

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИЯ С УЧЕТОМ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

*Критична оцінка існуючих поглядів на перспективи розвитку світової енергетики є невід'ємною частиною вироблення самостійної позиції будь-якої держави з цього питання. Розгляд перспективних шляхів розвитку електроенергетики є визначальним чинником розвитку електромашинобудування, як галузі, що створює генеруючі системи.*

*Критическая оценка существующих взглядов на перспективы развития мировой энергетики является неотъемлемой частью выработки самостоятельной позиции любого государства по этому вопросу. Рассмотрение перспективных путей развития электроэнергетики является определяющим фактором развития электромашиностроения, как отрасли, создающей генерирующие системы.*

### ВВЕДЕНИЕ

Определяющую роль в развитии современной энергетики имеют два аспекта: наличие долгосрочных устойчивых источников энергии и их экологическая безопасность. Проблемы устойчивого и безопасного развития энергетики неразрывно связаны с общемировыми, глобальными проблемами, такими, как изменение климата, устойчивое развитие экономики, сокращение уровня бедности и обеспечение нормальной жизнедеятельности населения. Это определяет направления и приоритеты развития мировой экономики и промышленности, технологические, ресурсные и экологические возможности, энергетические, политические, демографические и социокультурные проблемы, а также необходимость учета взаимного влияния всех указанных факторов друг на друга. Для решения этих задач наиболее целесообразно применять комплексный подход, т.е. вести непрерывный учет и оценку возможного совместного развития вышеперечисленных направлений, использовать сценарный подход – взаимосвязь демографических, экономических, технологических, политических, экологических и энергетических трендов.

### ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящее время главная задача – предотвращение экологического кризиса. Поэтому основным направлением развития энергетики следует принять то направление, которое сможет опираться на технологии и источники, не добавляющие энергию в биосферу Земли. Целесообразно рассматривать и определять комплексный подход к глобальным путям устойчивого развития энергетики и направления, по которым должны идти исследования, [1].

### СВЯЗЬ ГЕНЕРИРУЮЩИХ СИСТЕМ С РАЗВИТИЕМ ЭНЕРГЕТИКИ

В рамках Киотского протокола и пост-Киотских соглашений, национального экологического законодательства создаются правовые и экономические механизмы, которые стимулируют процесс перехода к энергетике нового типа. В Украине износ электрооборудования тепловых электростанций и промышленных предприятий достигает 100 %, т.е. необходима немедленная модернизация или замена этого оборудования. Поэтому следует вести работы по рассмот-

рению перспективных направлений развития электроэнергетики, которое будет включать решение проблем энергосбережения с учетом перспектив развития и внедрения нового оборудования и современных технологий. Электроэнергетическая система Украины довольно мощная и составляет 52 млн. кВт, в т.ч. тепловых электрических станций (ТЭС) – 30,9 млн. кВт (39,4 %), атомных – 13,8 млн. кВт (52 %) и гидроэлектростанций – 4,7 млн. кВт (9 %).

Современная энергетика основана на сжигании ископаемого топлива, транспортируемого на большие расстояния, и на потреблении больших объемов энергии при сравнительно слабом управлении энергетическими потоками. А также в настоящее время растет значимость возобновляемой энергетики: мировая мощность ветроэлектростанций (ВЭС) возросла с 18 до 160 ГВт, солнечных, в том числе фотовольтаических электростанций, – от 1,8 до 22,9 ГВт. К концу 2000-х годов возобновляемые источники энергии вышли на первое место в приросте мощностей в мире (в 2009 году 40 %). Эта тенденция сохраняется.

Но проблемным остается выбор типа генератора для ветроэнергетических установок (ВЭУ): анализ конструкций ВЭУ и разработка технических решений, направленных на повышение их КПД и снижение порога минимальной скорости ветра для обеспечения номинального режима работы ВЭУ и расширение территории их возможного использования.

