

УДК 621.311

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**И. В. Жежеленко, В. Е. Саравас**Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет»
ул. Университетская, 7, г. Мариуполь, 87500, Украина. E-mail: saravas_v_e@mail.ru**Г. Г. Трофимов**Алматинский университет энергетики и связи
ул. А. Байтурсинова, 126, г. Алматы, Казахстан

Рассмотрены вопросы повышения энергетической эффективности электрических сетей и систем энерго-снабжения за счет снижения потерь и повышения качества электроэнергии в электрических сетях. Дано определение энергетической эффективности, а также факторов, обуславливающих формирование данного критерия надежности систем электроснабжения. Приведено значение технических потерь электроэнергии в современных странах; приведена оценка значения потерь в Украине в сравнении с уровнем валового внутреннего продукта с использованием паритета покупательной способности. Показана значимость эквивалента реактивной мощности при расчете технических потерь, приведены результаты расчетов для электрических сетей различных уровней напряжений, указаны значения погрешности. Дана экспертная оценка значениям ежегодных потерь, связанным с низким качеством электроэнергии в Украине и мире. Подчеркнута значимость проблемы повышения качества электрической энергии, обращено внимание на усилившуюся роль искажения синусоидальности кривой напряжения в определении надежности электроснабжения, а также его связь с экономическими показателями развития страны. Показана важность в конкретных случаях превышения стоимости мероприятий по коррекции уровня несинусоидальности над значением экономического ущерба. Так, на примере таких типов частотно-регулируемого электропривода, как асинхронно-вентильный каскад и вентильный двигатель, показана важность учета всех гармонических составляющих в кривой входного напряжения (тока) для корректной оценки уровня качества электрической энергии. Сформулированы значения показателей надежности электроснабжения в комплексе показателя энергетической эффективности, приведены значения зарубежных нормативов, а также их значения в странах СНГ. Рассмотрены вопросы степени компенсации реактивной мощности в электрических сетях. Дана экспертная оценка потенциала снижения потерь электроэнергии в электрических сетях. В выводах приведены комплексные мероприятия, обуславливающие повышение энергетической эффективности в электрических сетях.

Ключевые слова: электрические сети, энергетическая эффективность, потери электроэнергии, качество электрической энергии.

АНАЛІЗ ЧИННИКІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЕНЕРГЕТИЧНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**І. В. Жежеленко, В. Є. Саравас**Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет»
вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, 87500, Україна. E-mail: saravas_v_e@mail.ru**Г. Г. Трофимов**Алматинський університет енергетики та зв'язку
вул. А. Байтурсинова, 126, м. Алмати, Казахстан

Розглянуто питання підвищення енергетичної ефективності електричних мереж і систем енергопостачання за рахунок зниження втрат і підвищення якості електроенергії в електричних мережах. Надано визначення енергетичної ефективності, а також чинників, що обумовлюють формування цього критерію надійності систем електропостачання. Наведено значення технічних втрат електроенергії в сучасних країнах; приведено оцінку значення втрат в Україні порівняно з рівнем валового внутрішнього продукту з використанням паритету купівельної спроможності. Показано значимість еквівалента реактивної потужності при розрахунку технічних втрат, наведено результати розрахунків для електричних мереж різних рівнів напруг, вказано значення похибки. Дано експертну оцінку значень щорічних втрат, пов'язаних з низькою якістю електроенергії в Україні й у світі. Підкреслено важливість проблеми підвищення якості електричної енергії, звернуто увагу на посилення ролі спотворення синусоїдальності кривої напруги у визначенні надійності електропостачання, а також його зв'язок з економічними показниками розвитку країни. Показано важливість у конкретних випадках перевищення вартості заходів щодо корекції рівнів несинусоїдальності над значенням економічної шкоди. Так, на прикладі таких типів частотно-регульованого електроприводу, як асинхронно-вентильний каскад і вентильний двигун, показано важливість урахування всіх гармонічних складових у кривій входної напруги (струму) для коректної оцінки рівня якості електричної енергії. Сформульовано значення показників надійності електропостачання в комплексі показника енергетичної ефективності, наведено значення зарубіжних нормативів, а також їх значення в країнах СНД. Розглянуто питання компенсації реактивної потужності в електричних мережах. Дано експе-

ртну оцінку потенціалу зниження втрат електроенергії в електричних мережах. У висновках наведено комплексні заходи, які обумовлюють підвищення енергетичної ефективності в електричних мережах.

