

УДК 338.46:621.31

## ЭКОНОМИЧЕСКИЙ УЩЕРБ У УЧАСТНИКОВ РЫНКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОТ НАЛИЧИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

© 2014 г. М. А. Булатенко

*Национальный исследовательский университет  
«Московский энергетический институт»*

*Среди мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности особенно отмечаются действия по повышению качества и надежности энергоснабжения. Наличие высших гармоник напряжения и тока в электрической сети пагубно влияет на эффективное использование электрической энергии и, соответственно, финансовых ресурсов всех участников рынка электроэнергии. Для решения данной проблемы ключевым является понимание факта, что экономический ущерб от высших гармоник возникает не только у энергопотребителей, но и у сетевых и сбытовых компаний, составляющие которого отображены в данной статье.*

*Ключевые слова: показатели качества электроэнергии; высшие гармоники; экономический ущерб; несинусоидальный режим; рынок электроэнергии.*

*An action to improve the quality and reliability of power supply are marking among the measures for energy conservation and energy efficiency. The presence of higher harmonics of voltage and current in an electric power system adversely affect the efficient use of electrical energy and, accordingly, the financial resources of all participants in the electricity market. The key factor for solving this problem is understanding that higher harmonics cause the economic damage to energy consumers, Electric Grid Companies and power sales companies. In this article author described components of this economic damage.*

*Key words: quality of the electrical power; harmonics of voltage and current; economic damage; non-sinusoidal mode; the electricity market.*

Пониженное качество электроэнергии (э/э) является не только технологической проблемой современной системы энергоснабжения, но и причиной существенных экономических потерь для всех участников рынка электроэнергии. По оценкам специалистов [7; 16] экономический ущерб, возникающий от низкого качества э/э, в некоторых странах составляет от 10 до 25 млрд долларов в год.

Единовременное действие множества необязательных к выполнению стандартов по качеству э/э (электромагнитной совместимости), введенные Росстандартом в период с 2001 по 2012 г. без отслеживания их совме-

стимости и повторений; отсутствие единого Технического регламента, устанавливающего минимально необходимые требования к объектам электроэнергетики в части обеспечения безопасного, надежного и качественного энергоснабжения — привело к свертыванию работ по контролю качества электроэнергии.

В настоящее время обязательной сертификации подлежит э/э, отпускаемая энерго-сбытовыми компаниями только физическим лицам для личных нужд, что закреплено Гражданским Кодексом РФ (ст. 542, ст. 543), а также Законом РФ «О правах потребителей». Взаимоотношения юридических

лиц — субъектов рынка электроэнергии регулируются исключительно договорами энергоснабжения (купли-продажи электроэнергии), в которых предусматриваются периодические измерения показателей качества электрической энергии (ПКЭ) в ограниченных контрольных точках за ограниченное время, что не позволяет судить о соответствии качества э/э в системах энергоснабжения.

Таким образом, на данном этапе развития законодательной базы в области управления качеством э/э необходимо донести до всех участников рынка э/э экономические последствия несоответствия ПКЭ нормативным показателям.

По оценкам специалистов [6] наибольшей составляющей экономического ущерба при превышении ПКЭ нормально допустимых и предельно допустимых значений стандарта ГОСТ 32144-2013 [5] в системах электроснабжения промышленных предприятий является ущерб от несимметрии и несинусоидальности напряжения. К ПКЭ, относящимся к несинусоидальному режиму работы сети относятся [5]:

1. Значения коэффициента  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения,  $K_{U_n}$ , в процентах от напряжения основной гармонической составляющей  $U_1$  в точке передачи э/э:

$$K_{U_n} = \frac{U_n}{U_1} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $U_n$  — действующее значение напряжения  $n$ -й гармоники, кВ;  $U_1$  — действующее значение напряжения 1-й гармоники, кВ (принимается равной номинальному напряжению,  $U_{ном}$ ).

