finance, начиная с 2022 г., только в Европе ежегодно будет необходимо утилизировать примерно 3800 лопастей ВЭУ [28, 42].

Исследователи отмечают, что демонтаж и утилизация небольших наземных ВЭУ – сложная, но в некоторой степени уже отработанная процедура, но демонтаж больших оффшорных ветрогенераторов еще только предстоит освоить. В Великобритании подсчитали расходы на демонтаж отслуживших срок оффшорных ветропарков (размещенных в море). По оптимистическому прогнозу будет необходимо затратить 1,85 млрд. USD, по пессимистическому – больше 5,2 млрд. USD.

Также можно ожидать, что появление больших площадей ветростанций может повлиять на естествен-

ное перемещение воздушных масс, будет способствовать процессу смешивания теплого и холодного воздуха. А солнечные панели снизят отражающую способность поверхности Земли. Все это приведет к изменению климата, к новым экологическим проблемам.

В Европе с 2009 г. работает проект EPR (European Pattern Recognition) под названием «PV Cycle». По этой программе с 2014 г. самостоятельная утилизация солнечных панелей стала обязательной для всех производителей (Директива ЕС 2012/19/EU об отходах электроники и электричества – Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE) [41, 43]. Были созданы центры сбора «солнечных» отходов. Некоторые панели считаются опасными из-за свинца или кадмия, и т.к. невозможно определить степень опасности, специалисты советуют считать опасными все солнечные панели. С 2020 г. все производители солнечных панелей, которые торгуют на рынках США, должны принимать участие в программе сбора «солнечно-энергетического» утиля (проект EPR). Поэтому главной проблемой для использования солнечных панелей является обеспечение соразмерности затрат на производство и утилизацию.

К недостаткам возобновляемой энергетики следует отнести также особенности работы генераторов от ВИЭ на общую энергетическую систему, влияние на ее устойчивость. Из-за нестабильности получения электроэнергии от ВИЭ количество электростанций разного вида с возобновляемыми источниками должно ограничиваться. Это, в частности, касается обеспечения устойчивости динамических процессов в системах энергоснабжения и, соответственно, изменений в организации диспетчерского управления. Общая энергетическая система не может использовать большие ВИЭ без увеличения количества маневренных мощностей. Значительное внедрения ВИЭ, если оно не сопровождается установкой дополнительных источников аккумулирования энергии, требует дополнительных систем регулирования мощности, чтобы сбалансировать постоянные колебания выработки и потребления энергии. Также увеличение количества электростанций от ВИЭ в энергосистеме приведет к сокращению вклада в энергообеспечение традиционных электростанций, что хорошо, но усложнит возможность регулирования частоты и напряжения в случае потери генерации или нагрузки [2, 40]. Обеспечение баланса потребления электроэнергии и поддержание частоты напряжения в сети являются основными техническими проблемами в энергосистемах со значительной мощностью установленных ВИЭ. В Украине, по расчетам Укрэнерго, максимальная установленная мощность солнечных и ветростанций, которую может принять объединенная энергетическая система без отклонений в работе, составляет 3 ГВт [2, 3, 21].

Выводы.

Для устойчивого развития электроэнергетики Украины и обеспечения ее энергетической безопасности необходимо:

1. При выборе технико-экономических решений развития электроэнергетики следует ориентироваться на стабилизационно-стагнационный сценарий с увеличением вложений на выполнение экологических программ.

2. Проводить работы по строительству новых блоков и по совершенствованию электрооборудования работающих АЭС, как основных источников электроэнергии на ближайшие 20-30 лет. При строительстве новых блоков АЭС необходимо внедрять новые типы реакторов, более совершенное оборудование, новые

технологии получения, преобразования, передачи и распределения электроэнергии.

3. Продолжать работы по совершенствованию ТГ: повышать их мощность (до 1500 МВт и более), использовать новые конструкции систем возбуждения, внедрять современные системы охлаждения и т.д. Для установленных ТГ расширять программу обслуживания и послеремонтных испытаний, проводить модернизацию с использованием современных технологий и материалов с целью продления сроков эксплуатации, использовать комплексный контроль технического состояния ТГ в режиме online.