Ключові слова: електричні мережі, енергетична ефективність, втрати електроенергії, якість електричної енергії.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Энергоэффективность функционирования электрических систем и сетей и систем электроснабжения различных производств определяется качеством и надежностью электроснабжения, рациональным уровнем технологических потерь электроэнергии, удельных затрат и безопасным производством.

Повышение энергетической эффективности производства, передачи и распределения электроэнергии было и остается одной из важнейших проблем современной энергетики [1]. В круг вопросов этой комплексной проблемы входят такие составляющие, как снижение технологических потерь, повышение качества электроэнергии и надежности функционирования электрических сетей и систем, анализ и коррекция действующих в настоящее время нормативов.

Целью работы является анализ факторов, которые оказывают существенное влияние на энергетическую эффективность систем электроснабжения, а именно: экономического эквивалента реактивной мощности K_{Σ} , величины относительных потерь электроэнергии в электрических сетях, показателей качества электроэнергии, а также показателей надежности электроснабжения.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Потери мощности и напряжения связаны с активными P и реактивными Q нагрузками, протекающими по линии с сопротивлением R , составляют

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R = \frac{P^2 (1 + \operatorname{tg}\varphi)}{U^2} R; \quad (1)$$

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U} = \frac{PR(1 + \varepsilon \operatorname{tg}\varphi)}{U}, \quad (2)$$

где $\operatorname{tg}\varphi$ – коэффициент реактивной мощности; $\operatorname{tg}\varphi = \frac{Q}{P}$; $\varepsilon = \frac{X}{R}$.

Уравнения приведены без учета значений экономического эквивалента реактивной мощности и коэффициентов, влияющих на изменение напряжения.

Для оценки влияния реактивной мощности на увеличение потерь мощности и напряжения используют следующие из приведенных выше выражений:

$$d_{p\Delta P} = 1 - \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2\varphi}, \quad \% \quad (3)$$

$$d_{p\Delta U} = 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon \operatorname{tg}\varphi}, \quad \% \quad (4)$$

Из этих выражений следует, что значения потерь мощности и напряжения возрастут с ростом $\operatorname{tg}\varphi$. Передача реактивной мощности снижает возможность передачи активной, увеличивая потери мощности и энергии (при $\operatorname{tg}\varphi = 0,5$ – на 20 % суммар-

ных потерь) [2]. Потери напряжения, связанные с передачей реактивной мощности, составляют примерно 1/3 суммарных потерь напряжения в сетях 6–10 кВ и примерно 2/3 – в сетях более высокого напряжения. Тенденция развития современных электрических систем характеризуется ростом удельного потребления реактивной мощности (до 1 квар/кВт) при уменьшении возможного и целесообразного использования генераторов электростанций, поэтому вопрос компенсации реактивной мощности приобретает особое значение.

Например, в Польской народной республике принято считать, что мощность конденсаторов должна оставлять около 50 % установленной мощности генераторов. Во Франции, ФРГ, скандинавских странах – 35 % активной пиковой мощности.

На сегодня оптимальное значение $\operatorname{tg}\varphi$ в Японии и европейских странах составляет 0,2–0,4. В странах СНГ до последнего времени, в часы наибольшей нагрузки в сетях 0,38 кВ, 6–20 кВ $\operatorname{tg}\varphi$ составляет 0,35–0,4.

Экономический эквивалент реактивной мощности K_{Σ} отражает приращение потерь активной мощности во всей электрической сети при увеличении реактивной мощности узла сети (подстанции, электростанции и др.), другими словами, определяет удельный прирост активной мощности на реактивной в узле сети. Практика свидетельствует о целесообразности использования K_{Σ} в расчетах регулирования напряжения и реактивной мощности, определения рациональных схем подстанций, числа работающих трансформаторов и другого электрооборудования, оптимизационных расчетах в электрических сетях предприятий и энергосистем и т.д. Из приведенного выше определения K_{Σ}

$$K_{\Sigma} = \frac{\Delta P_Q}{\Delta Q} = \frac{d(\Delta P)}{dQ}, \quad (5)$$

где ΔP_Q – дополнительные потери активной мощности при изменении реактивной на величину ΔQ [3].