2. Суммарное значение коэффициентов гармонических составляющих напряжения,  $K_U$ , %, в точке передачи э/э:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2}}{U_1}. \quad (2)$$

Основными причинами наличия высших гармоник напряжения и тока (ВГ) являются подсоединенное к распределительной сети оборудование потребителей э/э: промышленное оборудование (сварочные аппараты, электродуговые и индукционные печи и другое); преобразователи (частоты, напряжения

и тока); источники электропитания и газоразрядные осветительные устройства; а также офисное оборудование и бытовые электроприборы.

Все участники рынка страдают от влияния ВГ на систему энергоснабжения в части ухудшение коэффициента мощности из-за повышения значений реактивной мощности. Неблагоприятные последствия, а также расчет технического и экономического ущерба ( $TU_{ВГ РМ}$  тыс. кВт·ч;  $\mathcal{E}U_{ВГ РМ}$  тыс. руб. соответственно), подробно описаны в [2].

В исследованиях [14] указано, что причиной 80–90% всех отключений в крупных городах является выход из строя кабельных линий (КЛ) электропередачи. Их безотказная работа в течение заложенного производителем срока службы, в первую очередь, зависит от надежности изоляции, которая ухудшается при протекании высших гармоник тока. Также из-за несинусоидальности тока и напряжения часть э/э в КЛ переходит в нагрев наружной поверхности жил кабеля вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости. На основании исследований [9; 15] можно сделать вывод, что через два года применения силовых кабелей при  $K_U = 5\%$  их срок службы сокращается в 2 раза. Таким образом, наличие ВГ приводит к возрастанию суммарных амортизационных отчислений (АО) по кабельному хозяйству и на ремонтные работы в целом.

В соответствии с измерениями [15] установлено, что при  $K_U = 6,85\%$  потери электроэнергии в изоляции кабелей увеличатся на 40%. А в соответствии с Приказом Министерства энергетики РФ №326 [10] потери э/э в изоляции кабелей,  $\Delta W_{Икл}$ , тыс. кВт·ч, относятся к условно-постоянным потерям э/э и принимаются в соответствии с данными заводов-изготовителей оборудования (или по усредненным значениям) и не учитывают влияние нелинейной нагрузки энергопотребителей на их величину.

Таким образом, получаем технический ущерб,  $TU_{ВГ Икл}$ , тыс. кВт·ч, и экономический ущерб,  $\mathcal{E}U_{ВГ Икл}$ , тыс. руб., для организации — собственника КЛ от дополнительных потерь э/э в изоляции КЛ вследствие наличия высших гармоник напряжения и тока в сети:

$$TU_{ВГ Икл} = 0,4 \cdot L \cdot \Delta W_{Икл, уд}; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{E}U_{ВГ\text{Икл}} &= TУ_{ВГ\text{Икл}} \cdot C_{\text{эз}} = \\ &= 0,4 \cdot L \cdot \Delta W_{\text{Икл\_уд}} \cdot C_{\text{эз}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $L$  — длина КЛ, км;  $\Delta W_{\text{Икл\_уд}}$  — удельные потери э/э в изоляции силовых кабелей, тыс. кВт·ч/км в год;  $C_{\text{эз}}$  — тариф на электроэнергию, тыс. руб./тыс. кВт·ч.

Проведем оценку для ОАО «МРСК Центра». Протяженность кабельных линий 0,4/110 кВ Общества по состоянию на декабрь 2013 года составляет  $L \sim 13\,205$  км [4]. Для общей оценки допустим, что все кабели имеют сечение 240 мм<sup>2</sup> и работают под номинальным напряжением 10 кВ. Из табл. 10 Приказа Министерства энергетики РФ №326 [10] следует:  $\Delta W_{\text{Икл\_уд}} = 1,67$  тыс. кВт·ч/км в год. Средневзвешенная нерегулируемая цена на электрическую энергию на оптовом рынке для ОАО «МРСК Центра» в декабре 2013 года составляла  $C_{\text{эз}} \sim 1,1$  тыс. руб./тыс. кВт·ч [13].

