

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Г.И. ЯНУКОВИЧ

**КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ  
И СПОСОБЫ ЕГО ПОВЫШЕНИЯ**

*Пособие для слушателей  
Института повышения квалификации и переподготовки кадров  
АПК БГАТУ по дисциплине  
«Электроснабжение сельского хозяйства»*

**Минск 2008**

УДК 621.311.1.016.4(07)

ББК 31.2я7

Я65

Рекомендовано научно-методическим советом агроэнергетического факультета БГАТУ

Протокол № 8 от 14 апреля 2008 г.

Автор – *Г.И. Янукович*

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. *В.И. Русан*;  
канд. техн. наук, проф. *А. П. Сердешнов*

**Янукович, Г. И.**

Я65 Качество электрической энергии и способы его повышения : пособие / Г. И. Янукович. – Минск : БГАТУ, 2008. – 70 с.

ISBN 978-985-519-039-5

В пособии изложены основные положения государственного стандарта на качество электрической энергии по ГОСТ 13109–97, приведены показатели качества электрической энергии и требования, предъявляемые к ним. Даны способы расчета и методика определения показателей качества электроэнергии, приведены данные о влиянии качества электрической энергии на работу потребителей, отражены основные способы повышения качества электроэнергии.

Предназначено для слушателей Института повышения квалификации и переподготовки кадров АПК БГАТУ, студентов электротехнических специальностей вузов и учащихся колледжей сельскохозяйственного профиля.

УДК 621.311.1.016.4(07)

ББК 31.2я7

ISBN 978-985-519-039-5

© БГАТУ, 2008

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в хозяйствах республики имеется большое количество животноводческих предприятий, производящих продукцию на промышленной основе. Происходит всесторонняя автоматизация и комплексная механизация производственных процессов. Растет энерговооруженность сельскохозяйственного производства, а вместе с ней и энергопотребление.

С ростом производственной электрической нагрузки быстрыми темпами растет также коммунально-бытовая нагрузка.

Одновременно с быстрым ростом потребления электрической энергии повышаются требования к надежности электроснабжения потребителей, и все более остро ставится вопрос повышения ее качества, так как от качества электрической энергии зависит и качество производимой продукции.

Качество электрической энергии характеризуется рядом показателей, при которых потребители могут нормально работать.

В Республике Беларусь, как и в ряде других стран СНГ, качество электроэнергии нормировано ГОСТ 13109-97 [1].

В данном пособии приведены показатели и нормы качества электрической энергии в электрических сетях систем электроснабжения общего назначения переменного трехфазного и однофазного тока частотой 50 Гц. Приведены способы расчета и методы определения этих показателей

Представлена информация ряда авторов о влиянии качества электрической энергии на работу ее потребителей. В краткой форме изложены способы повышения качества электрической энергии.

## 1 ЗАДАЧИ ЭНЕРГЕТИКИ ПО ПОВЫШЕНИЮ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Положение в Республике Беларусь по обеспечению топливно-энергетическими ресурсами в последнее время стало критическим. Цены на энергоносители систематически повышаются.

Вместе с тем в хозяйствах республики строятся животноводческие комплексы, улучшаются бытовые условия населения. Это вызывает необходимость установки в сельскохозяйственном секторе республики большого количества электроприемников, что приводит к значительному росту электрических нагрузок.

Вместе с быстрым ростом потребления электрической энергии все острее ставится задача обеспечения потребителей электрической энергией высокого качества. Качество электрической энергии оказывает существенное влияние не только на эффективность работы электроприемников, но и на технико-экономические показатели электрических сетей. В современных электрических сетях обеспечение качества электроэнергии, приемлемых для потребителей, требует значительных затрат денежных средств и материалов, а так же сбора и обработки большого количества информации. Этим и объясняется большое значение вопросов качества электроэнергии в комплексной проблеме проектирования и эксплуатации электрических систем. Свидетельством этому являются конференции и совещания по качеству напряжения и его регулированию, проведенные в различные годы и в различных городах бывшего Советского Союза. Специально по качеству напряжения в 1961 и 1973 годах были проведены конференции в Москве, а в 1968 году – в Риге. Большое внимание вопросу качества электроэнергии было уделено на Всесоюзных научно-технических совещаниях, проведенных в Уфе (1971 г.) и Тирасполе (1972 г.).

Начиная с 50-х годов прошлого столетия в нашей республике и за рубежом стали интенсивно проводиться исследования по проблеме обеспечения качества электроэнергии. Важную роль в решении этой проблемы сыграл утвержденный в 1967 году ГОСТ 13109-67 «Нормы качества электрической энергии у ее приемников, присоединенных к электрическим сетям общего назначения». Данный стандарт просуществовал 10 лет. В 1987 году был принят новый ГОСТ 13109-87 «Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения». Этот стандарт установил требования к качеству электрической

энергии в электрических сетях общего назначения переменного трехфазного и однофазного тока частотой 50 Гц в точках, к которым присоединяются приемники или потребители электрической энергии. Стандарт установил около десяти показателей. Требования ко многим из них стандартом были не установлены.

В 1997 году Российским Техническим комитетом по стандартизации в области электромагнитной совместимости технических средств (ТК 30 ЭМС) разработан новый стандарт – ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

Стандарт принят Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 12-97 от 21 ноября 1997 г.).

За принятие проголосовали:

Республика Армения;  
Республика Беларусь;  
Республика Казахстан;  
Киргизская республика;  
Республика Молдова;  
Российская Федерация;  
Республика Таджикистан;  
Туркменистан;  
Республика Узбекистан.