4. Поддерживать в рабочем состоянии, проводить модернизацию электрооборудования блоков ТЭС для обеспечения устойчивого энергоснабжения потребителей до момента пуска новых блоков АЭС и создания промышленно-значимых станций от ВИЭ. Строительство новых блоков ТЭС нецелесообразно из-за значительного влияния на экологию.

5. Продолжать работы по развитию электроэнергетики от ВИЭ. Для электростанций от ВИЭ, которые работают на объединенную энергосистему, устанавливать источники маневренных мощностей, что обеспечит устойчивую работу в переходных режимах, совершенствовать систему диспетчерского управления. Необходимо продолжать работы по решению проблем экологии, которые могут возникать при использовании ВИЭ, в частности, по вопросу утилизации элементов установок, которые отработали установленный срок эксплуатации. Для энергообеспечения индивидуальных потребителей Украины целесообразно развивать солнечную и ветроэнергетику (мощностью до 100 кВт).

6. Возобновить исследования по использованию высокотемпературных сверхпроводников для создания электрооборудования (ТГ и других элементов энергосистемы) со сверхпроводящими обмотками.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zvorykin A., Pioro I., Panchal R. Study on Current Status and Future Developments in Nuclear-Power Industry of Ukraine. *Proceedings of the 2016 24th International Conference on Nuclear Engineering. Volume 5: Student Paper Competition*. Charlotte, North Carolina, USA. June 26-30, 2016. V005T15A020. ASME. doi: <https://doi.org/10.1115/icon24-60336>.
2. *Renewables in Ukraine 2019. KPMG in Ukraine*. July 2019. 20 p. Режим доступу: <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/ua/pdf/2019/07/Renewables-in-Ukraine-2019.pdf> (Дата звернення: 12.03.2021).
3. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Міністерство енергетики України. Режим доступу: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358> (Дата звернення: 12.03.2021).
4. Лойко В.В., Лойко Д.М. Динаміка розвитку промисловості України як чинника забезпечення економічної безпеки національної економіки. *Вчені записки Університету «КРОК»*, 2019, № 4 (56), С. 176-184. doi: <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2019-56-176-184>.
5. Енергетика України. Україна: щорічні втрати електроенергії в изношених сетях оцінюються в 20 млрд. грн, 2020. Режим доступу: <https://ukrenergy.dp.ua/2020/11/21/ukraina-echegodnye-poteri-elektroenergii-v-iznoshennyh-setyah-ocenivayutsya-v-20-mlrd-grn.html> (Дата звернення: 12.03.2021).
6. Lindh P.M., Petrov I., Semken R.S., Niemela M., Pyrhonen J.J., Aarniovuori L., Vaimann T., Kallaste A. Direct liquid cooling in low-power electrical machines: proof-of-concept. *IEEE*