Таким образом, получаем:

$$\begin{aligned} TУ_{ВГ\text{Икл}} &= 0,4 \cdot 13205 \cdot 1,67 \approx \\ &\approx 8800 \text{ тыс. кВт·ч в год}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{E}U_{ВГ\text{Икл}} &\approx 8800 \cdot 1,1 = \\ &= 9680 \text{ тыс. руб. в год}. \end{aligned} \quad (6)$$

Суммарный экономический ущерб, в связи с наличием высших гармоник тока и напряжения в КЛ несут:

— и сами энергопотребители (владеющие собственной сетью энергоснабжения с КЛ), так как данные потери увеличивают общие расходы на электроэнергию и суммарные амортизационные отчисления;

— и электросетевые компании, т. к. данные потери являются сверхнормативными, не учитываются в тарифе за э/э и компенсируются за счет прибыли компании.

Вследствие наличия ВГ в сети дополнительные потери э/э возникают и в диэлектрике конденсаторов. Согласно [8] можно провести упрощенные расчеты до 13-й гармоники включительно: технического ущерба,  $TУ_{ВГ\text{дк}}$  тыс. кВт·ч, и экономического ущерба,  $\mathcal{E}U_{ВГ\text{дк}}$  тыс. руб., для собственника конденсаторных батарей:

$$TУ_{ВГ\text{дк}} = T_{\text{конд}} \cdot \Delta P_{\text{ном\_диэл}} \cdot \sum_{n=2}^{13} K_{U(n)}^2 \cdot n; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{E}U_{ВГ\text{дк}} &= TУ_{ВГ\text{дк}} \cdot C_{\text{эз}} = \\ &= T_{\text{конд}} \cdot \Delta P_{\text{ном\_диэл}} \cdot \sum_{n=2}^{13} K_{U(n)}^2 \cdot n \cdot C_{\text{эз}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где:  $T_{\text{конд}}$  — время работы конденсатора в год, ч;  $\Delta P_{\text{ном\_диэл}}$  — дополнительные активные потери мощности в диэлектрике конденсаторов при наличии ВГ, рассчитанные [13] в номинальном режиме, кВт.

Так как повышенное значение  $K_U$  приводит к более интенсивному старению изоляции, то с течением времени  $TУ_{ВГ\text{дк}}$  будет возрастать. По данным [15] работа конденсаторных батарей с  $K_U = 5\%$  в течение двух лет приведет к увеличению потерь электроэнергии в диэлектрике конденсаторов в 2 раза, и формулы (7) и (8) примут следующий вид:

$$TУ_{ВГ\text{дк}} = 2 \cdot T_{\text{конд}} \cdot \Delta P_{\text{ном\_диэл}} \cdot \sum_{n=2}^{13} K_{U(n)}^2 \cdot n; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{E}U_{ВГ\text{дк}} &= TУ_{ВГ\text{дк}} \cdot C_{\text{эз}} = \\ &= 2 \cdot T_{\text{конд}} \cdot \Delta P_{\text{ном\_диэл}} \cdot \sum_{n=2}^{13} K_{U(n)}^2 \cdot n \cdot C_{\text{эз}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Работа электрических машин (асинхронных и синхронных двигателей (АД и СД), а также трансформаторов) в сети с ВГ ухудшает их характеристики и вызывает дополнительный перегрев, тем самым увеличивая потери электроэнергии и снижая надежность работы технологического цикла в целом. Суммарные дополнительные электрические потери в электрических машинах можно оценить по формулам [17].

Согласно [8] дополнительные потери в АД из-за высших гармоник тока и напряжения составляют порядка 10% суммарных потерь в номинальном режиме. Согласно [3] для трансформатора марки ТМ 25-10/0,4 дополнительные потери превышают собственные в 2 раза при  $K_U = 5\%$  и почти в 6 раз при  $K_U = 8\%$ . Для трансформаторов большей мощности эти потери уменьшаются.