Стандарт соответствует требованиям международных стандартов МЭК 868, МЭК 1000 – 3 – 2, МЭК 1000 – 3 – 3, МЭК 1000 – 4 – 1 и публикациям МЭК 1000 – 2 – 1, МЭК 1000 – 2 – 2 (в части уровней электромагнитной совместимости в системах электроснабжения и методов измерения электромагнитных помех).

Введен в действие постановлением Госстандарта Республики Беларусь от 11 февраля 1999 г. № 1 непосредственно в качестве государственного стандарта Республики Беларусь (взамен ГОСТ 13109-87).

## 2 ПОНЯТИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Электрическая энергия является специфическим товаром. Она используется во всех сферах жизнедеятельности человека, участвует в производстве других видов продукции, обладает рядом специфических свойств, которые влияют на качество этой продукции. Понятие качества электрической энергии (КЭ) отличается от понятия качества других видов продукции. Каждый электроприемник предназначен для работы при определенных параметрах электрической энергии: номинальных частоте, напряжении, токе и т. п. Следовательно, для нормальной работы электроприемников должно быть обеспечено соответствующее качество электроэнергии. Таким образом, качество электрической энергии характеризуется совокупностью показателей, при которых электроприемники могут нормально работать.

Электростанция, производящая электроэнергию, не гарантирует ее качество электроприемникам в точках их присоединения к электрической сети. Качество электроэнергии до и после включения электроприемников в электрическую сеть может быть различно. Кроме того, качество электроэнергии характеризуют также термином “электромагнитная совместимость”. Электромагнитная совместимость – это способность электроприемника нормально функционировать в его электромагнитной среде (в электрической сети, к которой он присоединен), не создавая недопустимых электромагнитных помех для других электроприемников, функционирующих в той же среде.

В связи с появлением мощных вентильных преобразователей, дуговых сталеплавильных печей, сварочных установок возникла проблема электромагнитной совместимости промышленных потребителей электроэнергии с питающей сетью. Эти электроприемники при всей своей экономичности и технологической эффективности оказывают отрицательное влияние на качество электрической энергии.

Бытовые потребители (как и промышленные) также должны иметь электромагнитную совместимость с другими электроприемниками, включенными в общую электросеть, не снижать эффективность их работы и не ухудшать показатели качества электроэнергии.

Качество электроэнергии оценивается по технико-экономическим показателям. Те показатели, которые учитывают ущерб вследствие порчи материалов и оборудования, расстройства технологического процесса, ухудшения качества выпускаемой продук-

ции, снижения производительности труда, определяют технологический ущерб. Ущерб от некачественной электроэнергии, который характеризуется увеличением потерь электроэнергии, выходом из строя электротехнического оборудования, нарушением работы автоматики, телемеханики, связи, электронной техники, представляет собой электромагнитный ущерб.

Качество электроэнергии непосредственно связано с надежностью электроснабжения потребителей, так как нормальным режимом электроснабжения является такой режим, при котором потребители получают электроэнергию бесперебойно и в количестве, заранее согласованном с энергоснабжающей организацией, нормированного качества (в соответствии с требованиями ГОСТ 13109-97) и договором на электроснабжение.

### **3 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОГО СТАНДАРТА НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

ГОСТ 13109-97 “Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения” устанавливает показатели и нормы качества электроэнергии в электрических сетях систем электроснабжения общего назначения переменного трехфазного и однофазного тока частотой 50 Гц в точках, к которым присоединяются электрические сети, находящиеся в собственности различных потребителей электрической энергии, или приемники электрической энергии (точки общего присоединения). ГОСТ 13109–97 является межгосударственным стандартом и действует в Республике Беларусь с 1 августа 1999года.

Нормы качества электроэнергии, установленные стандартом, являются уровнями электромагнитной совместимости для кондуктивных электромагнитных помех в системах электроснабжения общего назначения. При соблюдении установленных норм качества электроэнергии обеспечивается электромагнитная совместимость электрических сетей энергообеспечивающих организаций и электрических сетей потребителей электрической энергии.

Стандартом не устанавливаются требования к качеству электроэнергии в электрических сетях специального назначения (контактных, тяговых, связи), передвижных установок (самолетов, поездов, судов) и др.

Кондуктивная электромагнитная помеха в системе электроснабжения – это электромагнитная помеха, распространяющаяся по элементам электрической сети.

Точка общего присоединения – это точка электрической сети общего назначения, электрически ближайшая к сетям рассматриваемого потребителя электрической энергии, к которой присоединены или могут быть присоединены электрические сети других потребителей.

Стандартом не устанавливаются нормы качества электроэнергии для режимов, вызванных исключительными погодными условиями, стихийными бедствиями и др.

В данном стандарте впервые сказано, что установленные нормы подлежат включению в технические условия на присоединение потребителей и в договоры на энергоснабжение.

Потребителям, являющимся виновниками ухудшения качества электроэнергии, для обеспечения выполнения норм стандарта в точках общего присоединения допускается устанавливать в техни-

ческих условиях на присоединение и в договорах на энергоснабжение более жесткие нормы (с меньшими диапазонами изменения соответствующих показателей КЭ), чем установлены в стандарте.

Нормы стандарта должны применяться при проектировании и эксплуатации электрических сетей, при установлении уровней помехоустойчивости электроприемников и уровней электромагнитных помех, вносимых этими приемниками в электрическую сеть, к которой они присоединены.

