

УДК 621.316.1

УЧЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ И СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ОТКЛОНЕНИЯХ НАПРЯЖЕНИЯ

Сафонов Д.Г., Долингер С.Ю.

ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», Омск, Россия (644050, Омск, просп. Мира, д.11), e-mail: safonovdg@mail.ru

Статья посвящена вопросам влияния отклонения напряжения на работу электрооборудования. В статье рассматривается зависимость потерь мощности от уровня напряжения в силовых трансформаторах, линиях электропередач, электрических двигателях и источниках света, приводятся результаты расчетов дополнительных потерь мощности при положительном и отрицательном отклонениях напряжения в зависимости от величины загрузки электрооборудования. Для силовых трансформаторов и линий электропередач, работающих с высокой нагрузкой, целесообразно поддерживать положительное отклонение напряжения, что приведет к снижению потерь мощности в данном электрооборудовании. В асинхронных двигателях потери мощности при положительном отклонении напряжения снижаются при нагрузке более 70 %, в синхронных двигателях ситуация противоположная. Работа источников света целесообразна при отрицательном отклонении напряжения.

Ключевые слова: положительное и отрицательное отклонение напряжения, потери мощности, реактивная мощность, коэффициент загрузки.

ADDITIONAL POWER LOSSES IN ELECTRICAL CONSUMERS AND POWER SUPPLY SYSTEMS FROM VOLTAGE DEVIATION

Safonov D.G., Dolinger S.Y.

Omsk State Technical University (644050, Omsk, prospect Mira, 11), e-mail: safonovdg@mail.ru

The article is devoted to questions the impact voltage deviation on work electrical equipment. In this article considered dependence of power losses from voltage levels in transformers and transmission power networks, electric motors and light sources. Presented results calculation the additional power losses from voltage deviates depending on the load of electrical equipment. For a power transformer and power lines operating at high load, it is expedient to maintain a positive bias voltage, thereby reducing power loss in the electrical system. In the motors power loss at a positive voltage deviation is reduced when loading more than 70 %, in synchronous motors opposite situation. Work light sources suitable for a negative voltage deviation.

Keywords: positive and negative voltage deviation, power losses, reactive power, load factor.

Одной из главных задач, которая ставится перед поставщиком электроэнергии, является обеспечение ее качества, поскольку качество электроэнергии (КЭ) оказывает существенное влияние на работу электрооборудования (ЭО) электрических сетей и промышленных предприятий.

Увеличение потерь электроэнергии в ЭО вследствие отклонения напряжения от номинального является одной из форм электромагнитного ущерба.

Отклонение напряжения

Показателями, характеризующими медленные изменения напряжения электропитания (продолжительностью более 1 минуты), являются отрицательное $\delta U_{(-)}$ и положительное $\delta U_{(+)}$ отклонения напряжения электропитания в точке передачи электроэнергии от номинального (согласованного) значения, %:

$$\delta U_{(-)} = \frac{U_0 - U_{m(-)}}{U_0} 100, \%, \delta U_{(+)} = \frac{U_{m(+)} - U_0}{U_0} 100, \%,$$

где U_0 – напряжение, равное стандартному номинальному напряжению U_{nom} или согласованному напряжению U_c ;

$U_{m(-)}$, $U_{m(+)}$ – значения напряжения электропитания, меньшие и большие соответственно, усредненные в интервале времени 10 минут [3].

В электрических сетях низкого напряжения стандартное номинальное напряжение электропитания U_{nom} равно 220 В (между фазным и нейтральным проводниками для однофазных и четырехпроводных трехфазных систем) и 380 В (между фазными проводниками для трех- и четырехпроводных трехфазных систем).

В электрических сетях среднего и высокого напряжений вместо значения номинального напряжения электропитания принимают согласованное напряжение электропитания U_c .

Для указанных выше показателей КЭ установлены следующие нормы: положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10 % номинального или согласованного значения напряжения в течение 100 % времени интервала в одну неделю [3].

Влияние отклонения напряжения на работу электрической сети и электрооборудования

1. Силовые трансформаторы (СТ) и линии электропередачи (ЛЭП).