Таким образом, получаем технический ущерб,  $TУ_{ВГ\text{эм}}$  тыс. кВт·ч, и экономический ущерб,  $\mathcal{E}U_{ВГ\text{эм}}$  тыс. руб., для организации — собственника электрических машин от дополнительных потерь э/э в АД, СД и трансформаторах вследствие наличия ВГ в сети:

$$TУ_{ВГ\text{эм}} = \Delta W_{ВГ\text{ад}} + \Delta W_{ВГ\text{сд}} + \Delta W_{ВГ\text{тп}} =$$

$$= \Delta P_{ВГад} \cdot T_{ад} + \Delta P_{ВГсд} \cdot T_{сд} + \Delta P_{ВГмп} \cdot T_{мп}; \quad (11)$$

$$\mathcal{E}U_{ВГэм} = TУ_{ВГэм} \cdot C_{ээ}. \quad (12)$$

В электросетевых компаниях присутствуют только  $\Delta W_{ВГмп}$ , учитываются при расчете технологических потерь э/э, входят в тариф на э/э для потребителей (согласно [10]). Поэтому, рассчитанный выше экономический ущерб,  $\mathcal{E}U_{ВГэм}$ , оплачивается только энергопотребителями в общих расходах за электроэнергию, в связи с повышенными значениями потребляемой электроэнергии и повышением тарифа на электроэнергию.

При работе электрических машин в условиях несинусоидального напряжения и тока, в связи с перегревом обмоток, накопления усталости в металлах, воздействием ВГ на изоляцию, снижается их срок службы. В работе [11] уменьшение срока службы электрооборудования при  $K_U = 10\%$  было оценено на уровне: 32,5% — для однофазных машин; 18% — для трехфазных машин; 5% — для трансформаторов.

Наличие высших гармоник в линиях электропередачи (ЛЭП) также приводит к потерям мощности [3]:

$$\Delta P_{ВГлэн} = 1,41 \cdot r_{лэн} \cdot \sum_{n=2}^{\infty} \sqrt{n} \cdot I_n^2, \quad (13)$$

где  $r_{лэн}$  — линейное сопротивление фазы ЛЭП на частоте 50 Гц.

Таким образом, технический ущерб,  $TУ_{ВГлэн}$ , тыс. кВт·ч, и экономический ущерб,  $\mathcal{E}U_{ВГлэн}$ , тыс. руб., для организации — собственника ЛЭП от дополнительных потерь электроэнергии в ЛЭП из-за высших гармоник напряжения и тока в сети составит:

$$TУ_{ВГлэн} = \Delta W_{ВГлэн} = \Delta P_{ВГлэн} \cdot T_{лэн}; \quad (14)$$

$$\mathcal{E}U_{ВГлэн} = TУ_{ВГлэн} \cdot C_{ээ} = \Delta P_{ВГлэн} \cdot T_{лэн} \cdot C_{ээ}. \quad (15)$$

В электросетевых компаниях  $\Delta W_{ВГлэн}$  учитываются при расчете технологических потерь электроэнергии и входят в тариф на электроэнергию для потребителей [10].

Поэтому, рассчитанный выше экономический ущерб,  $\mathcal{E}U_{ВГлэн}$ , оплачивается только энергопотребителями в общих расходах за электроэнергию, в связи с повышенными значениями потребляемой электроэнергии и повышением тарифа на электроэнергию.