В первых ВЭУ всех типов и мощностей использовали, в качестве генерирующей единицы, асинхронную машину (АМ) – асинхронный генератор (АГ). Действительно, АМ – самые простые при расчете, проектировании, изготовлении и обслуживании, надежные, дешевые, легкие (кВт/кг) машины. Но при использовании их в автономном генераторном режиме, нуждаются в источнике реактивной энергии. Последнее значительно снижает надежность всей установки в целом, [1, 5].

Оценка мирового рынка позволяет говорить о том, что для удаленных потребителей энергии (поселки в горах, степях, отдельные фермерские хозяйства, кордоны лесников и т.д.) в среднем достаточно 1 кВт/чел. Поэтому для Украины, России, стран Ближнего Востока (Афганистан, Иран, Индия и др.) с расcредоточенным населением по большой территории

необходимы установки небольшой мощности (5÷10 кВт). Для европейских стран целесообразны ВЭУ мощностью до 100÷150 кВт. Преимущество ветроэнергетики – возможность размещения электроустановок в непосредственной близости к потребителю. На мировом рынке в настоящее время удельная стоимость ВЭУ составляет около 1100÷1200 долл. за установленный кВт мощности. Поэтому при создании новых типов ВЭУ стоит задача снижения стоимости до 900÷1000 долл./кВт. Малая ветроэнергетика не требует больших территорий. Локальные ВЭУ могут быть установлены практически везде, где среднегодовая скорость ветра не менее 4÷5 м/с, [5].

Правильная оценка существующих статистических данных по применению разного типа электрических генераторов переменного тока в ВЭУ разной мощности, с учетом знаний условий эксплуатации и рода нагрузки, позволит максимально использовать потенциал ветрового потока, повысить надежность и КПД ВЭУ, получить экономический эффект. После проведенного анализа литературы, что сравнительный анализ разных типов электрических генераторов с точки зрения влияния скорости ветра на энергетические параметры проведен не был.

Для рассмотрения зависимости работы АГ и его энергетических параметров от скорости ветра и возможности повышения КПД воспользуемся зависимостью выработанной мощности генератора от скорости ветра и других параметров:

$$P = C_p \cdot \frac{\rho v^3}{2} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \eta_{эл} \cdot \eta_{мех}, \text{ Вт},$$

где  $C_p$  – коэффициент использования энергии ветра;  $\rho$  – плотность воздуха ( $\rho = 1,23 \text{ кг/м}^3$  при температуре  $t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$  и атмосферном давлении 760 мм рт. ст.);  $v$  – скорость ветра, м/с;  $D$  – диаметр ветроколеса, м;  $\eta_{эл}$  – КПД электрического генератора, о.е.;  $\eta_{мех}$  – КПД механической части ВЭУ.

Скорость ветра в момент времени  $t$  носит случайный характер и определяется на основании наблюдений и/или, с определенной точностью, прогнозируется. Проанализируем изменение энергетических параметров для генераторов ВЭУ разных типов в зависимости от скорости ветра. При рассмотрении энергетических соотношений считаем, что можно пренебречь потерями в системах и что коэффициент мощности постоянный.

Уравнение баланса мощностей для автономной системы электроснабжения с АГ, который самовозбуждается от включенных в цепь обмотки статора конденсаторов, представим в виде:

$$m_1 U_1 \cdot I \cdot \cos \varphi_1 = m_H U_H \cdot I_H \cdot \cos \varphi_H; \quad (1)$$

$$m_1 \left[ \frac{I_k^2}{\omega_1 C} - I_H^2 \omega_1 L \right] = Q_{AG}; \quad m_1 \cdot \frac{I_k^2}{\omega_1 C} = Q_{AG}; \quad (2)$$

$$m_1 \cdot \frac{I_k^2}{\omega_1 \cdot C} + m_1 \cdot I_H^2 \cdot \left[ \frac{1}{\omega_1 \cdot C_k} - \omega_1 \cdot L \right] = Q_{AG}; \quad (3)$$

$$\frac{m_1}{\omega_1} \cdot \left[ \frac{I_k^2}{C} + \frac{I_k^2}{C_k} \right] = Q_{AG}, \quad (4)$$

где  $I_1, I_H, I_k$  – токи статора АГ, нагрузки и запитывающих конденсаторов соответственно;  $\omega_1$  – угловая

частота напряжения генератора, 1/с;  $L$  – индуктивность нагрузки, Гн;  $C, C_k$  – емкость шунтирующих и компаундирующих конденсаторов, мкФ;  $\varphi_1, \varphi$  – фазовые углы сдвига генератора и нагрузки;  $m_1$  – количество фаз обмотки статора генератора.