Нагрузочные потери мощности и электроэнергии в элементах электрической сети пропорциональны квадрату тока и обратно пропорциональны квадрату напряжения, а потери холостого хода пропорциональны квадрату напряжения. С учетом этого получим выражения для определения дополнительных потерь мощности при положительном $\Delta P_{(+)}$ и отрицательном $\Delta P_{(-)}$ отклонениях напряжения соответственно [2]:

$$\Delta P_{(+)} = \Delta P_{H.ном} \left(\frac{100}{100 + \delta U_{(+)}} \right)^2 + \Delta P_{X.ном} \left(\frac{100 + \delta U_{(+)}}{100} \right)^2,$$

$$\Delta P_{(-)} = \Delta P_{H.ном} \left(\frac{100}{100 - \delta U_{(-)}} \right)^2 + \Delta P_{X.ном} \left(\frac{100 - \delta U_{(-)}}{100} \right)^2,$$

где $\Delta P_{H.ном}$, $\Delta P_{X.ном}$ – потери мощности нагрузочные и холостого хода, рассчитанные при номинальном напряжении, кВт;

$\delta U_{(+)}$, $\delta U_{(-)}$ – положительное и отрицательное отклонение напряжения, %.

Увеличение (снижение) потерь мощности по сравнению с номинальным значением определяют по выражению [2]:

$$\delta P_{(+)} = \frac{\delta U_{(+)}}{50} (\Delta P_{X.ном} - \Delta P_{H.ном}), \quad \delta P_{(-)} = \frac{\delta U_{(-)}}{50} (\Delta P_{H.ном} - \Delta P_{X.ном}),$$

где $\delta P_{(+)}$, $\delta P_{(-)}$ – изменение потерь мощности при положительном и отрицательном отклонениях напряжения, кВт.

При условии, что в сети $\Delta P_{X.ном} > \Delta P_{H.ном}$ (при $K_3 < 0,4$) целесообразно снижать напряжение, так как при $\delta U_{(-)} > 0$, суммарные потери будут меньше ($\delta P_{(-)} < 0$) [5].

Результаты расчета дополнительных потерь активной мощности в трансформаторе ТМ-1000 при изменении питающего напряжения при различных значениях коэффициента загрузки ($K_3 = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$) показаны на рисунке 1. Кривые иллюстрируют дополнительные потери в СТ при отсутствии регулирования напряжения отпайками.

Для СТ, у которых $\Delta P_{H.ном} > \Delta P_{X.ном}$ (при $K_3 > 0,5$), суммарные потери в них при увеличении напряжения сети ($\delta U_{(+)} > 0$) будут уменьшаться ($\delta P_{(+)} < 0$). Для СТ с коэффициентом загрузки в пределах $0,4 < K_3 < 0,5$ потери нагрузочные и холостого хода практически одинаковы $\Delta P_{H.ном} \approx \Delta P_{X.ном}$, следовательно, отклонение напряжения не приводит к существенному изменению суммарных потерь в СТ.