Потери  $\Delta W_{ВГлэн}$  при высоких значениях

$K_U$  могут достигать значительного уровня. В качестве примера рассмотрим результаты расчета основных и добавочных потерь активной мощности от высших гармонических составляющих тока, выполненного для линии ОКК-120 за сутки [1]. Линия ОКК-120 (Окино — Ключи — Кяхта) «Бурятэнерго» длиной 63,7 км, выполненная проводом АС-120/19 на опорах типа П110-5 со стальным тросом марки С50, характеризуется высоким коэффициентом несинусоидальности напряжения. За сутки  $K_U$  иногда достигает 45%. Основные и добавочные потери в данном случае составили 378,2 и 49,7 кВт·ч, соответственно. Следовательно, за год:

$$\begin{aligned} TУ_{ВГлэн} &\approx 49,7 \cdot 365 = \\ &= 18,14 \text{ тыс. кВт·ч в год}; \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{E}U_{ВГлэн} &\approx 18,14 \cdot 1,1 \approx \\ &\approx 20 \text{ тыс. руб. в год}. \end{aligned} \quad (17)$$

Анализ структуры потерь активной мощности в линиях 110 кВ ОАО «МРСК Юга» [1] показывает, что в некоторых сетях уровень  $\Delta W_{ВГлэн}$  может достигать 18% от общих потерь активной мощности в ЛЭП. Из чего следует, что  $\mathcal{E}U_{ВГлэн}$  в таких сетях является существенным.

В данной работе несимметричные режимы работы не рассматриваются, но в условиях несинусоидального тока и напряжения в трехфазной сети стоит отметить, что наличие ВГ, кратных трем (т. е. 3, 9, 15, 21 и т. д.) может вызывать токи в нулевых рабочих проводниках, превосходящие по своему значению ток в наиболее нагруженной фазе. Согласно ПУЭ при определении длительно допустимых токов по условиям нагрева проводов и кабелей в расчет не принимаются нулевые рабочие проводники, следовательно, в цепях нулевых проводников не устанавливается защита от токовых перегрузок (автоматические выключатели, предохранители). Таким образом, под действием высших гармоник возможен перегрев и разрушение нулевых проводов кабельных линий вследствие их перегрузки токами нулевой последовательности [17].

Таким образом, возникает дополнительный экономический ущерб,  $C_{дон АО ээ}$ , тыс. руб., для всех организаций, вследствие снижения срока службы электрооборудования и необходимости его замены ранее установленного производителем срока, а также

проведения дополнительных ремонтов (воздушных и кабельных линий электропередачи, АД и СД, трансформаторов, нулевых проводников) из-за ВГ. Или же  $C_{доп. АО эо}$  может быть оценен затратами на восстановление срока службы оборудования, т. е. завышение их исходных параметров (номинальной мощности, сечения проводников и т. д.).

ВГ создают кратковременные пики тока, которые вызывают дополнительный нагрев внутренних элементов защитных устройств, вследствие чего происходит необоснованное срабатывание предохранителей (автоматических выключателей) и отключение электроустановки. Срабатывание может происходить при нагрузке, составляющей 80–85% уставки теплового расцепителя автоматического выключателя [17]. Это приводит к остановке производства с затратами на его возобновление. Например, было подсчитано [11], что стоимость простоя вычислительного центра страховой компании, вызванного ложным срабатыванием автоматического выключателя, составляет 100000 евро. Остановки производства фабрики, производящей мебель, были оценены в 10000 евро.

В этом случае, экономический ущерб,  $\mathcal{E}U_{ВГ он}$ , тыс. руб., от влияния ВГ на срабатывание автоматических выключателей можно оценить по формуле:

$$\mathcal{E}U_{ВГ он} = \mathcal{E}U_{ВГ ин} + \mathcal{E}U_{ВГ вн} + \mathcal{E}U_{ВГ доп} + \mathcal{E}U_{ВГ бр} + \mathcal{E}U_{ВГ ом} \quad (18)$$