- Transactions on Energy Conversion*, 2016, vol. 31, no. 4, pp. 1257-1266. doi: <https://doi.org/10.1109/tec.2016.2597059>.
7. Abegg K. The Growth of Turbogenerators. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1973, vol. 275, no. 1248, pp. 51-67. Режим доступу: www.jstor.org/stable/74298 (Дата звернення: 12.03.2021).
8. Cho R. *Energy. The State of nuclear energy today – and what lies ahead*. Режим доступу: <https://news.climate.columbia.edu/2020/11/23/nuclear-power-today-future/> (Дата звернення: 12.03.2021).
9. Шевченко В.В., Лутай С.Н. Роль кризисов в динамике развития мировой энергетики и теория циклического развития. *Научные труды Донецкого НТУ. Серия: «Электротехника и энергетика»*, 2013, №2 (15), С. 266-272. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.2549796>.
10. IAEA. Country Nuclear Power Profiles. Ukraine, 2020. Режим доступу: <https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/Ukraine/Ukraine.htm> (Дата звернення: 12.03.2021).
11. Marshall M. Theories of long waves: from Kondratieff to Mandel. *Long Waves of Regional Development. Critical Human Geography*, 1987. Palgrave, London. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-349-18539-9_2.
12. U.S. Chamber of Commerce's Global Energy Institute, 2020. *International Index of Energy Security Risk. Assessing Risk in a Global Energy Market*. Режим доступу: https://www.globalenergyinstitute.org/sites/default/files/IESRI-Report_2020_4_20_20.pdf (Дата звернення: 12.03.2021).
13. World Energy Council, 2020. *World Energy Trilemma Index*. Режим доступу: <https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-trilemma-index-2020> (Дата звернення: 12.03.2021).
14. OECD, 2019. *State-Owned Enterprise Reform in the Hydrocarbons Sector in Ukraine*. OECD Publishing, 2018. Norwegian Ministry of Foreign Affairs. 67 p. Режим доступу: <http://www.oecd.org/corporate/SOE-Reform-in-the-Hydrocarbons-Sector-in-Ukraine-ENG.pdf> (Дата звернення: 12.03.2021).
15. Price L., Wang X., Yun J. The challenge of reducing energy consumption of the Top-1000 largest industrial enterprises in China. *Energy Policy*, 2010, vol. 38, no. 11, pp. 6485-6498. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.02.036>.
16. Шевченко В.В. Перспективы создания конкурентоспособных турбогенераторов ТЭС и АЭС. – Saarbrücken : LAP Lambert Academic Publishing, 2016. – 144 с.
17. Benkovskiy L. *Nuclear Energy System of Ukraine for near and medium term (2030-2035) and International Collaboration in developing sustainable NES of Ukraine*. National Nuclear Energy Generating Company of Ukraine «Energoatom» INPRO Dialogue Forum 11 «Roadmaps for a Transition to Globally Sustainable NES», 2015, IAEA, Vienna, Austria. Режим доступу: [https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/df1/Presentations/day3/session4\(benkovskiy\)fordf11last.pdf](https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/df1/Presentations/day3/session4(benkovskiy)fordf11last.pdf) (Дата звернення: 12.03.2021).
18. Будущее мировой электроэнергетики. Подготовка к новым возможностям и угрозам. Режим доступу: https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ru/Documents/energy-resources/ru/The_future_of_global_power_sector_RUS.pdf (Дата звернення: 12.03.2021).
19. *Nuclear Power in Ukraine (Updated January 2021)*. Режим доступу: <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/ukraine.aspx> (Дата звернення: 12.03.2021).
20. *Paris Agreement. EU Action*. Режим доступу: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en (Дата звернення: 12.03.2021).
21. Zvorykin A., Piore I., Fialko N. Electricity generation in the world and Ukraine: Current status and future developments. *Mechanics and Advanced Technologies*, 2017, no. 2 (80), pp. 5-24. doi: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2017.80.113757>.
22. *RG-N Series (Generators for Nuclear Power Plants)*. Режим доступу: <https://power.mhi.com/products/generators/lineup/rg-n> (Дата звернення: 12.03.2021).
23. Shevchenko V.V. The reform of the higher education of Ukraine in the conditions of the military-political crisis. *International Journal of Educational Development*, 2019, vol. 65, pp. 237-253. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijedudev.2018.08.009>.
24. *IAEA Releases New Projections for Nuclear Power Through 2050*. Vienna, Austria. Режим доступу: <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/iaea-releases-new-projections-for-nuclear-power-through-2050> (Дата звернення: 12.03.2021).
25. Шевченко В.В., Масленников А.М. Структурно-логическая схема снижения массогабаритных параметров турбогенераторов. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*, 2015, Вип. 30, Т. 2, С. 137-144. Режим доступу: http://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/52736 (Дата звернення: 12.03.2021).
26. Атомная энергетика: 7 кандидатов в «ядерный клуб». Режим доступу: <https://www.skf.ru/press/news/item/4227408> (Дата звернення: 12.03.2021).
27. Шевченко В.В. К вопросу обеспечения конкурентоспособности отечественных турбогенераторов. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 2016, № 22 (98), С. 226-231. Режим доступу: <https://eltechs.op.edu.ua/index.php/journal/article/view/1398> (Дата звернення: 12.03.2021).
28. *7 Types of Renewable Energy: The Future of Energy*. Режим доступу: <https://justenergy.com/blog/7-types-renewable-energy-future-of-energy> (Дата звернення: 12.03.2021).
29. Мильх В.И., Полякова Н.В. Автоматизированные расчеты в программной среде FEMM динамики электромагнитных процессов турбогенераторов. *Електротехніка і електромеханіка*, 2015, № 6, С. 24-30. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2015.6.04>.
30. Минко А.Н., Шевченко В.В. Совершенствование теплообменных систем турбогенераторов с целью повышения их эффективности. *Проблемы региональной энергетики*, 2019, № 1 (39), С. 80-89. doi: <http://doi.org/10.5281/zenodo.2650425>.
31. Satake Y., Takahashi K., Waki T., Onoda M., Tanaka T. Development of large capacity turbine generators for thermal power plants. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, June 2015, vol. 52, no. 2, pp. 47-54. Режим доступу: https://power.mhi.com/randd/technical-review/pdf/index_14e.pdf (Дата звернення: 12.03.2021).
32. Shevchenko V.V. Influence of manufacturing quality of laminated core on a turbogenerator exploitation term. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2016, no. 4, pp. 28-33. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2016.4.04>.
33. Васильковский Ю.М., Мельник А.М. Электромагнитные виброизбуждающие силы турбогенератора в маневренных режимах работы. *Технічна електродинаміка*, 2016, № 2, С. 35-41. doi: <https://doi.org/10.15407/teched2016.02.035>.
34. Revuelta P.S., Litrán S.P., Thomas J.P. *Active power line conditioners: design, simulation and implementation for improving power quality*. Elsevier Inc., Academic Press, 2016. 436 p. doi: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-02915-2>.
35. Milykh V.I., Polyakova N.V. Determination of electromagnetic parameters and phase relations in turbo-generators by the automated calculation of the magnetic field in the software environment FEMM. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2016, no. 1, pp. 26-32. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2016.1.05>.
36. Shevchenko V.V., Minko A.N., Strokous A.V. Analysis of electromagnetic vibration forces in the elements of the turbogenerator stator fastening to the case in non-nominal operation modes. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 5, pp. 29-33. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2018.5.05>.
37. *Northeast blackout of 1965*. Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Northeast_blackout_of_1965 (Дата звернення: 12.03.2021).
38. Terao Y., Seta A., Ohsaki H., Oyori H., Morioka N. Lightweight design of fully superconducting motors for electrical aircraft propulsion systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, vol. 29, no. 5, pp. 1-5, art. no. 5202305. doi: <https://doi.org/10.1109/tasc.2019.2902323>.
39. Terao Y., Sekino M., Ohsaki H. Comparison of conventional and superconducting generator concepts for offshore wind turbines. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2013, vol. 23, no. 3, art. no. 5200904. doi: <https://doi.org/10.1109/TASC.2012.2237223>.

