

DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-28-35

УДК 621.311

## Основные направления повышения эффективности производства, передачи и распределения электрической энергии

И. В. Жежеленко<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Приазовский государственный технический университет (Мариуполь, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2018  
Belarusian National Technical University, 2018

**Реферат.** Сформулированы основные направления повышения эффективности производства, передачи и распределения электрической энергии. Установлена связь между значением потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям различных стран с уровнем экономики этих государств, характеризующаяся значением внутреннего валового продукта по паритету покупательной способности на душу населения. В странах с валовым внутренним продуктом по паритету покупательной способности на душу населения менее 20 тыс. дол. США потери электроэнергии при ее транспорте в электрических сетях в 1,5–2,5 раза больше, чем в электрических сетях промышленно развитых государств, где указанный паритет покупательной способности лежит в пределах 30,4–54,5 тыс. дол. В странах с более развитой экономикой выше техническая культура производства, передачи и распределения электроэнергии, используются современные системы управления режимами работы электрических сетей, контроля и учета электроэнергии, живут и работают платежеспособные и дисциплинированные потребители, действуют четкая нормативно-правовая база и система тарифного регулирования. Однако процесс передачи и распределения электроэнергии эффективен, если выполняется не только минимум относительных потерь, но и обеспечиваются нормальные (договорные) требования по пропускной способности, качеству и надежности электроснабжения. Рассмотрена возможность аналитического определения оптимального значения резервной мощности на электростанциях, обеспечивающая требуемый уровень надежности энергосистемы.

**Ключевые слова:** эффективность, производство, передача и распределение электроэнергии, относительные потери электроэнергии, индекс надежности энергосистем

**Для цитирования:** Жежеленко, И. В. Основные направления повышения эффективности производства, передачи и распределения электрической энергии / И. В. Жежеленко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 1. С. 28–35. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-28-35

---

### Адрес для переписки

Жежеленко Игорь Владимирович  
Приазовский государственный  
технический университет  
ул. Университетская, 7  
87500, г. Мариуполь, Украина  
Тел.: +380 629 44-65-51  
epp@pstu.edu

### Address for correspondence

Zhezhelenko Igor V.  
Pryazovskyi State  
Technical University  
7 University str.,  
87500, Mariupol, Ukraine  
Tel.: +380 629 44-65-51  
epp@pstu.edu

---

## The Main Directions of Improving the Efficiency of Production, Transmission and Distribution of Electrical Energy

I. V. Zhezhelenko<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Pryazovskyi State Technical University (Mariupol, Ukraine)

**Abstract.** The main directions of increase of efficiency of production, transmission and distribution of electric energy have been formulated. The relation between the values of electricity losses during transmission via power grids of different countries and the level of the economies of these countries characterized by the value of gross domestic product at purchasing power parity per capita has been established. In the countries with a gross domestic product at purchasing power parity per capita less than 20 thousand US dollars electricity losses during its transmission via power grids are 1.5–2.5 times more than the ones transmitted via power grids of the industrialized countries where the specified purchasing power parity is in the range of 30.4–54.5 thousand US dollars. In the countries with more developed economies the technical culture of production, transmission and distribution of electricity is higher; the modern control systems of operation modes of electrical networks are used as well as of monitoring and accounting of electricity; also there are solvent and disciplined consumers in such countries as well as clear regulatory framework and tariff regulation system. However, the process of transmission and distribution of electricity is effective if not only low relative losses take place, but the normal (contractual) requirements for carrying capacity, quality and reliability of electricity supply are provided. The possibility of analytical determination of the optimum value of reserve capacity of power plants providing the required level of reliability of the power system has been considered.

**Keywords:** efficiency, production, transmission and distribution of electric power, relative power losses, reliability index of power systems

**For citation:** Zhezhelenko I. V. (2018) The Main Directions of Improving the Efficiency of Production, Transmission and Distribution of Electrical Energy. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (1), 28–35. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-28-35 (in Russian)

### Введение

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

Процесс передачи и распределения электроэнергии эффективен, если выполняется не только минимум относительных потерь, но и обеспечиваются нормальные (договорные) требования по пропускной способности, качеству и надежности электроснабжения.

В настоящее время более 70 % электроэнергии поступает в сеть в преобразованном виде (в металлургии – более 90 %), поэтому наблюдаются возрастание уровней электромагнитных потерь, их отрицательное влияние на системы управления, контроля и сигнализации и ухудшение электромагнитной обстановки на объектах электроэнергетики [1–6].