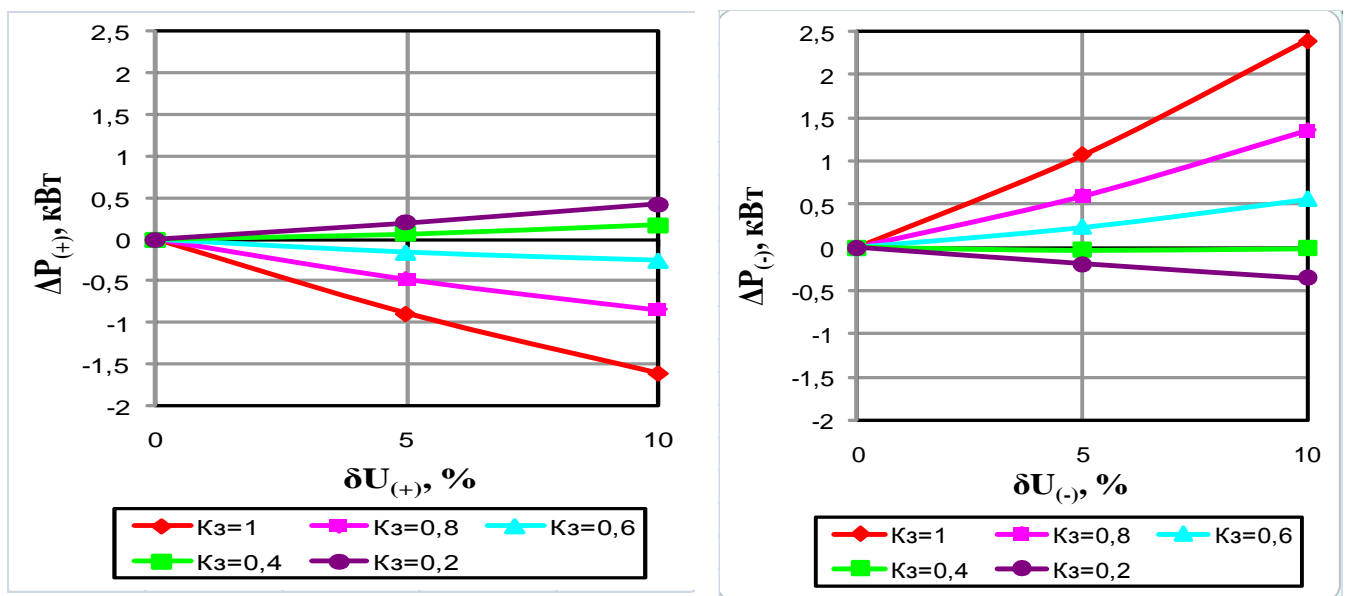


Рис. 1. Дополнительные потери мощности в трансформаторе

ТМ-1000 кВ·А при положительных и отрицательных отклонениях напряжения

Для ЛЭП $\Delta P_{X.ном} \approx 0$, следовательно, для снижения потерь в ЛЭП необходимо повышать напряжение ($\delta U_{(+)} > 0$), так как нагрузочные потери при этом будут уменьшаться ($\delta P_{(+)} < 0$).

На рисунке 2 представлены результаты расчета дополнительных потерь мощности при положительном и отрицательном отклонениях напряжения в ЛЭП марки АСБ-10-3х120 длиной 1 км при различных значениях тока, протекающего по трехфазной ЛЭП (при токах в фазе равных 50, 40, 30, 20 А).

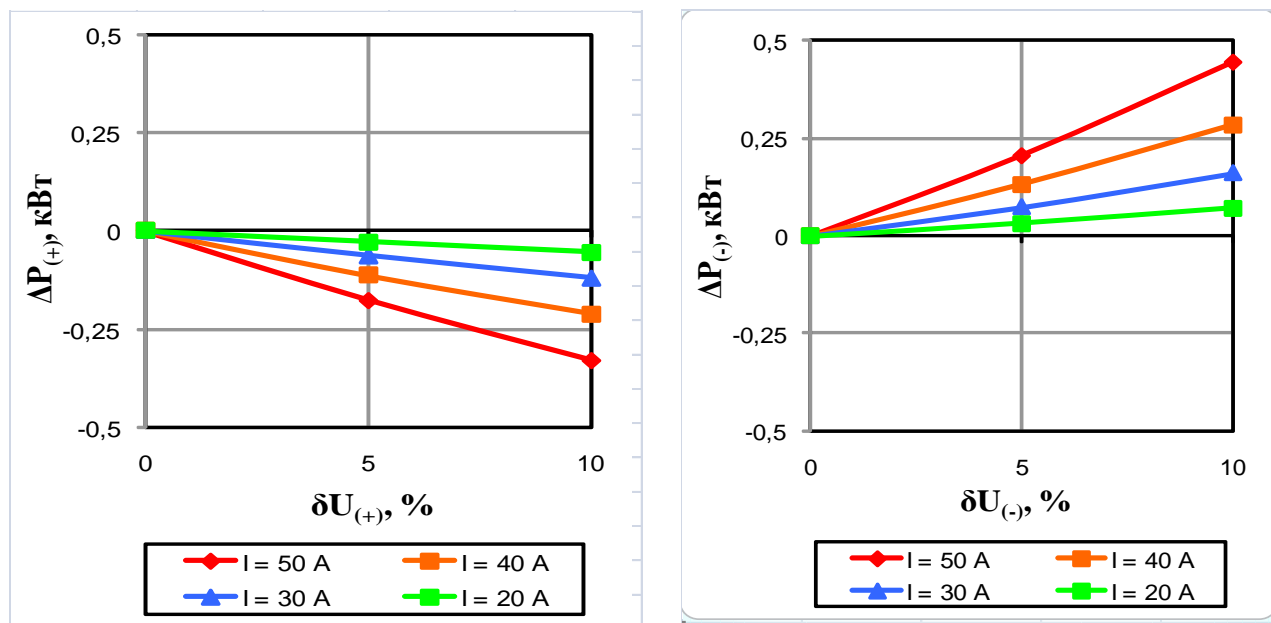


Рис. 2. Дополнительные потери мощности в ЛЭП АСБ-10-3х120 при положительном и отрицательном отклонениях напряжения

2. Асинхронные двигатели (АД).