#### 4 НОМЕНКЛАТУРА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Стандартом устанавливаются следующие показатели качества электроэнергии [1]:

- установившееся отклонение напряжения  $\delta U_y$ ;
- размах изменения напряжения  $\delta U_i$ ;
- доза фликера  $P_f$ ;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U$ ;
- коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)}$ ;
- коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2U}$ ;
- коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности  $K_{0U}$ ;
- отклонение частоты  $\Delta f$ ;
- длительность провала напряжения  $\Delta t_n$ ;
- импульсное напряжение  $U_{\text{имп}}$ ;
- коэффициент временного перенапряжения  $K_{\text{пер}U}$ .

При определении значений некоторых показателей качества электроэнергии стандартом вводятся следующие вспомогательные параметры электрической энергии:

- интервал между изменениями напряжения  $\Delta t_{i,i+1}$ ;
- глубина провала напряжения  $\delta U_n$ ;
- частота появления провалов напряжения  $F_n$ ;
- длительность импульса по уровню 0,5 его амплитуды  $\Delta t_{\text{имп}0,5}$ ;
- длительность временного перенапряжения  $\Delta t_{\text{пер}U}$ .

Показатели качества электроэнергии: установившееся отклонение напряжения, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения, коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности, коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности, отклонение частоты, размах изменения напряжения – характеризуют установившиеся режимы работы элек-

трооборудования энергоснабжающей организации и потребителей электрической энергии, дают количественную оценку качества электроэнергии, особенностям технологического процесса ее производства, передачи, распределения и потребления.

Показатели качества электроэнергии: длительность провала напряжения, импульсное напряжение, коэффициент временного перенапряжения – характеризуют кратковременные помехи, возникающие в электрической сети в результате коммутационных процессов, грозовых атмосферных явлений, работы средств защиты и автоматики. Для этих показателей качества электроэнергии стандарт не устанавливает допустимых численных значений. Для их количественной оценки должны измеряться амплитуда, длительность, частота появления и другие характеристики, установленные, но не нормируемые стандартом. Статистическая обработка этих данных позволяет рассчитать обобщенные показатели, характеризующие конкретную электрическую сеть с точки зрения вероятности появления кратковременных помех [2].

Оценка соответствия показателей качества электроэнергии указанным нормам стандарта (за исключением длительности провала напряжения, импульсного напряжения и коэффициента временного перенапряжения) производится за минимальный расчетный период, равный 24 ч.

Так как изменение электрических нагрузок носит случайный характер, поддержание норм качества электроэнергии в течение всего этого времени достаточно сложно, поэтому в стандарте устанавливается вероятность превышения их. Измеренные показатели качества электроэнергии не должны выходить за нормально допустимые значения с вероятностью 0,95 за установленный стандартный расчетный период времени (это означает, что можно не считаться с отдельными превышениями нормируемых значений, если ожидаемая общая их продолжительность составит менее 5% за установленный период времени).

Следовательно, качество электроэнергии по измеренному показателю соответствует требованиям стандарта, если суммарная продолжительность времени выхода за нормально допустимые значения составляет не более 5% от установленного периода времени, т.е. 1 ч 12 мин, а за предельно допустимые значения – 0 % от этого периода времени [1].

Рекомендуемая общая продолжительность измерений показателей качества электроэнергии выбирается с учетом обязательного включения рабочих и выходных дней и составляет 7 суток [1].

ГОСТ 13109-97 указывает вероятных виновников ухудшения качества электроэнергии. Отклонение частоты регулируется питающей энергосистемой и зависит только от нее. Отдельные электроприемники (производственные, коммунально-бытовые) не могут оказать влияния на этот показатель, так как мощность их несоизмеримо мала по сравнению с суммарной мощностью генераторов электростанций энергосистемы. Колебания напряжения, несимметрия и несинусоидальность напряжения вызываются, в основном, работой отдельных мощных потребителей. Величина этих показателей качества электроэнергии зависит от мощности питающей энергосистемы в рассматриваемой точке подключения потребителя. Отклонения напряжения зависят как от уровня напряжения, которое подается энергосистемой на предприятия, так и от работы отдельных электроприемников, особенно с большим потреблением реактивной мощности. Соответственно, вопросы качества электроэнергии следует рассматривать в непосредственной связи с вопросами компенсации реактивной мощности. Длительность провала напряжения, импульсное напряжение, коэффициент временного перенапряжения, как отмечалось ранее, обуславливаются режимами работы энергосистемы.

В таблице 4.1 приведены свойства электрической энергии, показатели, характеризующие их, наиболее вероятные виновники ухудшения качества электроэнергии (по ГОСТ 13109-97) [1].

В стандарте приводятся способы расчета и методики определения показателей КЭ, требования к погрешностям измерений и интервалам усреднения этих показателей.