Для нормализации качества электроэнергии также необходима минимизация кондуктивных помех, в первую очередь высших гармоник, несимметрии и колебаний напряжения.

### Относительные потери электроэнергии в электрических сетях

Значения относительных потерь электроэнергии в электрических сетях промышленно развитых стран по усредненным данным за 2013–2015 гг. находятся в пределах 4–7 %. Так, в Германии – 4 %; во Франции – 7; в Австрии, Бельгии, Чехии – 5; США – 6; Италии, Швейцарии и Японии – 7 %. Эти государства обладают высоким значением внутреннего валового продукта (ВВП) по паритету покупательной способности (ППС) на душу населения, превышающим 20 тыс. дол. США: США – 54,5 тыс. дол., Австрия и Германия – 46,5, Италия – 35,4, Франция – 40,7 тыс. дол. Оценка факторов, влияющих на энергоэффективность систем электроснабжения при валовом внутреннем продукте более и менее 20 тыс. дол., приведена в табл. 1, 2.

Таблица 1

**Оценка факторов, влияющих на энергоэффективность систем электроснабжения при ВВП более 20 тыс. дол.**

**Evaluation of factors influencing the energy efficiency of power supply systems of the countries with a GDP of more than 20 thousand US dollars**

Страна	ВВП, тыс. дол.	Потери электроэнергии при передаче и распределении, %	Потребление электроэнергии на душу населения, тыс. кВт·ч
Австрия	46,5	5	8,5
Бельгия	43,1	5	8,0
Германия	46,3	4	7,0
Нидерланды	48,3	4	6,8
Соединенные Штаты	54,5	6	13,0
Чехия	30,4	5	6,3
Япония	37,5	5	7,8
Италия	35,4	7	5,2
Франция	40,7	7	7,4
Российская Федерация	26,7	10	6,5

В то же время в странах с ВВП по ППС менее 20 тыс. дол. (Молдове, Беларуси, Румынии, Монголии) относительные потери в сетях превосходят 10 %. Фактические потери в электрических сетях Беларуси и Украины в 1,5–2,5 раза больше, чем в электрических сетях промышленно развитых стран.

Таблица 2

**Оценка факторов, влияющих на энергоэффективность систем электроснабжения при ВВП менее 20 тыс. дол.**

**Evaluation of factors influencing the energy efficiency of power supply systems of the countries with a GDP of less than 20 thousand US dollars**

Страна	ВВП, тыс. дол.	Потери электроэнергии при передаче и распределении, %	Потребление электроэнергии на душу населения, тыс. кВт·ч
Армения	8,2	12	1,90
Молдова	5,0	25	1,35
Монголия	11,9	15	1,90
Беларусь	18,3	11	3,60
Украина	8,7	11	3,60
Румыния	19,8	12	2,50

Из приведенных цифр следует, что имеет место связь значений потерь электроэнергии в электрических сетях различных стран с уровнем экономики этих государств. В странах с более развитой экономикой, как правило, выше техническая культура производства, передачи и распределения электроэнергии, используются современные системы управления режимами работы электрических сетей, контроля и учета электроэнергии, живут и работают платежеспособные и дисциплинированные потребители, действуют четкая нормативно-правовая база и система тарифного регулирования. Следует отметить, что простое сравнение относительных потерь электроэнергии в электрических сетях без анализа этих потерь в сопоставимых условиях по протяженности сетей, их структуре, их нагрузке, режимам работы и т. п. не всегда корректно. К сожалению, такой анализ в настоящее время никем не проводится, хотя был бы весьма полезным для изучения и применения передового опыта.

Высокий уровень потерь в электрических сетях связан с низким уровнем компенсации реактивной мощности, физическим и моральным износом сети, недостаточным использованием средств оптимизации режимов работы и регулирования напряжения и нерешенности проблем качества электрической энергии.

Низкий уровень качества электрической энергии приводит к значительному снижению энергетической эффективности электрических сетей за счет увеличения потерь активной и реактивной мощностей, технологического расхода электроэнергии на ее транспорт, к снижению срока службы электрооборудования, увеличению капитальных вложений в электрические сети, нарушению условий нормального функционирования энергетической системы [7–9].

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.