Простейшие преобразования позволяют получить окончательное выражение

$$K_{\Sigma} = \frac{2QR}{U^2}, \quad (6)$$

где R – сопротивление сети от шин источника до нагрузки; Q и U – реактивная мощность и напряжение на шинах подстанций.

На значение K_{Σ} оказывает влияние изменение напряжения. Проектная и эксплуатационная практика свидетельствуют: потери напряжения составляют около нуля, потерь в сети 6–10 кВ и более 2/3 в сетях более высокого напряжения. Доказано, что «до-

бавка» за счет влияния изменений напряжения $K_{\Delta(U)}$ определяется по выражению

$$K_{\Delta(U)} = \left(\frac{\delta \Delta P}{\delta U} \right) \left(\frac{\delta U}{\delta Q} \right), \quad (7)$$

которое, после выполнения необходимых преобразований приобретает вид:

$$K_{\Delta(U)} = 2 \frac{\Delta P}{U^2} X = \frac{2 \Delta P_*}{\operatorname{tg} \varphi}. \quad (8)$$

Здесь X – индуктивное сопротивление сети; $\Delta P_* = \Delta P / P$.

Было доказано, что учет генерации реактивных мощностей воздушных линий 110 кВ, ввиду их малости, не обязателен.

Для количественной оценки влияния напряжения, т.е. значимости величины $K_{\Delta(U)}$, находится отношение

$$\delta_U = \frac{K_{\Delta(U)}}{K_{\Delta}}, \quad (9)$$

которое в узлах сетей 10, 35 и 110 кВ составляет в пределах соответственно 0,1–0,2; 0,3–0,4; 0,2–0,4. Анализ результатов расчета K_{Δ} , выполненных авторами данной работы, а также данных из литературных источников позволил заключить, что уровни K_{Δ} , рассчитанные с использованием средних (расчетных) значений номинальных данных электрооборудования, отличаются на 30–50 % при питании от главных понижающих подстанций (ГПП) и подстанций глубокого ввода (ПГВ) на напряжении 110 кВ, на 13–25 % – на напряжении 35 кВ и 10–15 % – для узлов в сети 10 кВ.

Величина относительных потерь электроэнергии в электрических сетях промышленно развитых стран мира находится в пределах 4–6 % [4]. Эти значения определяются, исходя из ряда показателей, в том числе внутреннего валового продукта (ВВП), который характеризует конечный результат производственной деятельности экономических единиц в сферах производства и определяется стоимостью товаров и услуг, произведенных этими единицами для конечного использования. Такие промышленно развитые страны характеризуются высоким значением внутреннего валового продукта по паритету покупательной способности (ППС) на душу населения, превышающим 50 тыс. долларов США. В то же время в странах с ВВП по ППС менее 10 тыс. долл. США относительные потери больше – в Молдове, России, Албании, Польше относительные потери превышают 20 %. В Украине значение ВВП в 2015–2016 годах составило 8500 долларов США, а уровень относительных потерь – около 20 %.

Из приведенных цифр видно, что имеет место связь уровней потерь электроэнергии в электрических сетях различных стран как с особенностями электрических сетей и их режимами, так и с экономикой этих стран. Очевидно, что в странах с более развитой экономикой выше, как правило, техниче-

ская культура производства, используются более современные системы управления режимами работы электрических сетей, контроля и учета электроэнергии, четкая нормативная база и система тарифного регулирования. Однако простое сравнение относительных потерь электроэнергии в электрических сетях Украины и зарубежных электрических сетях без анализа этих потерь в сопоставимых условиях работы некорректно.

Для оценки значений ежегодных финансовых затрат прибегнем к экспертной оценке, основанной на известных цифрах [5]. Современное потребление электроэнергии в мире составляет примерно 20 триллионов кВт ч, потери электроэнергии от несоблюдения требований к качеству электрической энергии оцениваются величиной 500 млрд. долл. США, среднее значение тарифа на электроэнергию 0,1 долл./кВт ч. Удельный ущерб от низкого качества электроэнергии составляет $500 \cdot 10^9 / 20 \cdot 10^{12} = 0,025$ долл./кВт ч.