где:  $\mathcal{E}U_{ВГ ин}$  — экономический ущерб от остановки и простоя оборудования, выраженный в виде недовыпуска продукции и, как следствия, недополученной прибыли (для энергетических компаний — упущенная прибыль от недопоставки э/э, возможные штрафы со стороны энергопотребителей по договору энергоснабжения), тыс. руб.;  $\mathcal{E}U_{ВГ вн}$  — экономический ущерб от возобновления остановленного технологического процесса: дополнительные расходы сырья, энергоресурсов, заработной платы, тыс. руб.;  $\mathcal{E}U_{ВГ доп}$  — экономический ущерб, обусловленный продолжением работы оборудования, напрямую не задействованного в технологическом процессе (системы обогрева и кондиционирования, освещение, вентиляция и т. д.), во время остановки производства, тыс. руб.;  $\mathcal{E}U_{ВГ бр}$

и  $\mathcal{E}U_{ВГ ом}$  — экономические ущербы от полученного брака и дополнительных отходов в связи с особенностями технологических процессов, тыс. руб. (характерны только для промышленных предприятий).

Кроме того, энергосбытовые компании вправе взимать повышенные тарифы с потребителей, которые нагружают сеть высшими гармониками тока и напряжения, если это оговорено в договоре энергоснабжения. Отсюда появляется экономический ущерб  $\mathcal{E}U_{ВГ умр}$ , обусловленный дополнительными суммарными затратами потребителя за электроэнергию. Также штрафные санкции могут нести и сами энергосбытовые и электросетевые компании, в случае предъявления иска энергопотребителем в их сторону.

В таблице 1 представлены основные составляющие экономического ущерба по типам оборудования и участникам рынка электроэнергии от высших гармоник.

Итого, в целом суммарный экономический ущерб,  $\mathcal{E}U_{ВГ}$ , тыс. руб., от наличия ВГ тока и напряжения в сети равен:

$$\mathcal{E}U_{ВГ} = \mathcal{E}U_{ВГ сз} + \mathcal{E}U_{ВГ кл} + \mathcal{E}U_{ВГ к} + \mathcal{E}U_{ВГ эо} + \mathcal{E}U_{ВГ он} \quad (19)$$

Описанная выше оценка экономического ущерба от наличия высших гармоник напряжения и тока в системе энергоснабжения ясно дает понять, что экономические последствия в большей или меньшей степени возникают у всех участников рынка электроэнергии. Обеспечение стандартных ПКЭ во всей системе энергоснабжения возможна за счет компенсации ВГ у энергопотребителей, что выгодно как самим потребителям, так и электросетевым и сбытовым компаниям. Для взаимовыгодного сотрудничества всех заинтересованных сторон по реализации непрерывного повышения энергетической эффективности необходимо построение единой отраслевой системы энергетического менеджмента (СЭМ) на базе международного стандарта ISO 50001:2011 с учетом специфики электроэнергетического комплекса.

## Литература

1. Боровиков В. С. О необходимости включения добавочных потерь от высших

Таблица 1

## Экономический ущерб от ВГ для участников рынка электроэнергии

№	Тип оборудования	Виды издержек участников рынка электроэнергии (э/э)		
		Потребитель	Электросети	Сбытовая компания
1	Система энерго-снабжения (↓ коэф. мощности) ( $\mathcal{E}U_{ВГ\ cэ}$ )	↑ себестоимости продукции	↑расходов на оплату потерь э/э; ↑стоимость прокладки ВЛ и КЛ ( $C_{прокл}$ )	Упущенная прибыль из-за невозможности продажи доп. объема э/э ( $\mathcal{E}U_{ВГ\ нп}$ )
		↑общих расходов на собственное потребление эл/эн, на ремонт и обновление парка электрооборудования ( $C_{доп\ АО}$ ), ↑возможных штрафов за ухудшение качества эл/эн ( $\mathcal{E}U_{ВГ\ штр}$ ), дополнительные расходы на оборудование для компенсации реактивной мощности ( $C_{об}$ )		
$\mathcal{E}U_{ВГ\ cэ} = \mathcal{E}U_{ВГ\ грм} + C_{прокл} + C_{доп\ АО} + \mathcal{E}U_{ВГ\ штр} + C_{об} + \mathcal{E}U_{ВГ\ нп}$				
2	Кабельная линия ( $\mathcal{E}U_{ВГ\ кл}$ )	↑общих расходов на эл/эн	↑расходов на оплату сверхнормативных потерь эл/эн	—
		↑суммарных амортизац. отчислений (АО) из-за преждеврем. старения изоляции ( $C_{доп\ АО\ кл}$ )		
$\mathcal{E}U_{ВГ\ кл} = \mathcal{E}U_{ВГ\ Икл} + C_{доп\ АО\ кл}$				
3	Конденсатор ( $\mathcal{E}U_{ВГ\ к}$ )	↑общих расходов на эл/эн	↑расходов на оплату сверхнорматив. потерь эл/эн	—
		↑суммарных АО (из-за ↑ вероятности проявления резонансных явлений) ( $C_{доп\ АО\ конд}$ ), ↑ затрат на компенсацию реактивной мощности (невозможность использования конденсаторных установок) ( $C_{доп\ крм}$ )		
$\mathcal{E}U_{ВГ\ к} = \mathcal{E}U_{ВГ\ дк} + C_{доп\ АО\ конд} + C_{доп\ крм}$				