40. Shevchenko V.V., Shayda V.P., Pototsky D.V. Theoretical and practical directions for the turbogenerators creation, taking into account the electric power industry development. *Proceedings of the 9th International scientific and practical conference «Fundamental and applied research in the modern world»* (USA, Boston, April 14-16, 2021). USA, BoScience Publisher, 2021, pp. 110-118. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4818355>.

41. Chowdhury M.S., Rahman K.S., Chowdhury T., Nuthamachot N., Techato K., Akhtaruzzaman M., Tiong S.K., Sopian K., Amin N. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews*, 2020, vol. 27, art. no. 100431. doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100431>.

42. *Energy. What materials are used to make wind turbines?* Режим доступу: https://www.usgs.gov/faqs/what-materials-are-used-make-wind-turbines?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products (Дата звернення: 12.03.2021).

43. *Understanding your solar panel payback period*. 31 August, 2020. Режим доступу: <https://moxiesolar.com/2020/08/31/https-moxiesolar-com-blog-understanding-your-solar-panel-payback-period> (Дата звернення: 12.03.2021).

REFERENCES

1. Zvorykin A., Pioro I., Panchal R. Study on Current Status and Future Developments in Nuclear-Power Industry of Ukraine. *Proceedings of the 2016 24th International Conference on Nuclear Engineering, Volume 5: Student Paper Competition*. Charlotte, North Carolina, USA. June 26-30, 2016. V005T15A020. ASME. doi: <https://doi.org/10.1115/icon24-60336>.

2. *Renewables in Ukraine 2019. KPMG in Ukraine*. July 2019. 20 p. Available at: <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/ua/pdf/2019/07/Renewables-in-Ukraine-2019.pdf> (accessed 12.03.2021).

3. *Energy strategy of Ukraine for the period up to 2035 «Security, energy efficiency, competitiveness»*. Ukraine Ministry of Energy. (Ukr). Available at: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358> (accessed 12.03.2021).