При наличии положительного или отрицательного отклонения напряжения на зажимах АД изменяются следующие параметры: частота вращения ротора, активные потери и потребление реактивной мощности. Таким образом, экономические показатели, характеризующие работу АД, изменяются, что приводит к изменению приведенных затрат при его эксплуатации по сравнению с режимом номинального напряжения [4].

В двигателях, работающих с постоянным моментом сопротивления, при номинальной нагрузке потери активной мощности увеличиваются при отрицательном отклонении напряжения в сети, так как ток, потребляемый из сети, увеличивается. При положительном отклонении напряжения происходит уменьшение потерь активной мощности [6]. При малых нагрузках двигателей ($K_3 < 0,5$) эта зависимость приобретает зеркальный характер (рисунок 3).

Следует отметить, что изменения активных потерь мощности в АД при отрицательном или положительном отклонениях напряжения в пределах 10 % от

U_{nom} невелики (менее 3 % от ΔP_{nom}), но они составляют такую же величину, что и потери в сетях. При увеличении положительного или отрицательного отклонения напряжения до 15 % от U_{nom} потери активной мощности существенно возрастают [5].

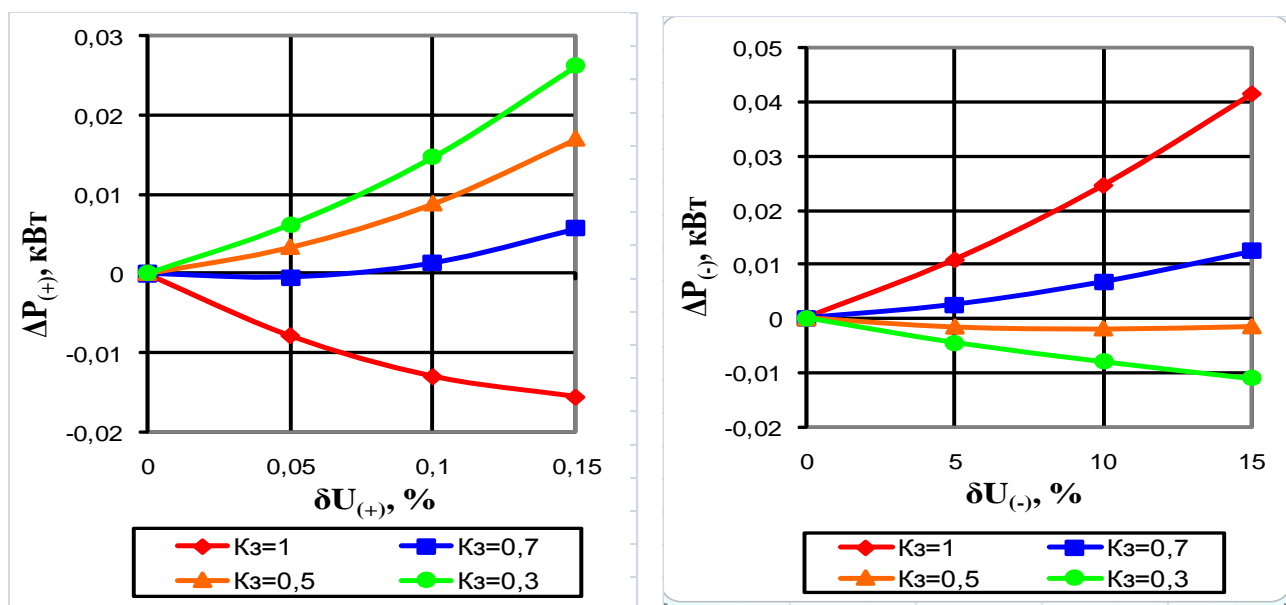


Рис. 3. Дополнительные потери мощности в АД мощностью 9–15 кВт при положительном и отрицательном отклонениях напряжения

3. Синхронные двигатели (СД).