Таблица 4.1 – Свойства электрической энергии, показатели и наиболее вероятные виновники ухудшения КЭ

Свойства электрической энергии	Показатель КЭ	Наиболее вероятные виновники ухудшения КЭ
Отклонение напряжения	Установившееся отклонение напряжения $\delta U_v$	Энергоснажающая организация
Колебания напряжения	Размах изменения напряжения $\delta U_t$ Доза фликера $P_t$	Потребитель с переменной нагрузкой
Несинусоидальность напряжения	Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения $K_U$ Коэффициент $n$ -ой гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$	Потребитель с нелинейной нагрузкой
Несимметрия трехфазной системы напряжений	Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности $K_{2U}$ Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности $K_{0U}$	Потребитель с несимметричной нагрузкой
Отклонение частоты	Отклонение частоты $\Delta f$	Энергоснажающая организация
Провал напряжения	Длительность провала напряжения $\Delta t_n$	Энергоснажающая организация
Импульс напряжения	Импульсное напряжение $U_{имп}$	Энергоснажающая организация
Временное перенапряжение	Коэффициент временного перенапряжения $K_{перU}$	Энергоснажающая организация

## 5 ХАРАКТЕРИСТИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НИМ

### 5.1 Отклонение напряжения

В электрических сетях характер электрических нагрузок и их количественные значения практически никогда не бывают постоянными. Их вызывают изменения режимов работы промышленных предприятий в течение суток. В сельском хозяйстве (кроме суточных изменений нагрузки) происходят также сезонные изменения. На электростанциях и подстанциях осуществляется регулирование напряжения, изменяются схемы электроснабжения и параметры электрических сетей, устанавливаются компенсирующие устройства. Все это вызывает отклонение напряжения от номинальных значений у потребителей.

Отклонение напряжения от номинальных значений происходит из-за суточных, сезонных и технологических изменений электрической нагрузки потребителей; изменения мощности компенсирующих устройств; регулирования напряжения генераторами электростанций и на подстанциях энергосистем; изменения схемы и параметров электрических сетей.

Отклонение напряжения определяется разностью между действующим  $U$  и номинальным  $U_{\text{ном}}$  значениями напряжения, В:

$$\delta U = U - U_{\text{ном}}, \quad (5.1)$$

или, %

$$\delta U = \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100. \quad (5.2)$$

Отклонение напряжения характеризуется показателем установившегося отклонения напряжения  $\delta U_y$ .

Установившееся отклонение напряжения — это величина, равная разности между усредненным значением напряжения в данной точке системы электроснабжения в рассматриваемый интервал времени и его номинальным значением.

Установившееся отклонение напряжения  $\delta U_y$ , равно, % :

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100, \quad (5.3)$$

где  $U_y$  — установившееся (усредненное) значение напряжения за интервал усреднения. Усредненное значение напряжения  $U_y$  в вольтах, киловольтах вычисляются за интервал времени 1 мин по формуле:

$$U_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N U_i^2}{N}}, \quad (5.4)$$

где  $U_i$  — значение напряжения в  $i$ -ом наблюдении;

$N$  — число наблюдений за 1 мин, которое должно быть не менее 18.

Период наблюдений должен длиться 24 часа.

Стандартом установлены нормально допустимые и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения. На выводах электроприемников электроэнергии они равны соответственно  $\pm 5$  и  $\pm 10$  % от номинального напряжения сети.

Качество электрической энергии по установившемуся отклонению напряжения в точке общего присоединения к электрической сети считают соответствующим требованиям настоящего стандарта, если все измеренные за каждую минуту в течение установленного периода (24 ч) значения установившегося отклонения напряжения находятся в интервале, ограниченном предельно допустимыми значениями, а не менее 95 % измеренных за тот же период времени значений установившегося отклонения напряжения находятся в интервале, ограниченном нормально допустимыми значениями.

Качество электрической энергии по установившемуся отклонению напряжения считают соответствующим требованиям настоящего стандарта, если суммарная продолжительность времени выхода за нормально допустимые значения составляет не более 5 % от установленного периода времени, т. е. 1 ч 12 мин, а предельно допустимые значения — 0 % от этого периода времени.

В электрических сетях однофазного тока действующее значение напряжения определяется как значение напряжения основной частоты  $U_{(1)}$  без учета высших гармонических составляющих напряжения, а в электрических сетях трехфазного тока — как действующее значение напряжения прямой последовательности основной частоты  $U_{1(1)}$ .

Нормально допустимые и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения равны соответственно  $\pm 5$  и



$\pm 10\%$  от номинального значения напряжения в точках общего присоединения потребителей электрической энергии должны быть установлены в договорах на энергоснабжение для часов минимума и максимума нагрузок в энергосистеме с учетом необходимости выполнения норм стандарта на выводах приемников электрической энергии.

## 5.2 Колебания напряжения

При резком изменении нагрузки (пуск асинхронных электродвигателей с большой кратностью пускового тока, работа технологических установок с быстропеременным режимом работы, включение сварочных агрегатов) происходят колебания напряжения.

Колебания напряжения характеризуются двумя показателями:

- размахом изменения напряжения;
- дозой фликера.

**Размах изменения напряжения** – это величина, равная разности между амплитудными или действующими значениями напряжения до и после одиночного изменения напряжения.

Размах изменения напряжения  $\delta U_t$  вычисляют по формуле, %:

$$\delta U_t = \frac{|U_i - U_{i+1}|}{U_{\text{ном}}} 100, \quad (5.5)$$

где  $U_i, U_{i+1}$  – значения следующих один за другим экстремумов (или экстремума и горизонтального участка) огибающей среднеквадратичных значений напряжения (рисунок 5.1).