Электромагнитная активная мощность генератора, кВт

$$P_{эм} = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1.$$

Реактивная мощность генератора, квар

$$Q_{AG} = m_1 U_1 I_1 \sin \varphi_1.$$

Уравнение (1) является уравнением баланса активных мощностей. Оно справедливо для любой автономной системы с АГ с самовозбуждением. Уравнения (2÷4) выражают баланс реактивных мощностей при активно-индуктивной или активной нагрузке и при использовании в генераторной установке только шунтирующих или компаундирующих конденсаторов.

Уравнение баланса реактивной мощности является правильным для автономной системы лишь в том случае, если для выравнивания частоты у потребителей автономной системы не применяется вставка выпрямитель-инвертор. Если данная вставка есть, то балансы реактивной мощности составляем отдельно для АГ с цепью его возбуждения и для автономной электрической цепи с компенсаторами реактивной мощности для обеспечения высоких качеств электроэнергии. При совместной параллельной работе генераторов на активно-индуктивную нагрузку их активные мощности складываются, а реактивная мощность системы равняется суммарной реактивной мощности шунтирующих и компаундирующих конденсаторов. Из выражения баланса реактивной мощности для активно-индуктивной нагрузки, (2), можно найти значение угловой частоты напряжения:

$$\begin{aligned} \omega_{1,2} &= \frac{-Q_{AG} \cdot C + \sqrt{(Q_{AG} \cdot C)^2 + 4m_1 \cdot I^2 \cdot L \cdot C \cdot m_1 \cdot I_k^2}}{2m_1 \cdot I^2 \cdot L \cdot C} = \\ &= \frac{-Q_{AG}}{2m_1 \cdot I_H^2 \cdot L} + \sqrt{\frac{Q_{AG}^2}{4m_1^2 \cdot I_H^4 \cdot L^2} + \frac{4m_1^2 \cdot I_H^2 \cdot L \cdot C \cdot I_k^2}{4m_1^2 \cdot I_H^4 \cdot L^2 \cdot C^2}} = \\ &= \frac{-Q_{AG}}{2m_1 \cdot I_H^2 \cdot L} + \sqrt{\frac{Q_{AG}^2}{4m_1^2 \cdot I_H^4 \cdot L^2} + \frac{I_k^2}{I_H^2 \cdot L \cdot C}} = \\ &= \frac{-Q_{AG}}{2m_1 \cdot I_H^2 \cdot L} + \frac{1}{I_H} \sqrt{\frac{Q_{AG}^2}{4m_1^2 \cdot I_H^2 \cdot L^2} + \frac{I_k^2}{L \cdot C}}, \end{aligned}$$

где  $f$  – частота сети, Гц,  $f = \omega_1 / 2\pi$ .

Из уравнения электромагнитного момента  $M_{эм}$  для АГ найдем зависимость напряжения на зажимах АГ от активной его мощности:

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{2\pi \cdot f};$$

$$U_{1н} = \sqrt{\frac{P_{эм} \cdot S \cdot \left( (R_1 + \frac{R_2'}{S}) + (X_1 + X_2')^2 \right)}{m_1 \cdot p R_2'}}$$

где  $p$  – число пар полюсов;  $S$  – скольжение ( $S_H = 0,05 \div 0,08$ , о.е.);  $R_1$  – активное сопротивление обмотки статора, Ом;  $R_2'$  – приведенное активное сопротивление обмотки ротора, Ом;  $X_1$  – реактивное сопротивление обмотки статора, Ом;  $X_2'$  – приведенное реактивное сопротивление обмотки ротора, Ом.