Выработка электроэнергии в Украине в 2016 г. составила 154,82 млрд. кВт ч, стоимость потерь $154,82 \cdot 0,025 = 3,9$ млрд. долл. США

Таким образом, оценочная стоимость потерь электрической энергии в 2016 году в Украине составила примерно 4 млрд. долл. Не прибегая к вычислению коэффициента дефляции, примем соотношение стоимости грн. / долл. равным восьми, согласно принятому при сопоставительных расчетах (по курсу 2012 г). Тогда оценочное значение стоимости потерь электроэнергии в Украине составит $4 \cdot 8 = 32$ млрд. гривен.

В электрических сетях России выработка электрической энергии в 2016 г. составила 1071,7 млрд. кВт ч. Оценочное значение потерь – $1071 \cdot 0,025 = 27$ млрд. долларов.

Приведенные выше экспертные оценки стоимости потерь электроэнергии в электрических сетях являются приближенными и служат для представления порядка значений искомым параметров электроэнергии.

В процессе передачи, распределения и потребления электроэнергии под полезным эффектом повышения энергетической эффективности понимают не только снижение потерь электроэнергии в электрических сетях, но и повышение качества электроэнергии, пропускной способности электрической сети и надежности электроснабжения потребителей. Процесс считается энергетически эффективным, если выполняется условие минимума относительных потерь энергии в сети и обеспечиваются нормативные или договорные требования по пропускной способности электрической сети, качеству надежности электроснабжения.

Украинский и зарубежный опыт свидетельствуют, что в сравнении с другими мероприятиями наибольшая энергетическая эффективность обеспечивается за счет внедрения средств компенсации реактивной мощности.

Как известно, оптимальным решением является компенсация реактивной мощности у потребителей, осуществляемая в основном регулируемые и нерегулируемые конденсаторными батареями в сочетании с фильтрами токов высших гармоник, если в электрических сетях имеется несинусоидальность напряжения. Чем ближе к потребителям реактивной мощности устанавливаются компенсирующие устройства, тем выше энергетическая эффективность системы электроснабжения, тем меньше срок окупаемости затрат на установку компенсирующих устройств.

В связи с высокой энергетической эффективностью компенсации реактивной мощности, в большинстве промышленно развитых стран ей уделяется большое внимание. Так, во Франции, Швеции, Германии мощность конденсаторных установок составляет 35 % активной пиковой мощности, в США и Японии – около 70 %. В отдельных энергетических компаниях США мощность установленных конденсаторов составляет 100 % мощности генераторов. Во многих странах наблюдается тенденция уменьшения выдачи генераторами электростанций реактивной мощности за счет увеличения доли реактивной мощности, вырабатываемой конденсаторами [6].

В настоящее время нет необходимости доказывать значимость проблемы *качества электроэнергии*. Она относится к числу важнейших проблем современной электроэнергетики и является частью проблемы повышения энергоэффективности электрических сетей.

Одним из регламентируемых показателей качества электрической энергии является несинусоидальность напряжения, который характеризуется коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения K_U и коэффициентом n -й гармонической составляющей кривой напряжения $K_{U(n)}$.

Так как в общем случае отсутствует зависимость между энергией гармонической помехи и степенью воздействия ее на электрическую сеть, в различных странах существуют часто значительно отличающиеся друг от друга стандарты (нормы, указания, положения и т.п.), в которых, однако, просматривается тенденция в той или иной мере ограничить несинусоидальность в узлах подключения источников высших гармоник (ВГ) и проникновение их в сети других напряжений [7]. При этом количественные характеристики допустимых значений ВГ или мощностей источников определяются, главным образом, на основании экспертных оценок с учетом особенностей электрических сетей, линейных и нелинейных нагрузок, преобладающих в данной стране.

В Украине требования к качеству электроэнергии изложены в ГОСТ 13109-97.

Непрерывный рост установленной мощности нелинейных, несимметричных и резкопеременных нагрузок не всегда сопровождался своевременным внедрением решений, направленных на коррекцию качества электроэнергии, даже в промышленно раз-

витых странах Западной Европы. Так, в распределительных сетях напряжением 230/400 В в Швейцарии за десятилетний период содержание высших гармоник возросло на 0,7 %.