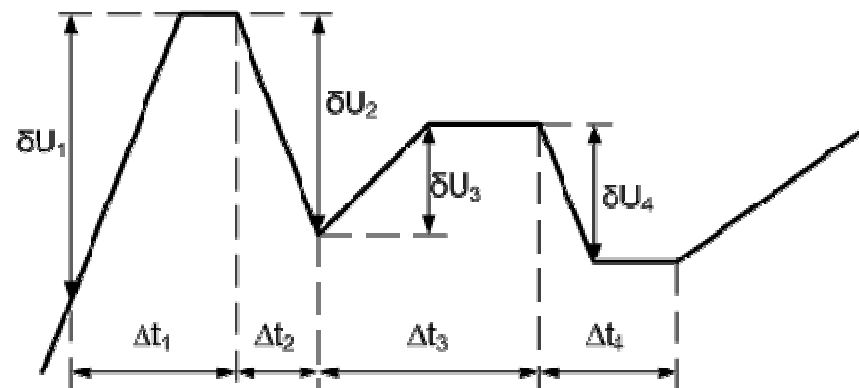


Рисунок 5.1 – Колебания напряжения

Частота повторения изменений напряжения  $F_{\delta U_t}$ , (1/с, 1/мин) при периодических колебаниях напряжения вычисляют по формуле:

$$F_{\delta U_t} = \frac{m}{T},$$

где  $m$  – число изменений напряжения за время  $T$ ;

$T$  – интервал времени измерения, принимаемый равным 10 мин.

Если два изменения напряжения происходят один за другим с интервалом менее 30 мс, то их рассматривают как одно [1].

Интервал времени между изменениями напряжения равен:

$$\Delta t_{i,j+1} = t_{i,j+1} - t_i, \quad (5.6)$$

где  $t_i, t_{i+1}$  – начальные моменты следующих один за другим изменений напряжения, с, мин.

Определение допустимости размахов изменения напряжения (колебаний напряжения) осуществляется по кривым зависимости допустимых размахов колебаний от частоты повторений изменений напряжения или интервала времени между последующими изменениями напряжения.

Качество электроэнергии в точке общего присоединения при периодических колебаниях напряжения, имеющих форму меандра (прямоугольную) (рисунок 5.2) считают соответствующим требова-

ниям стандарта, если измеренное значение размаха изменений напряжения не превышает значений, определяемых по кривым рисунка 5.2 для соответствующей частоты повторения изменений напряжения  $F_{\delta U_t}$ , или интервала между изменениями напряжения  $\Delta t_{i,i+1}$ .

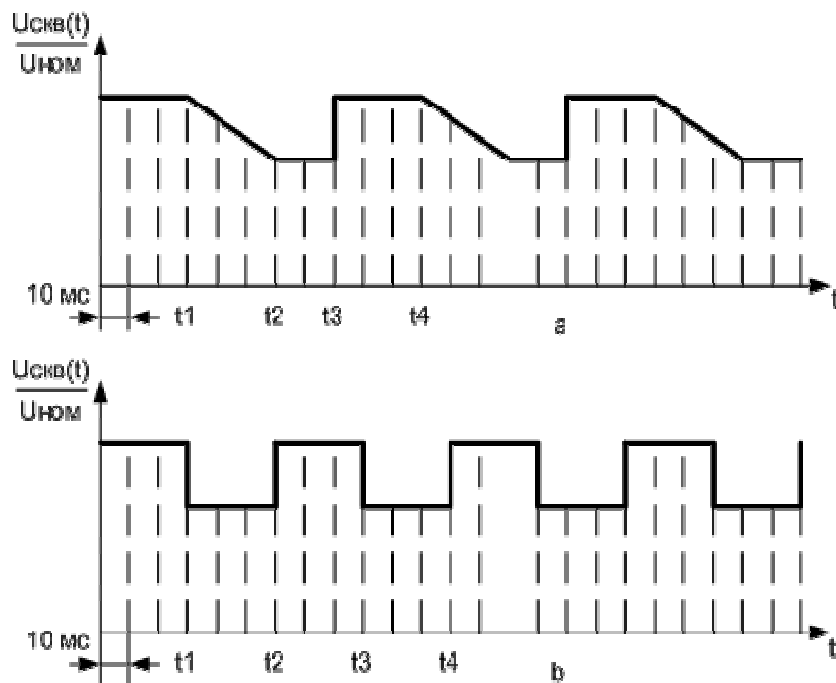


Рисунок 5.2 – Колебания напряжения произвольной формы (а) и имеющие форму меандра (б)

Предельно допустимое значение суммы установившегося отклонения напряжения  $\delta U_y$  и размаха изменений напряжения  $\delta U_t$  в точках присоединения к электрическим сетям напряжением 0,38 кВ равно +10 % от номинального напряжения.

**Доза фликера** – это мера восприимчивости человека к воздействию колебаний светового потока, вызванных колебаниями напряжения в питающей сети, за установленный промежуток времени.

Стандартом устанавливается кратковременная ( $P_{st}$ ) и длительная доза фликера ( $P_{Lt}$ ). Кратковременную дозу фликера определяют на

интервале времени наблюдения, равном 10 мин, длительную – на интервале 2 ч. Исходными данными для расчета являются уровни фликера, измеряемые с помощью фликерметра – прибора, в котором моделируется кривая чувствительности (амплитудно-частотная характеристика) органа зрения человека.

Качество электроэнергии по дозе фликера соответствует требованиям стандарта, если кратковременная и длительная дозы фликера, определенные путем измерения в течение 24 ч или расчета, не превышают предельно допустимых значений: для кратковременной дозы фликера – 1,38; для длительной – 1,0 (при колебаниях напряжения с формой, отличающейся от меандра) [1].

Предельно допустимое значение для кратковременной дозы фликера в точках общего присоединения потребителей электроэнергии, располагающих лампами накаливания в помещениях, где требуется значительное зрительное напряжение, при колебаниях напряжения с формой, отличающейся от меандра, равно 1,0, а для длительной формы фликера – 0,74 [1].