Как уже было указано выше, для работы АМ в генераторном режиме необходим источник реактивной мощности. Значение емкости, необходимой для возбуждения генератора при данной частоте:

$$C = \frac{1}{(2\pi \cdot f_1)^2 (L_1 + L_m)},$$

где  $L_1$  и  $L_m$  – соответственно индуктивность обмотки статора и намагничивающего контура генератора, Гн.

В общем случае, емкость, которая необходима для получения напряжения на генераторе при заданном значении реактивной нагрузки  $Q_c$ , определяется:

$$Q_c = m_1 \cdot U_c^2 / X_c = Q_\Gamma + Q_H = P_{AG} \cdot \operatorname{tg} \varphi_\Gamma + P_H \cdot \operatorname{tg} \varphi_H, \text{ вар};$$

$$\text{Примем } P_{AG} = P_H = P_{ном}$$

$$X_c = 1/(\omega_1 \cdot C) = 1/(2\pi f_1 \cdot C), \text{ Ом.}$$

Тогда окончательное значение емкости, необходимой для работы АГ с переменной частотой вращения приводного двигателя:

$$C = P_{ном} \cdot (\operatorname{tg} \varphi_{AG} + \operatorname{tg} \varphi_H) / (2\pi \cdot f_1 \cdot m_1 \cdot U_c^2), \text{ Ф},$$

где  $P_{ном}$  – мощность, которая отдается генератором потребителю, Вт;  $U_c$  – напряжение конденсаторов, В;  $f_1$  – частота вырабатываемого тока, Гц;  $\varphi_\Gamma$  и  $\varphi_H$  – углы сдвига фаз между напряжением генератора и нагрузкой;  $U_\Gamma = U_c$  напряжения на генераторе и нагрузке, В.

Исследования показали, что автономные АГ целесообразно использовать при значениях

$$n_{AG} / n_{ном} \geq 0,9.$$

При меньших  $n_{AG}$  величина необходимой емкости быстро растет и генератор почти полностью загружается реактивным током.

В наше время значительный интерес вызывает возможность использования синхронных генераторов (СГ) с постоянными магнитами. Развитие технологий позволяет постоянным магнитам конкурировать с обычной электромагнитной системой возбуждения, а надежность и отсутствие потерь позволяют говорить об их преимуществе. Поэтому в диапазоне мощностей от 1 кВт до 50 кВт наибольшее распространение в настоящее время получили СГ с постоянными магнитами, которые имеют высокую степень автономности, надежности, просты в исполнении, достаточно с высоким КПД. Пока они достаточно дорогие в изготовлении, но преимущества в эксплуатации отвечают современной тенденции развития техники, [1].

Общемировой задачей в настоящее время является энергосбережение, поэтому одним из перспективных направлений можно считать использование сверхпроводников в электротехническом оборудовании, особенно, на базе высокотемпературных сверхпроводников, [2]. Это направление требует значительной НИР по созданию новых типов генераторов.

Вторым возможным направлением регулирования реактивной мощности в энергосистемах может быть пересмотр режимов работы ТГ на блоке, а именно пересмотр необходимости эксплуатации ТГ в режиме перевозбуждения для обеспечения устойчивой работы и перевод ТГ в режим недовозбуждения. Это позволит изменить характер режима работы ТГ относительно сети – он перестанет генерировать в сеть реактивную энергию, но забирает ее из сети, разгружая последнюю от емкостных токов. В настоящее время эксплуатация ТГ в режиме недовозбуждения запрещена. Но, по нашему мнению, это положение требует корректировки.