Окончание таблицы 1

№	Тип оборудования	Виды издержек участников рынка электроэнергии (э/э)		
		Потребитель	Электросети	Сбытовая компания
4	Энергетическое оборудование ( $\text{ЭУ}_{\text{ВГ эо}}$ ), включая трансформаторы, АД, СД, ЛЭП	↑общих расходы на эл/эн, ↑тарифа на электроэнергию (учитываются при расчете технологических потерь электроэнергии при ее передаче по эл. сетям)		—
		↑суммарных АО (из-за доп. нагрева в энергетическом оборудовании и нулевых рабочих проводниках) ( $C_{\text{доп АО эо}}$ )		
$\text{ЭУ}_{\text{ВГ эо}} = \text{ЭУ}_{\text{ВГ тр}} + \text{ЭУ}_{\text{ВГ ад}} + \text{ЭУ}_{\text{ВГ сд}} + \text{ЭУ}_{\text{ВГ лэп}} + C_{\text{доп АО эо}}$				
5	↑случаев ложного сраб. автоматич. выключателей — остановки производства ( $\text{ЭУ}_{\text{ВГ он}}$ )	недовыпуск продукции ( $\text{ЭУ}_{\text{ВГ нп}}$ ), ↑ брака и доп. отходов ( $\text{ЭУ}_{\text{ВГ бр}}$ и $\text{ЭУ}_{\text{ВГ ом}}$ ), расходы от работы оборудования вспомогат. процессов (обогрев, кондиционирование, освещение, вентиляция) во время остановки основного процесса ( $\text{ЭУ}_{\text{ВГ доп}}$ )	упущенная прибыль от недопоставки э/э ( $\text{ЭУ}_{\text{ВГ нп}}$ )	
		расходы на возобновление остановленного технологического процесса ( $\text{ЭУ}_{\text{ВГ ен}}$ )		
$\text{ЭУ}_{\text{ВГ он}} = \text{ЭУ}_{\text{ВГ нп}} + \text{ЭУ}_{\text{ВГ ен}} + \text{ЭУ}_{\text{ВГ доп}} + \text{ЭУ}_{\text{ВГ бр}} + \text{ЭУ}_{\text{ВГ ом}}$				

гармоник тока в технологические потери при передаче электрической энергии. / В. С. Боровиков, Н. Н. Харлов, Т. Б. Акимжанов. // Известия Томского политехнического университета. — 2013. — Т. 322, №4: Энергетика. — С. 91–93.

2. Булатенко М. А., Тульчинская Я. И. Методика оценки эффективности установки устройств компенсации реактивной мощности. // Журнал «МИКРОЭКОНОМИКА». — 2013. — №2. — С. 79–83.