### 5.3 Несинусоидальность напряжения

Синхронные генераторы электростанций и силовые трансформаторы, работающие при повышенных значениях магнитной индукции в сердечнике (при повышенном напряжении на их выводах), выпрямительные устройства, тиристорные установки, сварочные трансформаторы и другие потребители электроэнергии с нелинейными вольтамперными характеристиками генерируют в сеть токи и напряжения других высших частот. Это приводит к искажению формы кривой синусоидальных токов и напряжений.

Синхронные генераторы и силовые трансформаторы существенного влияния на искажение формы кривой напряжения системы электроснабжения не оказывают. В промышленности главной причиной искажений являются вентильные преобразователи, электродуговые сталеплавильные печи, установки дуговой и контактной сварки, преобразователи частоты, индукционные печи, ряд электронных технических средств. В сельском хозяйстве такими источниками являются тиристорные регуляторы, выпрямительные установки, сварочные трансформаторы, люминесцентные лампы и др. Электронные приемники электроэнергии и газоразрядные лампы создают при своей работе невысокий уровень гармонических иска-

жений на выходе, но (так как общее количество таких электроприемников велико) они оказывают значительное влияние на искажение формы кривой напряжения.

Любую несинусоидальную функцию  $f = f(\omega t)$  (рисунок 5.3), удовлетворяющую условию Дирихле, можно представить в виде суммы постоянной величины и бесконечного ряда синусоидальных величин с кратными частотами. Такие синусоидальные составляющие называются гармоническими составляющими или гармониками. Синусоидальная составляющая, период которой равен периоду несинусоидальной периодической величины, называется основной или первой гармоникой. Остальные составляющие синусоиды (с частотами со второй по  $n$ -ую) называют высшими гармониками.

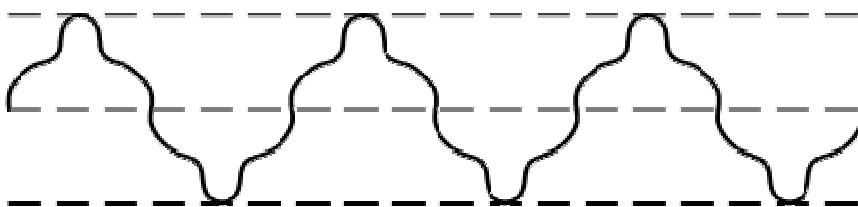


Рисунок 5.3 – Несинусоидальность напряжения

Несинусоидальность напряжения характеризуется следующими показателями:

- ✓ коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения;
- ✓ коэффициентом  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения.

**Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения.** Данный коэффициент определяется следующим образом:

для каждого  $i$ -го наблюдения за установленный период времени, равный 24 ч, определяют действующие значения гармонических составляющих напряжения в диапазоне от 2-ой до 40-ой в вольтах или киловольтах.

Затем вычисляют значение коэффициента искажения синусоидальности кривой  $K_{Ui}$  в процентах как результат  $i$ -го наблюдения определяется по выражению, %

$$K_{Ui} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)i}^2}}{U_{(1)i}}, \quad (5.7)$$

где  $U_{(n)i}$  – действующее значение  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения как результат  $i$ -го наблюдения, В, кВ;

$n$  – порядок гармонической составляющей напряжения;

$U_{(1)i}$  – действующее значение напряжения основной частоты для  $i$ -го наблюдения, В, кВ.

Допускается вычислять данный показатель по формуле

$$K_{Ui} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)i}^2}}{U_{\text{ном}}}$$

И, наконец, вычисляют значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U$  в процентах как результат усреднения  $N$  наблюдений  $K_{Ui}$  на интервале времени, равном 3 с, по формуле

$$K_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{Ui}^2}{N}} \quad (5.8)$$

Число наблюдений  $N$  должно быть не менее 9.

Качество электрической энергии по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения считают соответствующим требованиям настоящего стандарта, если наибольшее из всех измеренных в течение 24 ч значений коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжения не превышает предельно допустимого значения, а значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, соответствующее вероятности 95 % за установленный период времени, не превышает нормально допустимого значения [1].

При этом качество электрической энергии по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения считают соответствующим требова-

ниям настоящего стандарта, если суммарная продолжительность времени выхода за нормально допустимые значения составляет не более 5 % от установленного периода времени, т.е. 1 ч 12 мин, а за предельно допустимые значения – 0 % от этого периода времени. Нормально допустимые и предельно допустимые значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения

Нормально допустимые значения при $U_{\text{ном}}$ , кВ				Предельно допустимые значения при $U_{\text{ном}}$ , кВ			
0,38	6–20	35	110–330	0,38	6–20	35	110–330
8,0	5,0	4,0	2,0	12,0	8,0	6,0	3,0

**Коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения** определяется следующим образом:

для каждого  $i$ -го наблюдения за период времени равный 24, определяют напряжение  $n$ -ой гармоники  $U_{(n)i}$  в вольтах, киловольтах.

Затем вычисляют значение коэффициента  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)i}$  в процентах как результат  $i$ -го наблюдения по формуле

$$K_{U(n)i} = \frac{U_{(n)i}}{U_{1(i)}} 100 \quad (5.9)$$

где  $U_{1(i)}$  – действующее значение напряжения основной частоты на  $i$ -ом наблюдении в В, кВ.

Допускается вычислять данный показатель по формуле

$$K_{U(n)i} = \frac{U_{(n)i}}{U_{\text{ном}}} 100. \quad (5.10)$$

Значение коэффициента  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)}$  в процентах как результат усреднения  $N$  наблюдений  $K_{U(n)i}$  на интервале времени 3 с вычисляют по формуле

$$K_{U(n)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (K_{U(n)i})^2}{N}}. \quad (5.11)$$

Число наблюдений  $N$  должно быть не менее 9.