4. Loiko V.V., Loiko D.M. Dynamics of Ukraine industry development as an integrated provision of economic security of national economy. *Scientific Notes of «KROK» University*, 2019, no. 4 (56), pp. 176-184. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2019-56-176-184>.

5. *Energy of Ukraine. Ukraine: annual electricity losses in worn-out networks are estimated at UAH 20 billion*. (Rus). Available at: <https://ukrenergy.dp.ua/2020/11/21/ukraina-ezhagodnye-poteri-elektroenergii-v-iznoshennyh-setyah-ocenivayutsya-v-20-mlrd-gm.html> (accessed 12.03.2021).

6. Lindh P.M., Petrov I., Semken R.S., Niemela M., Pyrhonen J.J., Aarniovuori L., Vaimann T., Kallaste A. Direct liquid cooling in low-power electrical machines: proof-of-concept. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2016, vol. 31, no. 4, pp. 1257-1266. doi: <https://doi.org/10.1109/tec.2016.2597059>.

7. Abegg K. The Growth of Turbogenerators. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1973, vol. 275, no. 1248, pp. 51-67. Available at: www.jstor.org/stable/74298 (accessed 12.03.2021).

8. Cho R. *Energy. The State of nuclear energy today – and what lies ahead*. Available at: <https://news.climate.columbia.edu/2020/11/23/nuclear-power-today-future/> (accessed 12.03.2021).

9. Shevchenko V.V., Lutai S.N. The role of crises in the world energy development dynamics and the theory of cyclical development. *Scientific papers of Donetsk National Technical University. Series: Electrical and Power Engineering*, 2013, no. 2 (15), pp. 266-272. (Rus). doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.2549796>.

10. IAEA. Country Nuclear Power Profiles. Ukraine, 2020. Available at: <https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/Ukraine/Ukraine.htm> (accessed 12.03.2021).

11. Marshall M. Theories of long waves: from Kondratieff to Mandel. *Long Waves of Regional Development. Critical Human Geography*, 1987. Palgrave, London. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-349-18539-9_2.

12. U.S. Chamber of Commerce's Global Energy Institute, 2020. *International Index of Energy Security Risk. Assessing Risk in a Global Energy Market*. Available at: https://www.globalenergyinstitute.org/sites/default/files/IESRI-Report_2020_4_20_20.pdf (accessed 12.03.2021).

13. World Energy Council, 2020. *World Energy Trilemma Index*. Available at: <https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-trilemma-index-2020> (accessed 12.03.2021).

14. OECD, 2019. *State-Owned Enterprise Reform in the Hydrocarbons Sector in Ukraine*. OECD Publishing, 2018. Norwegian Ministry of Foreign Affairs. 67 p. Available at: <http://www.oecd.org/corporate/SOE-Reform-in-the-Hydrocarbons-Sector-in-Ukraine-ENG.pdf> (accessed 12.03.2021).

15. Price L., Wang X., Yun J. The challenge of reducing energy consumption of the Top-1000 largest industrial enterprises in China. *Energy Policy*, 2010, vol. 38, no. 11, pp. 6485-6498. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.02.036>.

16. Shevchenko V.V. *Prospects for the creation of competitive turbogenerators for TPP and NPP*. Saarbrücken, LAP Lambert Academic Publishing, 2016. 144 p. (Rus).

17. Benkovskiy L. *Nuclear Energy System of Ukraine for near and medium term (2030-2035) and International Collaboration in developing sustainable NES of Ukraine*. National Nuclear Energy Generating Company of Ukraine «Energoatom» INPRO Dialogue Forum 11 «Roadmaps for a Transition to Globally Sustainable NES», 2015, IAEA, Vienna, Austria. Available at: [https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/df11/Presentations/day3/session4/\(benkovskiy\)for_df11_last.pdf](https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/df11/Presentations/day3/session4/(benkovskiy)for_df11_last.pdf) (accessed 12.03.2021).

18. *The future of the global electric power industry. Preparing for new opportunities and threats*. Available at: https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ru/Documents/energy-resources/ru/The_future_of_global_power_sector_RUS.pdf (accessed 12.03.2021).

19. *Nuclear Power in Ukraine (Updated January 2021)*. Available at: <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/ukraine.aspx> (accessed 12.03.2021).