Важнейшее влияние на энергоэффективность оказывает несинусоидальность напряжения, которая обусловлена интенсивным внедрением различного рода нелинейных нагрузок, подключаемых к электрическим сетям различного напряжения в последнее десятилетие. Это вызывает искажение синусоидальной формы напряжения или тока не только у самого потребителя, но и во внешней сети. В случае превышения нормируемых уровней электромагнитных помехи могут не только привести к нарушению помехоустойчивости технических средств (в частности, устройств микропроцессорной релейной защиты) в энергосистеме, на электростанциях и подстанциях, но и влияют на технологический процесс в системах электроснабжения. Электромагнитные помехи вызывают сбои и нарушения в работе цепей управления, ухудшают работу устройств автоматики, в значительной степени приводят к увеличению общего эффективного тока в фазовых и, особенно, нейтральных проводах элементов самой сети и электрооборудования. Кроме того, за счет них возрастают потери в сети, снижается коэффициент мощности, вызывая увеличение нагрева и перегрева всего электрооборудования, что приводит к ускоренному старению изоляции не только силовых трансформаторов энергосистемы, но и всех электрических аппаратов электрических сетей.

В конечном итоге это приводит не только к ухудшению состояния изоляции электрооборудования и, в ряде случаев, к выходу его из строя, но и к ухудшению экономических показателей и в целом энергетической эффективности электрических сетей.

Как было уже отмечено, возникновение несинусоидальных режимов связано с подключением к сети электроприемников, вольтамперные характеристики которых являются нелинейными. Одними из таких нелинейных элементов электрической сети на промышленных предприятиях являются частотно-регулируемые электроприводы. С учетом того, что на сегодня доля энергии, потребляемой приводом, составляет около 70 % в промышленности, актуальным является изучение отдельных типов частотно-регулируемых электроприводов, таких как асинхронно-вентильный каскад (АВК) [8, 9].

Источником гармонических искажений кривой входного тока (напряжения) АВК, генерируемых в питающую сеть, является управляемый инвертор преобразователя частоты [10].

Для исследования влияния регулируемого электропривода по схеме АВК на питающую сеть с целью обеспечения энергоэффективности следует учитывать не только влияние высших гармоник, но и интергармоник (ИГ) во взаимосвязи с различными параметрами рассматриваемой системы. Это требует использования сложного математического аппарата и применение методов многофакторного анализа для обеспе-

чения минимальных значений погрешности [11].

Проведенные исследования амплитудно-частотных спектров входного тока АВК позволяют сделать вывод, что для корректной оценки влияния гармонических искажений, генерируемых АВК в питающую сеть, необходимо учитывать амплитуды ИГ. Относительные амплитуды ИГ варьируются в диапазоне 0,2–37,2 %, а значит, могут существенно повлиять на степень оценки искажений кривых токов.

Как показали многочисленные исследования, амплитуды ВГ и ИГ входного тока АВК существенно зависят от мощности нагрузки на валу двигателя.

На рис. 1 приведен пример графиков зависимости амплитуд 5-й ВГ и ее боковых составляющих, т.е. интергармоник, от изменения нагрузки на валу двигателя. Из рис. 1 видно, что характер изменения амплитуд ИГ аналогичен характеру изменения ВГ, и в отдельных случаях значения ИГ могут превышать значения ВГ – при относительных значениях нагрузки в диапазоне 0,6–1 уровень ИГ с относительной частотой $\nu = 5,2$ превышает уровень 5-й ВГ.

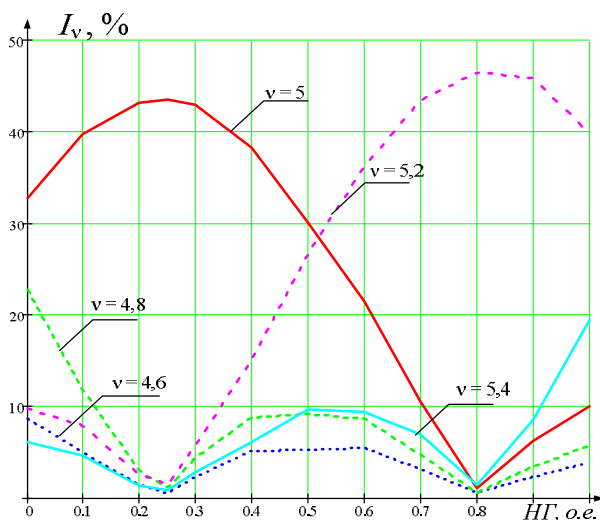


Рисунок 1 – Зависимость изменений 5-й ВГ и ИГ входного тока АВК от изменения нагрузки на валу двигателя

Исследования показали, что для приведенного типа АВК ИГ составляют до 90 % всех гармонических искажений данного спектра входного тока. Следовательно, определение показателей качества электроэнергии при работе преобразователя частоты без учета ИГ является некорректным.