3. Васильева Т. Н. Дополнительные потери мощности в силовых трансформаторах, обусловленные несинусоидальностью напряжений. / Т. Н. Васильева, Л. В. Аронов. // Технические науки в России и за рубежом (II): материалы междунар. науч. конф. (г. Москва, ноябрь 2012 г.). — М.: Буки-Веди, 2012. — С. 79–81.

4. Годовой отчет ОАО «МРСК Центра» за 2013 год. [Электронный ресурс] / МРСК Центр. — Режим доступа: <https://www.mrsk-1.ru/ru/information/annual-reports/>, свободный. — Загл. с экрана.

5. ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» (взамен ранее действующих ГОСТ Р 54149-2010 и ГОСТ 13109-97).

6. Гриб О. Г., Довгалюк О. Н., Омеляненко Г. В. Оценка величины экономического ущерба от снижения качества электрической энергии в системах электроснабжения промышленных предприятий [Электронный ресурс] / Сборник научных трудов SWorld. — Режим доступа: <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/technical-sciences-412/metals-and-energy-412/15651-412-1110>, свободный. — Загл. с экрана.

7. Добрусин Л. Приоритеты управления качеством электроэнергии в электрических сетях России: взгляд с позиции национальных интересов и стратегии международного электроэнергетического сотрудничества. // Силовая электроника. — 2007. — №2. — С. 82–86.

8. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. Показатели качества электроэнергии и их контр-

оль на промышленных предприятиях. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 2000. — 252 с.

9. Лукутин Б. В. Эффективность преобразования и транспортировки электроэнергии: уч. пособие. — Томск: Издательство ТПУ, 2000. — 100 с.

10. Приказ Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 г. №326 «Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям» (с изменениями и дополнениями).

11. Руководство по устройству электроустановок. [Электронный ресурс] / Технические решения Schneider Electric. — Режим доступа: <http://forca.ru/knigi/oborudovanie/rukovodstvo-po-ustroystvu-elektrostanovok.html>, свободный. — Загл. с экрана.

12. Составляющие предельных уровней нерегулируемых цен в декабре 2013 года. [Электронный ресурс] / ОАО «АТЭС». — Режим доступа: [http://www.atsenergo.ru/results/market/svnc/svnc\\_month/index.htm?period=122013&ftempl=3&step=1&published=20140104](http://www.atsenergo.ru/results/market/svnc/svnc_month/index.htm?period=122013&ftempl=3&step=1&published=20140104), свободный. — Загл. с экрана.

13. Справочник по расчету режимов работы электрических конденсаторов. / О. Л. Мезенин, М. Н. Гураевский, В. В. Конотоп, Б. Г. Набока. — К.: Техника, 1987. — 168 с.

14. Томашева Е. В. Старение изоляции силового кабеля 6–10 кВ от действия собственного магнитного поля: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.26.01. / Юж.-Ур. гос. ун-т. — Челябинск, 2009. — 130 с.

15. Управление качеством электроэнергии. / И. И. Каргашев, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов и др.; под ред. Ю. В. Шарова. — М.: Издательский дом МЭИ, 2006. — 320 с.

16. Чэпмэн Д. Цена низкого качества электроэнергии. / Пер. с англ. Е. В. Мельниковой. // Энергосбережение. — 2004. — №1. — С. 66–69.

17. Шидловский А. К., Жаркин А. Ф. Вышие гармоники в низковольтных электрических сетях. — К.: Наукова думка, 2005. — 210 с.

Поступила в редакцию

13 июня 2014 г.





**Мария Андреевна Булатенко** — аспирант кафедры Инженерного менеджмента Национального исследовательского университета «МЭИ».

**Maria Andreyevna Bulatenko** — postgraduate student at The Engineering Management department of The National Research University «MEI».

111250, Москва, Е-250, ул. Красноказарменная, д. 14  
14 Krasnokazarmennaya st., E-250, 111250, Moscow, Russia  
Тел.: +7 (916) 508-12-31; e-mail: mabulka@list.ru

---

---