20. *Paris Agreement. EU Action*. Available at: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en (accessed 12.03.2021).

21. Zvorykin A., Pioro I., Fialko N. Electricity generation in the world and Ukraine: Current status and future developments. *Mechanics and Advanced Technologies*, 2017, no. 2 (80), pp. 5-24. doi: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2017.80.113757>.

22. *RG-N Series (Generators for Nuclear Power Plants)*. Available at: <https://power.mhi.com/products/generators/lineup/rg-n> (accessed 12.03.2021).

23. Shevchenko V.V. The reform of the higher education of Ukraine in the conditions of the military-political crisis. *International Journal of Educational Development*, 2019, vol. 65, pp. 237-253. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijedudev.2018.08.009>.

24. *IAEA Releases New Projections for Nuclear Power Through 2050*. Vienna, Austria. Available at: <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/iaea-releases-new-projections-for-nuclear-power-through-2050> (accessed 12.03.2021).

25. Shevchenko V.V., Maslennikov A.M. The scheme to reduce turbo-generator mass and dimensions. *Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences*, 2015, no. 30, vol. 2, pp. 137-144. (Rus). Available at: http://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/52736 (accessed 12.03.2021).

26. *Nuclear power: 7 candidates for the «Nuclear Club»*. (Rus). Available at: <https://www.skf.ru/press/news/item/4227408> (accessed 12.03.2021).

27. Shevchenko V.V. To issue of ensuring of competitiveness of domestic turbogenerators. *Electrotechnic and Computer Systems*, 2016, no. 22 (98), pp. 226-231. (Rus). Available at: <https://eltecs.op.edu.ua/index.php/journal/article/view/1398> (accessed 12.03.2021).

28. *7 Types of Renewable Energy: The Future of Energy*. Available at: <https://justenergy.com/blog/7-types-renewable-energy-future-of-energy> (accessed 12.03.2021).

29. Milykh V.I., Polyakova N.V. Automated calculations of the dynamics of turbogenerator electromagnetic processes in software environment FEMM. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no. 6, pp. 24-30. (Rus). doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2015.6.04>.
30. Minko A.N., Shevchenko V.V. Improving heat exchange systems of turbogenerators for increase of their efficiency. *Problemele Energeticii Regionale*, 2019, no. 1 (39), pp. 80-89. (Rus). doi: <http://doi.org/10.5281/zenodo.2650425>.
31. Satake Y., Takahashi K., Waki T., Onoda M., Tanaka T. Development of large capacity turbine generators for thermal power plants. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, June 2015, vol. 52, no. 2, pp. 47-54. Available at: https://power.mhi.com/randd/technical-review/pdf/index_14e.pdf (accessed 12.03.2021).
32. Shevchenko V.V. Influence of manufacturing quality of laminated core on a turbogenerator exploitation term. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2016, no. 4, pp. 28-33. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2016.4.04>.
33. Vaskovskiy Yu.M., Melnyk A.M. The electromagnetic vibration disturbing forces of turbogenerator in maneuverable operating conditions. *Technical Electrodynamics*, 2016, no. 2, pp. 35-41. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.02.035>.
34. Revuelta P.S., Litrán S.P., Thomas J.P. *Active power line conditioners: design, simulation and implementation for improving power quality*. Elsevier Inc., Academic Press, 2016. 436 p. doi: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-02915-2>.
35. Milykh V.I., Polyakova N.V. Determination of electromagnetic parameters and phase relations in turbo-generators by the automated calculation of the magnetic field in the software environment FEMM. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2016, no. 1, pp. 26-32. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2016.1.05>.
36. Shevchenko V.V., Minko A.N., Strokous A.V. Analysis of electromagnetic vibration forces in the elements of the turbogenerator stator fastening to the case in non-nominal operation modes. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 5, pp. 29-33. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2018.5.05>.
37. *Northeast blackout of 1965*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Northeast_blackout_of_1965 (accessed 12.03.2021).
38. Terao Y., Seta A., Ohsaki H., Oyori H., Morioka N. Lightweight design of fully superconducting motors for electrical aircraft propulsion systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, vol. 29, no. 5, pp. 1-5, art. no. 5202305. doi: <https://doi.org/10.1109/tasc.2019.2902323>.
39. Terao Y., Sekino M., Ohsaki H. Comparison of conventional and superconducting generator concepts for offshore wind turbines. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2013, vol. 23, no. 3, art. no. 5200904. doi: <https://doi.org/10.1109/TASC.2012.2237223>.
40. Shevchenko V.V., Shayda V.P., Pototsky D.V. Theoretical and practical directions for the turbogenerators creation, taking into account the electric power industry development. *Proceedings of the 9th International scientific and practical conference «Fundamental and applied research in the modern world»* (USA, Boston, April 14-16, 2021). USA, BoScience Publisher, 2021, pp. 110-118. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4818355>.
41. Chowdhury M.S., Rahman K.S., Chowdhury T., Nuthammachot N., Techato K., Akhtaruzzaman M., Tiong S.K., Sopian K., Amin N. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews*, 2020, vol. 27, art. no. 100431. doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100431>.
42. *Energy. What materials are used to make wind turbines?* Available at: https://www.usgs.gov/faqs/what-materials-are-used-make-wind-turbines?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products (accessed 12.03.2021).
43. *Understanding your solar panel payback period*. 31 August, 2020. Available at: <https://moxiesolar.com/2020/08/31/https-moxiesolar-com-blog-understanding-your-solar-panel-payback-period> (accessed 12.03.2021).