Результаты расчета K_U сетевого напряжения исследуемого АВК без учета и с учетом ИГ приведены в табл. 1. Значения ВГ и ИГ, необходимые для расчета, получены в результате проведения модельных экспериментов с изменением значения угла управления инвертором β .

Данные, приведенные в табл. 1, показывают, что величина коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, рассчитанная только с учетом ВГ, составляет 75–94 % коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, расчи-

танного с учетом ИГ. Отсюда следует, что учет ИГ при определении коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения ведет к значительным погрешностям, что может сказаться на решении вопроса минимизации гармонических искажений. Так, например, для случая $\beta = 75^\circ$ при расчете коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения с учетом ИГ K_U составил 5,15 %, что превышает допустимые нормы, изложенные в ГОСТ 13109-97, и требует установки фильтрокомпенсирующих устройств [12], тогда как соответствующий K_U без учета ИГ составил 4,79 %, что является допустимым.

Таблица 1 – Значения K_U без учета и с учетом ИГ при изменении β

β , град	K_U без учета ИГ, %	K_U с учетом ИГ, %
15	3,43	4,55
30	5,03	6,3
45	6,51	8,1
60	5,76	7,2
75	4,79	5,1
85	3,05	3,5

Другие показатели качества электроэнергии также оказывают влияние на энергоэффективность передачи электроэнергии по электрическим сетям, надежность и экономические показатели электрооборудования сети и, в конечном итоге, на условия их работы.

На сегодня более 60 % электрической энергии в промышленности используется в преобразованном виде (в металлургии на некоторых производствах – до 100 %). Этому способствует в значительной мере внедрение частотных преобразователей в системах электропривода. Как следствие, не только существенно возрос уровень канонических высших гармоник, но появился достаточно широкий спектр так называемых интергармоник – межгармоник. Кроме этого, заметно возрос выход из строя электродвигателей вследствие повреждения изоляции (до 20–25 %). Но при этом значительно возрос эквивалентный уровень несинусоидальности. Так, эквивалентное действующее значение ВГ непосредственных преобразователей частоты может, в зависимости от режима работы, в несколько раз превосходить номинальные значения (на основной частоте); преобразователь со звеном постоянного тока генерирует ВГ и ИГ в меньшей степени [13].

Практика свидетельствует о том, что в этом случае стоимость мероприятий по компенсации уровней ВГ может быть соизмерима или больше стоимости ущерба от воздействия ВГ и ИГ. Высшие уровни ВГ и ИГ усложняют решение вопросов концепции Smart-grid, в которой учитывается ряд факторов,

определяющих необходимость принципиальных преобразований в сфере электроэнергетики. Сюда относят, в первую очередь, факторы надежности и технологического прогресса, а также факторы роста потребителей и изменения рынка, факторы экологической безопасности.

В последние десятилетия вопросы качества электроэнергии рассматриваются в контексте задач электромагнитной совместимости.

Одним из важнейших показателей энергетической эффективности служит *показатель надежности электроснабжения*.

В ряде энергообъединений СНГ показатель (индекс) надежности находится в диапазоне 0,96–0,98, что ниже норматива, составляющего 0,996. Зарубежные нормативы надежности, отвечающие современному состоянию энергетики: в США – 0,9997, во Франции – 0,9997, Нидерландах – 0,995, Ирландии – 0,9991, скандинавских странах – 0,999. Переход на более высокий уровень надежности потребует затрат в размере 0,1–0,2 млн. долл./год на 1 МВт нагрузки. Использование высоких капиталовложений должно обеспечить повышение надежности всех компонентов электроэнергетических систем, использующих мощность магистральных и распределительных электрических сетей, инвестиций в обеспечение устройств, противоаварийной автоматики и др.