Непрерывный рост установленной мощности нелинейных, несимметричных и резкопеременных нагрузок не всегда сопровождался своевременным внедрением решений, направленных на коррекцию качества электроэнергии, даже в промышленно развитых странах Западной Европы. Так, в распределительных сетях напряжением 230/400 В в Швейцарии за десятилетний период содержание высших гармоник (ВГ) возросло на 0,7 %. Поэтому требования стандартов на качество электроэнергии в промышленных электрических сетях, по нашим данным, соблюдаются в 30–40 % случаев.

При превышении нормируемых уровней возможно не только нарушение помехоустойчивости технических средств в энергосистеме, на электростанциях и подстанциях, но и технологических процессов в системах электроснабжения.

Сегодня более 60 % электрической энергии в промышленности используется в преобразованном виде (в металлургии на некоторых производствах до 100 %). Экспертные оценки, выполненные нами, позволяют оценить влияние электромагнитных помех следующим образом. Применительно к СНГ в его нынешних географических пределах ущерб, связанный

с влиянием помех, достигает 10–12 % от всего ущерба. Коррекция этих помех требует разработки широкого класса специальных электромагнитных устройств. Электромагнитные помехи обуславливают нагрев токоведущих частей электрооборудования, вызывают сбои и нарушения в работе цепей управления, ухудшают работу устройств автоматики и связи. Это приводит также к ухудшению состояния изоляции электрооборудования и в ряде случаев – к преждевременному выходу его из строя, ухудшению экономических показателей и в целом энергетической эффективности электрических сетей. Этому способствует в значительной мере внедрение частотных преобразователей в системах электропривода. Как следствие, не только существенно возрастает уровень канонических ВГ, но и появляется широкий спектр так называемых интергармоник (ИГ) – межгармоник. В последние годы заметно увеличился выход из строя электродвигателей вследствие повреждения изоляции (до 20–25 %), из-за значительного повышения уровня несинусоидальности. Так, эквивалентное действующее значение ИГ непосредственных преобразователей частоты может в зависимости от режима работы в несколько раз превосходить их номинальные значения (на основной частоте); преобразователь со звеном постоянного тока генерирует ВГ и ИГ в меньшей степени.

Практика свидетельствует о том, что в этом случае стоимость мероприятий по компенсации уровней ВГ может быть соизмеримой или больше стоимости ущерба от воздействия ВГ и ИГ. Высокие уровни ВГ и ИГ усложняют решение ряда вопросов концепции Smart Grid.

### Оценка индекса надежности энергосистем

Как известно, одним из важнейших показателей энергетической эффективности является индекс надежности электроснабжения.

В энергообъединениях СНГ значение индекса надежности находится в диапазоне 0,996. Зарубежные нормативы надежности, отвечающие современному состоянию энергетики, достаточно высоки: в США – 0,9997, во Франции – 0,9997, в Нидерландах – 0,9995, в Ирландии – 0,9991, в Скандинавских странах – 0,999. Переход на более высокий уровень надежности потребует затрат  $K_{\text{жел}}$  в размере

$$K_{\text{жел}} = K \left( \frac{\lg p}{\lg p_{\text{жел}}} \right)^{\alpha}, \quad (1)$$

где  $K_{\text{жел}}$  – капиталовложения для достижения желаемого уровня индекса надежности  $p_{\text{жел}}$ ;  $K$  – капитальные затраты, при которых обеспечивается индекс надежности  $p$ ;  $\alpha > 1$  – показатель степени.

При  $p = 0,996$  и  $p_{\text{жел}} = 0,9998$   $K_{\text{жел}} = K(1,9)^{\alpha}$ , т. е. требуется увеличение затрат не менее чем в 1,9 раза.

Оценочные расчеты показали, что для обеспечения более высокого уровня надежности необходимы затраты в размере 0,1–0,2 тыс. дол./год на 1 МВт нагрузки.

Рассмотрим возможность аналитического определения оптимального значения резервной мощности на электростанциях, обеспечивающей тре-

буемый уровень надежности работы энергосистемы. При увеличении резервной мощности повышаются затраты на сооружение электростанций и снижаются расходы (ущерб) от вероятного недоотпуска электроэнергии потребителям, т. е. приведенные затраты можно представить в виде [10]

$$З = EK + a(p_a + p_{т.о} + p_k)K + Y = K(E + a(p_a + p_{т.о} + p_k)) + Y, \quad (2)$$

где  $E$  – коэффициент эффективности капитальных вложений  $K$ ;  $a$  – то же, учитывающий долю расхода топлива на работу резервной мощности, может быть принят равным 1,0–3,0;  $p_a, p_{т.о}, p_k$  – доля отчислений от капитальных затрат на амортизацию, текущий ремонт и обслуживание, капитальный ремонт;  $Y$  – ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителям.