Шевченко Валентина Владимировна¹, д.т.н., доц.,
Минко Александр Николаевич², к.т.н.,
Milan Dimov³, PhD,

¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
e-mail: zurbagan8454@gmail.com (Corresponding author)

²Научно-производственная компания
с ограниченной ответственностью «Экополимер»,
61072, Харьков, ул. Тобольская, 42-а,
e-mail: alexandr.minko@i.ua

³Trakia University,
8600 Yambol, Bulgaria,
e-mail: milendimov@protonmail.ch

V.V. Shevchenko¹, A.N. Minko², M. Dimov³

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²Research and Production Company with Limited Liability
«Ecopolymer»,
42-a, Tobolska Str., Kharkiv, 61072, Ukraine.

³Trakia University,
8600 Yambol, Bulgaria.

Improvement of turbogenerators as a technical basis for ensuring the energy independence of Ukraine.

The paper defines the directions of improving turbogenerators as the basis for ensuring the energy independence of Ukraine. The analysis of the state, problems and prospects for the development of modern electric power industry. Goal of the work is to identify promising directions for sustainable development of the national electric power industry in order to ensure energy security of Ukraine, to conduct a comparative analysis of electricity sources, to confirm the need to improve the main sources – turbogenerators. Methodology. During the research, an analytical analysis of the electricity sources, which are installed at power plants in Ukraine and the world, was carried out, taking into account the growth of the planet's population and its energy activity. Cyclic theory was chosen as the theoretical basis for forecasting. On the basis of this theory, global development trends, advantages and disadvantages of currently used sources of electricity - thermal (including nuclear) power plants and stations that operate from renewable energy sources - have been established. A review of literary sources on the methods of the energy sector forecasting the development, including the development of the energy sector in Ukraine, has been carried out. Originality. It has been established that due to the active growth of the planet's population, with the increase in its energy activity, obtaining electricity from renewable energy sources is not enough, that for the next 20-30 years nuclear power plants will be the main sources of electricity. The internal and external threats to the energy security of Ukraine, directions of development of turbogenerator construction, ways to improve turbogenerators, to increase their energy efficiency, power per unit of performance, to increase the readiness and maneuverability factors, and overload capacity have been identified. Practical significance. The need to continue the modernization and improvement of the turbogenerators of nuclear power plant units, as the main sources of electricity, has been proved. The directions of their improvement are established: increasing the power in the established sizes, making changes to the design of the turbogenerators inactive elements, replacing the cooling agent to keep Ukrainian turbogenerators at the world level, improving auxiliary systems, improving and increasing the reliability of the excitation system, introduction of automatic systems for monitoring the state turbogenerators. Possible limits of use, advantages, disadvantages and problems of using renewable energy sources for Ukraine have been established. References 43, tables 3, figures 5.

Key words: electric power industry, energy independence, turbogenerator, energy saving, ecology, technical diagnostics, weight and size indicators, power increase, renewable energy sources.