ВЫВОДЫ. Для повышения энергетической эффективности требуется:

- обеспечение поддержания нормированных уровней качества электрической энергии в узлах электрических присоединений;

- уменьшение уровней технологических потерь электрической энергии, в частности, корректного решения проблем реактивной мощности, в первую очередь, путем обеспечения экономически обоснованных значений и внедрения компенсирующих устройств с регулированием;

- решение вопросов оптимальной надежности электрических сетей и систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Енергетична ефективність України. Кращі проектні ідеї [електронне видання]: проект «Професіоналізація та стабілізація енергетичного менеджменту в Україні» / Уклад. С.П. Денисюк, О.В. Кочар, Ю.В. Чернецька. – К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2016. – 79 с.

2. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руко-

водство для практических расчетов. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.

3. Ущাপовський К.В. Прогнози розвитку електроенергетики України: оцінка надійності та достовірності // *Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит*. – 2015. – Вып. 7. – С. 14–23.

4. Pivnyak G.G., Zhezhelenko I.V., Papaika Yr.A. Estimating Economic Equivalent of Reactive Power in the Systems of Enterprise Electric Power Supply // *Науковий вісник НГУ*. – 2016. – Вып. 5. – С. 62–66.

5. Барский В.А. и др. Электропривод как энергосберегающий фактор в промышленности ЖКХ Украины // *Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит*. – 2013. – Вып. 9. – С. 14–23.

6. Качество электроэнергии: современные требования и их обеспечение в электрических сетях железных дорог / Под ред. Г.П. Кутового. – М.: ЭкоПресс, 2014. – 264 с.

7. Massimo A., Cataliotti A., Favuzza S., Graditi G. Theoretical and Experimental Comparison of Total Harmonic Distortion Factors for the Evaluation of Harmonic and Interharmonic Pollution of Grid-Connected Photovoltaic Systems // *IEEE Transactions On Power Delivery*. – Iss. 21/2006 (3). – PP. 1390–1397.

8. Chang G.W., Chen Sh.-K. An analytical approach for characterizing harmonic and interharmonic currents generated by VSI-fed adjustable speed drives // *IEEE Transactions On Power Delivery*. – Iss. 20/2005 (4). – PP. 2585–2593.

9. Stavros P.A., Papadopoulos M.P. Harmonic Analysis in a Power System with Wind Generation // *IEEE Transactions On Power Delivery*. – Iss. 21/2006 (4). – PP. 2006–2016.

10. Ben-Sheng C., Hsu Y. An Analytical Approach to Harmonic Analysis and Controller Design of a STATCOM // *IEEE Transactions On Power Delivery*. – Iss. 22/2007 (1). – PP. 423–432.

11. Lobos T., Leonowicz Z., Rezmer J. Harmonics and interharmonics estimation using advanced signal processing methods // *Proc. 9th IEEE Int. Conf. Harmonics and Quality of Power*. – Iss. 1/2000. – PP. 335–340.

12. Zoba A.F. The Optimal Passive Filters to Minimize Voltage Harmonic Distortion at a Load Bus // *IEEE Transactions On Power Delivery*. – Iss. 20/2005 (2). – PP. 1592–1597.

13. Саравас В.Е. Несинусоидальные режимы в электрических сетях с вентильными двигателями и асинхронно-вентильными каскадами. – Мариуполь: ПГТУ, 2016. – 147 с.

AN ANALYSIS OF THE FACTORS WHICH INFLUENCE ON THE ENERGY EFFICIENCY OF POWER SUPPLY SYSTEMS

I. Zhezhelenko, V. Saravas

The State Higher Educational Institution "Priazovsky State Technical University"
vul. Universitetskaya, 7, Mariupol, 87500, Ukraine. E-mail: saravas_v_e@mail.ru

G. Trofimov

Almaty University of Energy and Communications
vul. Baytursynova, 126, Almaty, Kazakhstan

Purpose. The concern of the research is to analyze the factors of increasing the energy efficiency of production, rejection and distribution of electric energy. These are such components as reduction of technological losses, improvement of electric power quality and reliability of electric networks and systems functioning, analysis and correction of current standards. **Methodology.** The methods of economic analysis of the magnitude of relative losses taking into account the gross domestic product at purchasing power parity are used. Also, to analyze the levels of Total Harmonic Distortion couple to into network by electrical drive, the combined simulation method and the multivariate analysis method were applied. **Results.** Expressions are given which are used to evaluate the effect of reactive power on increasing power and voltage losses. The economic equivalent of reactive power is calculated, Also are given the values of the relative losses in different countries. The results of calculations are presented, which show that the level of relative losses in Ukraine is about 20 %. It is also shown that one of the most important indicators of energy efficiency is the reliability index of electricity supply. **Originality.** The connection between the levels of electricity losses in the electrical networks of different countries as with the peculiarities of electrical networks and their modes, and with the economies of these countries is shown. In countries with a more developed economy the technical production culture is higher, more modern systems for managing the operating modes of electrical networks are used. **Practical value.** There is shown that in order to increase the energy efficiency it is required to maintain the normalized of the power quality levels. It is necessary to reduce the levels of technological losses of electrical energy, in particular, by correctly solving the problems of reactive power. References 11, tables 1, figures 1.