Качество электрической энергии по коэффициенту  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения в точке общего присоединения считают соответствующим требованиям настоящего стандарта, если наибольшее из всех измеренных в течение 24 ч значений коэффициентов  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения не превышает предельно допустимого значения, а значение коэффициента  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения, соответствующее вероятности 95 % за установленный период времени, не превышает нормально допустимого значения [1].

Дополнительно допускается определять соответствие гармонической составляющей напряжения нормам стандарта по суммарной продолжительности времени выхода измеренных значений данного показателя за нормально и предельно допустимые значения.

При этом качество электрической энергии по коэффициенту  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения считают соответствующим требованиям настоящего стандарта, если суммарная продолжительность времени выхода за нормально допустимые значения составляет не более 5 % от установленного периода времени, т. е. 1 ч 12 мин, а за предельно допустимые значения – 0 % от этого периода времени [1].

Нормально допустимые значения коэффициента  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Значение коэффициентов  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения

--	--	--

## 5.4 Несимметрия напряжения

В сельских электрических сетях напряжением 380/220 В удельный вес однофазных нагрузок значителен. В основном это осветительно-бытовые приборы и мелкомоторные установки. При проектировании и строительстве сельских низковольтных сетей стремятся равномерно распределить эти нагрузки по фазам. Не всегда удается выполнить это полностью. Но даже в тех случаях, когда удается распределить нагрузку по фазам одинаково, необходимо иметь в виду, что каждый потребитель может быть включен или отключен в зависимости от случайных обстоятельств. Поэтому нагрузка каждой из фаз во времени будет изменяться независимо от нагрузки других фаз, то есть число и мощность потребителей, включенных в отдельные фазы, в каждый конкретный момент времени не будет одинаковым. Вследствие этого в сельских электрических сетях низкого напряжения существует несимметрия нагрузок, которая вызывает значительную несимметрию напряжений.

В электрических сетях промышленных предприятий источниками несимметрии напряжений являются электросварочные агрегаты, осветительные установки, индукционные и дуговые электрические печи, тяговые нагрузки железных дорог, выполненные на переменном токе, коммунально-бытовая нагрузка.

Несимметричные режимы напряжений в электрических сетях возникают также при обрыве фазы или несимметричных коротких замыканиях.

Несимметрия напряжений характеризуется наличием в трехфазной электрической сети напряжений обратной или нулевой последовательностей, которые значительно меньше по величине, чем соответствующие составляющие напряжения прямой (основной) последовательности.

Несимметрия трехфазной системы напряжений возникает в результате наложения на систему прямой последовательности напряжений системы обратной последовательности. Это приводит к изменениям абсолютных значений фазных и междуфазных напряжений (рисунок 5.4).

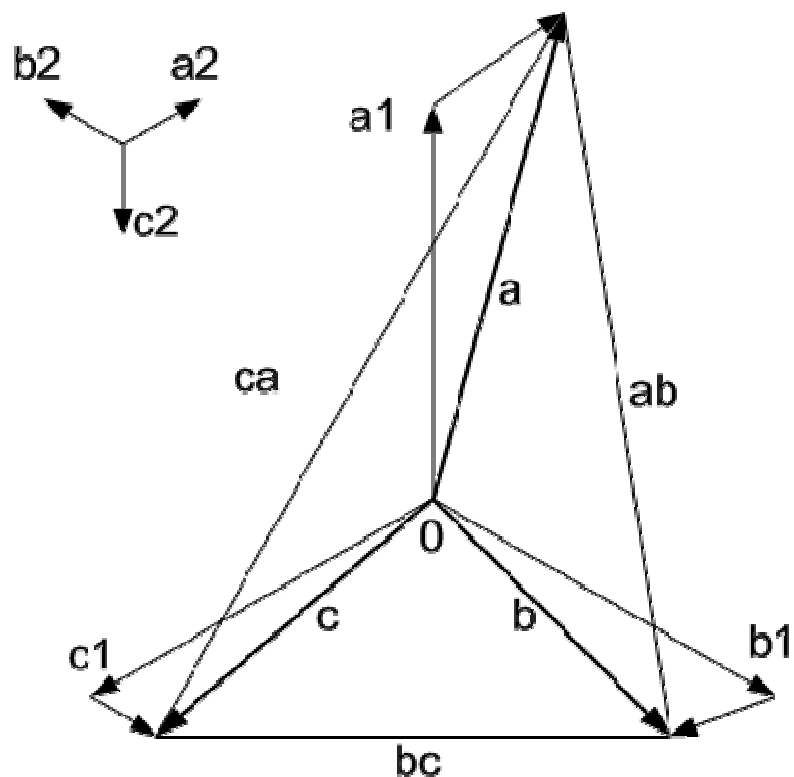


Рисунок 5.4 – Векторная диаграмма напряжений прямой и обратной последовательности

Кроме несимметрии, вызываемой напряжением системы обратной последовательности, может возникать несимметрия от наложения на систему прямой последовательности напряжений системы нулевой последовательности. В результате смещения нейтрали трехфазной системы возникает несимметрия фазных напряжений при сохранении симметричной системы междуфазных напряжений (рисунок 5.5).