Так как с ростом резервной мощности  $P_{рез}$  значение  $K$  возрастает, а  $Y$  снижается, то можно записать:

$$K = k_{уд} P_{рез}; \quad (3)$$

$$Y = z + \frac{v}{P_{рез}}, \quad (4)$$

где  $k_{уд}$  – удельная стоимость 1 кВт установленной резервной мощности на электростанциях, в настоящее время  $k_{уд} \approx 3000$  дол./кВт на атомных электростанциях;  $z$  – составляющая, учитывающая долю ущерба от недоотпуска электроэнергии потребителям, не зависящая от значения  $P_{рез}$ , руб.;  $v$  – составляющая ущерба, зависящая от изменения  $P_{рез}$ , руб.·кВт.

Подставив значения (3) и (4) в (2), получим

$$З = k_{уд} P_{рез} (E + a(p_a + p_{т.о} + p_k)) + z + \frac{v}{P_{рез}}. \quad (5)$$

Из (5) найдем оптимальное значение  $P_{рез}$ . Для этого возьмем первую производную  $dЗ/dP_{рез}$  и приравняем ее к нулю

$$\frac{dЗ}{dP_{рез}} = k_{уд} (E + a(p_a + p_{т.о} + p_k)) - \frac{v}{P_{рез}^2} = 0.$$

Откуда

$$P_{рез} = \sqrt{\frac{v}{k_{уд} (E + a(p_a + p_{т.о} + p_k))}}. \quad (6)$$

Рассмотрим пути определения значения  $v$ . Разделим левые и правые части выражения (4) на  $Y$  и получим

$$1 = \frac{z}{Y} + \frac{v}{P_{рез} Y} = x_1 + a_1 x_2, \quad (7)$$

где  $x_1 = \frac{z}{Y}$ ;  $a_1 = \frac{v}{P_{рез} Y}$ ;  $x_2 = \frac{1}{Y}$ ;  $a_1 = \frac{1 - x_1}{x_2}$ .

Если  $x_1 = 1,0$ , то  $a_1 = 0$ ,  $a_1 x_2 = 0$  и  $z = Y = P_{рез} T q_{деф} Y_a$ , где  $T$  – расчетный период или период наблюдения, принимается равным числу часов в году, т. е. 8760 ч;  $q_{деф}$  – вероятность дефицита мощности значением  $P_{рез}$ ;  $Y_a$  – удельный системный ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителям при отсутствии аварийного резерва мощности, в настоящее время лежит в пределах 3–50 дол./кВт·ч.

Если  $x_1 = 0$ , то  $a_1 = \frac{1}{x_2}$  и  $\frac{v}{P_{рез}} = Y$ .

Тогда

$$v = P_{рез} Y. \quad (8)$$

Если  $0 < x_1 < 1$ , то  $a_1 > 0$  и  $\frac{v}{P_{рез}} = (1 - x_1) Y$  или  $v = (1 - x_1) Y P_{рез}$ .

Подставим значения  $v$  в формулу (6) и получим

$$P_{рез} = \sqrt{\frac{(1 - x_1) P_{рез}^2 T q_{деф} Y_a}{k_{уд} (E + a(p_a + p_{т.о} + p_k))}}.$$

Отсюда вероятность дефицита мощности

$$q_{деф} = \frac{k_{уд} (E + a(p_a + p_{т.о} + p_k))}{(1 - x_1) T Y_a}.$$

Для обеспечения  $q_{деф} = 0,001$  или  $P_{жел} = 0,999$  необходимо при  $E + a(p_a + p_{т.о} + p_k) = 0,4$ ;  $x_1 = 0,1$ ;  $Y_a = 50$  дол./кВт·ч;  $T = 8760$  ч иметь значение  $k_{уд}$  не больше 1000 дол./кВт.

Применение 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.