Key words: electrical networks, energy efficiency, energy losses, power quality, Total Harmonic Distortion.

REFERENCES

1. Denisyuk, S.P., Kotsar, O.V. and Chernetska, Yu.V. (2016), *Enerhetychna efektyvnist Ukrayiny, Krashchi proektni ideyi [elektronne vydannya]: proekt "Profesionalizatsiya ta stabilizatsiya enerhetychnoho menedzhmentu v Ukrayini"*, [Energy efficiency Ukraine, The best project ideas [e-publication], project "Professionalization and stabilization of energy management in Ukraine], National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kiev. (in Ukrainian)
2. Zhelezko, Yu.S. (2009), *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost. Kachestvo elektroenergii, rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [Loss of electricity, Reactive power, The quality of electricity. Manual for practical calculations], ENAS, Moscow. (in Russian)
3. Ushchapovskiy, K.V. (2015), "Predictions for the development of electricity-power engineering of Ukraine", *Energoberezeniye, Energetika, Energoaudit*, Vol. 7, pp. 14–23. (in Ukrainian)
4. Pivnyak, G.G., Zhezhelenko, I.V. and Papaika, Yr.A. (2016), "Estimating Economic Equivalent of Reactive Power in the Systems of Enterprise Electric Power Supply", *Naukovyi visnik NGU*, Vol. 5, pp. 62–66.
5. Barsky, V.A. et al. (2013), "Electric drive as an energy-saving factor in the housing and communal services industry in Ukraine", *Energoberezeniye, Energetika, Energoaudit*, Vol. 9, pp. 14–23. (in Russian)
6. Kutovoy, G.P. (2014), *Kachestvo elektroenergii, sovremennyye trebovaniya i ikh obespecheniye v elektricheskikh setyakh zheleznykh dorog* [The quality of electricity: modern requirements and their provision in the electrical networks of railways], Eco-Press, Moscow. (in Russian)
7. Zobaa, A.F. (2005), "The Optimal Passive Filters to Minimize Voltage Harmonic Distortion at a Load Bus", *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 20, no. 2, pp. 1592–1597.
8. Chang, G.W. and Chen, Sh.-K. (2005), "An analytical approach for characterizing harmonic and interharmonic currents generated by VSI-fed adjustable speed drives", *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 20, no. 4, pp. 2585–2593.
9. Stavros, P.A. and Papadopoulos, M.P. (2006), "Harmonic Analysis in a Power System with Wind Generation", *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 21, no. 4, pp. 2006–2016.
10. Ben-Sheng, C. and Hsu, Y. (2007), "An Analytical Approach to Harmonic Analysis and Controller Design of a STATCOM", *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 22, no. 1, pp. 423–432.
11. Massimo, A., Cataliotti, A., Favuzza, S. and Graditi, G. (2006), "Theoretical and Experimental Comparison of Total Harmonic Distortion Factors for the Evaluation of Harmonic and Interharmonic Pollution of Grid-Connected Photovoltaic Systems", *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 21, no. 3, pp. 1390–1397.
12. Lobos, T., Leonowicz, Z. and Rezmer, J. (2000), "Harmonics and interharmonics estimation using advanced signal processing methods", *Proc. 9th IEEE Int. Conf. Harmonics and Quality of Power*, Vol. 1, pp. 335–340.
13. Saravas, V. (2016), *Nesinusoidalnye rezhimy v elektricheskikh setyakh s ventilnimi dvigatelyami i asinkhronno-ventilnymi kaskadami* [Nonsinusoidal conditions in the electric networks with the permanent-magnet brushless AC motors and asynchronous-valve cascades], PSTU, Mariupol. (in Russian)

Стаття надійшла 07.03.2017.