Режим работы ТГ в асинхронном режиме относится к аномальным режимам работы. Он может быть вызван значительными аварийными перегрузками, потерей возбуждения, работой с недовозбуждением, асинхронным ходом, работой при отказе системы охлаждения, а также при значительных величинах несинусоидальности и несимметрии напряжения в сети. Также асинхронный режим появляется при потере возбуждения, а также при выпадении машины из синхронизма, связанном с колебаниями нагрузки в энергосистеме. ТГ имеют крутую и "жесткую" асинхронную характеристику со значительным по величине максимальным моментом. Поэтому для них, по условиям нагрева статора, допускается относительно продолжительная (до 30 мин.) работа в асинхронном режиме со сниженной нагрузкой (до 50 %). Как положительный аспект при этом следует отметить, что в асинхронном режиме ТГ потребляют значительную реактивную мощность из сети, что важно при современном состоянии электрических сетей Украины, изменении характера электроприемников [2, 3]. Переход ТГ в индуктивный режим относительно сети позволит разгружать сеть от емкостных токов и стабилизировать ее параметры. Изменения величины и характера нагрузки, большие "провалы" и ярко выраженные "пики" энергопотребления, значительный вклад в энергосистему ТЭС с практически полностью изношенным оборудованием приводит к тому, что частота тока в электросети Украины последние годы находится на уровне 49,2÷49,5 Гц [2, 3]. Такое снижение частоты опасно для работы всей энергосистемы и электрооборудования. Например, при снижении частоты в сети до 49 Гц реакторы энергоблоков АЭС должны разгружаться до 10 % номинальной тепловой мощности, а это может повлечь дополнительное увеличение дефицита мощности и создать аварийную ситуацию в энергосистеме. В ЕЭС России ситуация более стабильная, частота поддерживается в более узких границах, и пределы наибольших отклонений частоты от 50 Гц меньше: ±0,15 Гц, – и наблюдаются лишь у часа утренних пиков нагрузки [2, 3]. К изменению частоты также приводит небаланс реактивной энергии в сети. Кроме проблемы поддержки уровня частоты, существует и задача поддержки величины напряжения в сети. Изменения нагрузки в энергосистемах с линиями 330÷750 кВ вызывают появление избытков реактивной мощности на уровне сотен Мвар и, соответственно, вызывают рост напряжения в линиях. Регулирование напряжения может осуществляться эффективно во всех режимах ТГ по активной и реактивной нагрузке (включая режим компенсатора при полном потреблении реактивной мощности) и не влияет на общую устойчивость генератора.

Чтобы нормализовать напряжение на станциях и в сети необходимо осуществлять регулировку с компенсацией избытков реактивной (емкостной) мощности. Для решения этой проблемы недостаточно наличие установленных реакторов, трансформаторов и автотрансформаторов с РПН. Существующие проблемы могут дополнительно осложняться при эксплуатации энергосистем без надлежащего взаимодействия компаний, которые генерируют и передают, [3].

Удельная стоимость сооружения нового узла компенсации реактивной мощности с установкой СК или статических преобразователей равна 40÷50 дол/квар. В то же время, использование в качестве компенсирующих систем СГ, установленных на электростанциях и отработавших свой срок функционирования, будет на порядок ниже.

### ВЫВОДЫ

1. Совершенствование и развитие электроэнергетики требует непрерывного развития и совершенствования конструкций и принятие новых технических решений при изготовлении генераторов.

2. Необходим достаточный резерв генерирующих мощностей (в т.ч. маневренных) для увеличения пропускной способности электрических сетей, особенно межсистемных и магистральных, для поддержки надежности и безопасности энергоснабжения на надлежащем уровне.

3. Такое разнообразие требований и направлений соответственно определяет разнообразие номенклатуры генераторов для ТЭС, АЭС, ВЭС, генераторов с использованием сверхпроводников. Кроме того, в классической теории электромашиностроения наметились собственные значительные перемены, которые определили спектр работ по совершенствованию типов и конструкций ТГ энергосистемы:

- экономическое состояние в государстве определило приоритет проведения работ по реабилитации работающих на базе современных приемов диагностики, ремонтных работ над полной заменой устаревшего электрооборудования. При проведении реабилитационных работ необходимо внедрение новых технологических приемов, материалов, что позволит повысить мощность ТГ без существенных изменений геометрии машины. Также целесообразна оценка возможности замены хладагентов генератора, например, замена водорода воздухом, что позволит упростить конструкцию ТГ, повысить его пожаро- и взрывобезопасность. Например, проведено успешное усовершенствование ТГ мощностью 200 МВт ГП завод "Электротяжмаш". Их мощность удалось увеличить на 15-20 %, а коэффициент готовности довести до 0,999, что соответствует уровню лучших мировых стандартов. На ТЭС Украины установлено 76 ТГ единичной мощностью 200 и 300 МВт. Проведение модернизации на этих ТГ может обеспечить суммарный прирост мощности приблизительно до 4000 МВт, что эквивалентно строительству новой крупной ТЭС;

- развитие и повышение мощности энергосетей Украины сделало возможным проведение работ по повышению установленной единичной мощности ТГ на электростанциях. Успешно ведутся работы по созданию ТГ мощностью 1500 МВт для АЭС [3]. Практическое внедрение в настоящее время ограничивают только сопутствующие отрасли: возможности турбин и ядерных реакторов (для АЭС);

- необходимость регулирования реактивной мощности в энергосистемах поставила вопрос о поиске новых компенсационных устройств. Возможными решениями может стать перевод в режим СК турбоге-

нераторов сравнительно небольшой мощности (до 200 МВт), отработавших срок эксплуатации;

- для ВЭУ всего диапазона мощностей в настоящее время используют асинхронные генераторы (АГ). Это требует дополнительных исследований поведения АГ при эксплуатации в единой энергосистеме, а также при автономной установке;

- (10÷15) % всей производимой в мире электроэнергии расходуется на потери, на нагрев медных и алюминиевых проводов, поэтому использование сверхпроводящих генераторов, а, что еще более перспективно, всего электроэнергетического цикла (генератор, шинопроводы, трансформаторы, передающие сети, коммутационная, защитная и измерительная аппаратура), требует непрерывных исследований.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевченко В.В. Пути преодоления возможного энергокризиса в энергосистеме Украины // Збірник наукових праць Донецького Інституту залізничного транспорту. – №29. – 2012. – С. 77-81.
2. Шевченко В.В., Минко А.Н. Сравнительная оценка массогабаритных параметров турбогенераторов с воздушной и водородной системами охлаждения // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ "ХПИ". – №3 – 2010. – С. 108–112.
3. Шевченко В.В. Пути повышения мощности турбогенераторов при проведении работ по их реабилитации // Системы обробки інформації. Збірник наукових праць. Харківський університет повітряних сил. – Харків. – 2012 – Вип. 7 (105). – С. 152-155.

**Bibliography (transliterated):** 1. Shevchenko V.V. The ways overcome possible energy crisis in the power system of Ukraine. *The Collection of proceedings of Donetsk Institute of railway transport*, 2012, no.29, pp. 77-81. 2. Shevchenko V.V., Minko A.N. The comparative evaluation of turbogenerators mass and size parameters with air and hydrogen cooling systems. *Bulletin of NTU "KhPI"*, 2010, no.3, pp. 108-112. 3. Shevchenko V.V. The ways to increase turbogenerators power in the execution works during the rehabilitation. *The systems of information processing. The collection of scientific works Kharkov Air Forces University*, 2012, no.7 (105), pp. 152-155.

Поступила (received) 02.10.2013

Шевченко Валентина Владимировна<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,  
Мильх Владимир Иванович<sup>1</sup>, д.т.н, проф.,  
Потоцкий Дмитрий Васильевич<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт",  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,  
тел/phone +38 057 7076514,  
e-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua, zurbagan\_@mail.ru

V.V. Shevchenko<sup>1</sup>, V.I. Milykh<sup>1</sup>, D.V. Pototskyi<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"  
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

### Technical and economic aspects of electric machine industry development with account of electric power development directions.

A critical assessment of the existing views on the world energy development prospects is an integral part of independent policy elaboration in this field for any state. Consideration of prospective power industry development options is a determinative factor in electric machine-building progress as a generation system production industry.

**Key words** – power engineering, environmental safety, electrical machinery, turbogenerator, comprehensive approach, economy.