## ВЫВОД

Для повышения энергетической эффективности требуется:

- обеспечение нормированных уровней показателя качества электроэнергии в узлах электрических сетей;
- уменьшение уровней технологических потерь электрической энергии, в частности корректное решение проблем реактивной мощности в первую очередь путем обеспечения экономически обоснованных значений коэффициента мощности и внедрения регулируемых компенсирующих устройств;
- решение вопросов определения оптимального уровня надежности электрических сетей и систем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жежеленко, И. В. Электромагнитная совместимость в электрических сетях / И. В. Жежеленко, М. А. Короткевич. Минск: Вышэйш. шк., 2012. 197 с.
2. Электромагнитная совместимость потребителей / И. В. Жежеленко [и др.]. М.: Машиностроение, 2012. 351 с.
3. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.
4. Герасименко, А. А. Передача и распределение электроэнергии / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. Ростов на/Д.: Феникс; Красноярск: Издательские проекты, 2006. 720 с.
5. Савина, Н. В. Системный анализ электроэнергии в электрических распределительных сетях / Н. В. Савина. М.: Наука, 2008. 187 с.
6. Справочник по проектированию электроснабжения / под ред. Ю. Г. Барыбина [и др.]. М.: Энергоатомиздат, 1990. 576 с.
7. Жежеленко, И. В. Методы вероятностного моделирования и расчета характеристик электрических нагрузок потребителей / И. В. Жежеленко, В. П. Степанов, Е. А. Коротков. Самара: СамГТУ, 2001. 196 с.
8. Короткевич, М. А. Совершенствование эксплуатации электрических сетей / М. А. Короткевич. Минск: ЗАО «Техноперспектива», 2003. 372 с.
9. Пospelov, Г. Е. Передача энергии и электропередачи / Г. Е. Пospelov, В. Т. Федин. Минск: Адукацыя і выхаванне, 2003. 544 с.
10. Короткевич, М. А. Оценка значения индекса надежности энергосистем / М. А. Короткевич // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Минск: БНТУ, 2015. Вып. 66. С. 54–59.

Поступила 18.08.2017 Подписана в печать 20.10.2017 Опубликовано онлайн 29.01.2018

## REFERENCES

1. Zhezhelenko I. V., Korotkevich M. A. (2012) *Electromagnetic Compatibility in Electrical Networks*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 197 (in Russian).
2. Zhezhelenko I. V., Shidlovskii A. K., Pivnyak G. G., Saenko Yu. L., Noiberger N. A. (2012) *Electromagnetic Compatibility of Consumers*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 351 (in Russian)
3. Zhezhelenko I. V. (2000) *Higher Harmonics in Power Supply Systems of Industrial Enterprises*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 331 (in Russian).
4. Gerasimtnko A. A., Fedin V. T. (2006) *Transmission and Distribution of Electricity*. Rostov-on-Don: Fenix Publ.; Krasnoyarsk: Izdatel'skie Proekty Publ. 720 (in Russian).
5. Savina N. V. (2008) *Systematic Analysis of the Electric Power in Electric Distribution Networks*. Moscow, Nauka Publ. 187 (in Russian).
6. Barybin Y. G. (ed.), Babakhanyan I. S., Beider A. A., Geller A. V., Dushatskii B. Ya., Egorov S. I., Zhokhov B. D., Ivanov V. S., Korogodskii V. I., Krimker F. E., Kuindzhi V. B., Liberzon E. M., Menchik V. V., Miller G. R., Ryabov M. P. (1990) *Reference-Book in Design of Power Supply*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 576 (in Russian).
7. Zhezhelenko I. V., Stepanov V. P., Korotkov E. A. (2001) *Methods of Probabilistic Modeling and Calculation of Characteristics of Consumers' Electric Loads*. Samara, Samara State Technical University. 196 (in Russian).
8. Korotkevich M. A. (2003) *Improvement of Operation of Electric Networks*. Minsk, Tekhnoperspektiva Publ. 372 (in Russian).
9. Pospelov G. E., Fedin V. T. (2003) *Power Transfer of Electricity Transmission*. Minsk, Adukatsyya i Vykhanne Publ. 544 (in Russian).
10. Korotkevich M. A. (2015) Evaluation of Power Systems Index Reliability Values. *Methodical Problems of Research of Reliability of Large Power Systems*. Minsk, Belarusian National Technical University, (66), 54–59 (in Russian).

Received: 18 August 2017

Accepted: 20 October 2017

Published online: 29 January 2018