Максимальный электромагнитный момент СД в широко распространенных схемах с вентильными и электромашинными возбудителями при неизменном токе возбуждения изменяется пропорционально напряжению; это вызывает соответствующее изменение запаса статической устойчивости двигателя. При наличии отклонения напряжения в сети изменяется располагаемая реактивная мощность (РМ), определяемая тепловой нагрузкой СД: при положительном отклонении напряжения снижается вследствие увеличения насыщения магнитопровода машины и потерь в стали; при отрицательном отклонении напряжения до 20 % от U_{nom} — увеличивается для СД с высокими значениями отношения короткого замыкания (свыше 1,25) и небольшой нагрузкой на валу. Для СД с отношением короткого замыкания равным 1,25 отрицательное отклонение напряжения вызывает уменьшение располагаемой РМ [5].

Потери активной мощности в СД увеличиваются при положительном отклонении напряжения в сети и ростом загрузки СД по РМ.

4. Источники света.

Мощность, потребляемая источниками света, изменяется в зависимости от величины отклонения напряжения в сети. При положительном и отрицательном отклонениях

напряжения до 10 % от номинального напряжения $U_{\text{ном}}$ для ламп накаливания (ЛН) справедливо соотношение [1]:

$$\left(\frac{P}{P_0}\right) = \left(\frac{U}{U_0}\right)^{1,6},$$

где U_0, U – соответственно номинальное и фактическое напряжения на ЛН;

P_0, P – соответственно номинальная и фактическая мощность, потребляемая ЛН.

При положительном и отрицательном отклонениях напряжения до 10 % от $U_{\text{ном}}$ изменение мощности, потребляемой ртутными лампами низкого давления типа ЛЛ и высокого давления типа ДРЛ, натриевыми лампами высокого давления типа ДНаТ, ксеноновыми лампами типа ДКсТ, рассчитывается из соотношения [1]:

$$\left(\frac{\Delta P}{P}\right) \cong 2 \left(\frac{\delta U_{(+)}}{U_0}\right), \quad \left(\frac{\Delta P}{P}\right) \cong -2 \left(\frac{\delta U_{(-)}}{U_0}\right) \text{ – для ЛЛ и ДРЛ,}$$

$$\left(\frac{\Delta P}{P}\right) \cong 2,2 \left(\frac{\delta U_{(+)}}{U_0}\right), \quad \left(\frac{\Delta P}{P}\right) \cong -2,2 \left(\frac{\delta U_{(-)}}{U_0}\right) \text{ – для ДРИ,}$$

$$\left(\frac{\Delta P}{P}\right) \approx 2,75 \left(\frac{\delta U_{(+)}}{U_0}\right), \quad \left(\frac{\Delta P}{P}\right) \approx -2,75 \left(\frac{\delta U_{(-)}}{U_0}\right) \text{ – для ДНаТ,}$$

$$\left(\frac{\Delta P}{P}\right) = 3,5 \left(\frac{\delta U_{(+)}}{U_0}\right), \quad \left(\frac{\Delta P}{P}\right) = -3,5 \left(\frac{\delta U_{(-)}}{U_0}\right) \text{ – для ДКсТ.}$$

где $\delta U_{(+)}, \delta U_{(-)}, U$ – соответственно положительное и отрицательное отклонения напряжения и номинальное напряжение сети;

$\Delta P, P$ – изменение мощности и номинальная мощность, потребляемая лампой.

На основании выражений, приведенных выше, получены зависимости удельного перерасхода активной мощности от положительного и отрицательного отклонений напряжения для источников света, представленные на рисунке 4.

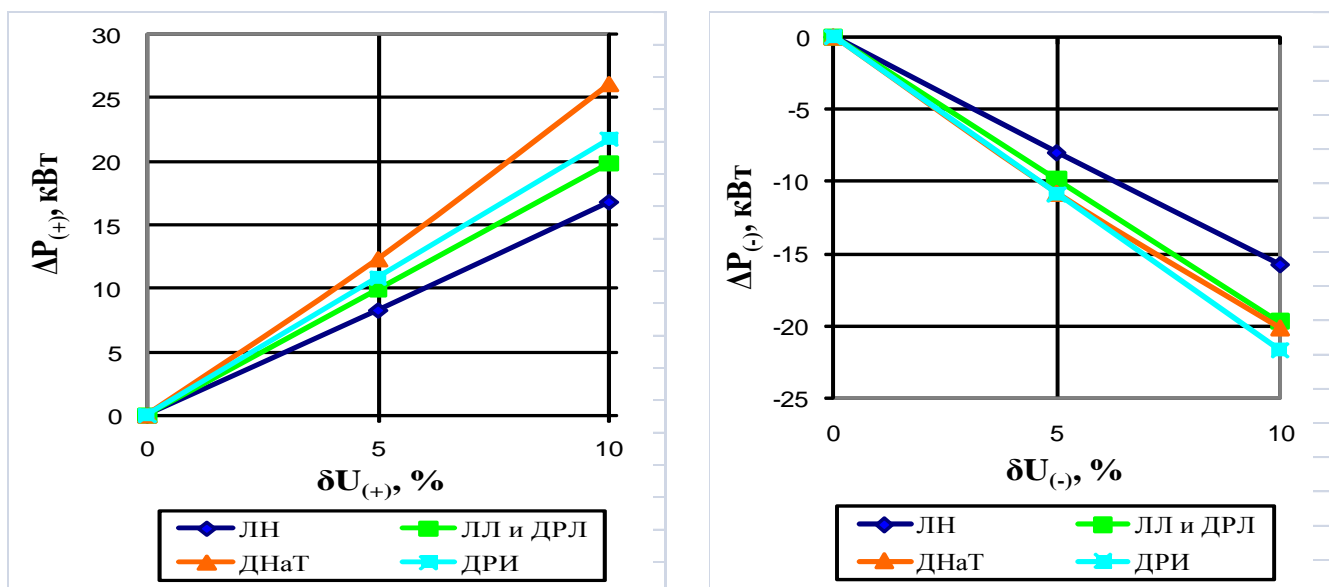


Рис. 4. Удельные дополнительные потери мощности в источниках света при положительном и отрицательном отклонениях напряжения

Вывод

Удельный перерасход активной мощности в процентах к потерям в номинальном режиме показывает, насколько сильно отклонение напряжения влияет на потери мощности в электрооборудовании. На основании зависимостей, представленных на рисунках 1–4, можно сделать следующие выводы:

- потери мощности в электрической сети увеличиваются при отрицательном отклонении напряжения при загрузке трансформаторов выше 50 %; при недогрузке трансформаторов (до 30 %) – потери мощности в сети уменьшаются;
- потери мощности в ИС увеличиваются при положительном отклонении напряжения;
- потери мощности в АД увеличиваются: при отрицательном отклонении напряжения при загрузке двигателей выше 50 %; при положительном отклонении напряжения при загрузке двигателей ниже 70 %.

Поскольку преобладающей нагрузкой является АД, то для снижения потерь мощности в ЭП и электрических сетях необходимо поддерживать положительное отклонение напряжения в пределах 10 % от $U_{ном}$ при условии работы двигателей с загрузкой более 70 %.

Список литературы

1. Айзенберг Ю.Б. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю.Б. Айзенберга. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Знак, 2006. – 972 с.: ил.
2. Войнов С.Л., Гамм А.З. и др. Нормирование показателей качества электрической энергии и их оптимизация / под ред. А. Богущкого. – Иркутск, 1988. – 249 с.
3. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
4. Долингер С.Ю. Оценка дополнительных потерь мощности от снижения качества электрической энергии в элементах систем электроснабжения / С.Ю. Долингер и др. // Омский научный вестник. – 2013. – № 2 (120). – С. 178–183.
5. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с., 74 ил.
6. Сафонов Д.Г., Тураханов К.Х. Влияние качества электроэнергии на работу электрооборудования // Омское время – взгляд в будущее: материалы регион. молод. науч.-

техн. конф. (Омск, 14–15 апр. 2010 г.). – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. – Кн. 2. – С. 141-144.

Рецензенты:

Харламов В.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ФГБОУ ВПО «Омский государственный университет путей сообщения», г. Омск;

Кузнецов А.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» ФГБОУ ВПО «Омский государственный университет путей сообщения», г. Омск.