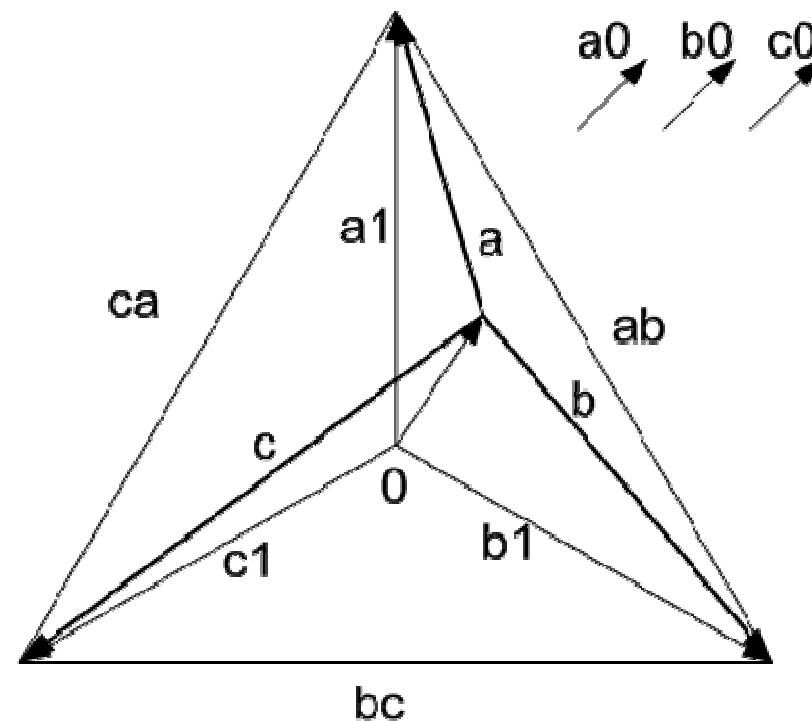


Рисунок 5.5 – Векторная диаграмма напряжений прямой и нулевой последовательности

Несимметрия напряжений характеризуется следующими показателями:

- коэффициентом несимметрии напряжений по обратной последовательности;
- коэффициентом несимметрии напряжений по нулевой последовательности.

**Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности** измеряют следующим образом:

1. Для каждого  $i$ -го наблюдения за период времени, равный 24 ч, измеряют одновременно действующие значения междуфазных напряжений  $U_{AB(1)i}$ ,  $U_{BC(1)i}$ ,  $U_{CA(1)i}$  в вольтах, киловольтах.

2. Вычисляют действующее значение напряжения обратной последовательности основной частоты по формуле

$$U_{2(1)i} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[ \left( \sqrt{3}U_{AB(1)i} - \sqrt{4U_{BC(1)i}^2 - \left( \frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2 + U_{AB(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2} \right)^2 + \left( \frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2 \right]} \quad (5.12)$$

Допускается вычислять  $U_{2(1)i}$  по приближенной формуле

$$U_{2(1)i} = 0,62(U_{нб(1)i} - U_{нм(1)i}) , \quad (5.13)$$

где  $U_{нб(1)i}, U_{нм(1)i}$  – наибольшее и наименьшее действующие значения из трех междуфазных напряжений основной частоты в  $i$ -ом наблюдении, В, кВ.

3. Вычисляют коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2Ui}$  в процентах как результат  $i$ -го наблюдения по формуле

$$K_{2Ui} = \frac{U_{2(1)i}}{U_{1(1)i}} 100 , \quad (5.14)$$

где  $U_{2(1)i}$  – действующее значение напряжения обратной последовательности основной частоты трехфазной системы напряжений в  $i$ -ом наблюдении, В, кВ;

$U_{1(1)i}$  – действующее значение напряжения прямой последовательности основной частоты в  $i$ -ом наблюдении, В, кВ.

Допускается  $K_{2Ui}$  вычислять по формуле

$$K_{2Ui} = \frac{U_{2(1)i}}{U_{н.мф}} 100 , \quad (5.15)$$

где  $U_{н.мф}$  – номинальное значение междуфазного напряжения, В, кВ.

4. Вычисляют значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2U}$  в процентах как результат усреднения  $N$  наблюдений  $K_{2Ui}$  на интервале времени равном 3 с по формуле

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{2Ui}^2}{N}} \quad (5.16)$$

Число наблюдений  $N$  должно быть не менее 9.

Качество электрической энергии по обратной последовательности в точке общего присоединения считают соответствующим требованиям настоящего стандарта, если наибольшее из всех измеренных в течение 24 ч значений коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности не превышает предельно допустимого значения, а значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности, соответствующее вероятности 95 % за установленный период времени, не превышает нормально допустимого значения [1].

Дополнительно допускается определять соответствие нормам стандарта по суммарной продолжительности времени выхода измеренных значений данного показателя за нормально и предельно допустимые значения.

При этом качество электрической энергии по коэффициенту несимметрии по обратной последовательности считают соответствующим требованиям настоящего стандарта, если суммарная продолжительность времени выхода за нормально допустимые значения соответствует не более 5 % от установленного периода времени, т. е. 1 ч 12 мин, а за предельно допустимые значения – 0 % от этого периода времени [1].

**Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности** вычисляется в следующей последовательности:

1. Для каждого  $i$ -го наблюдения за период времени, равный 24 ч, измеряют одновременно действующие значения трех междуфазных и двухфазных напряжений основной частоты  $U_{AB(1)i}, U_{BC(1)i}, U_{CA(1)i}, U_{A(1)i}, U_{B(1)i}$  в вольтах, киловольтах.

2. Определяют действующее значение напряжения нулевой последовательности  $U_{0(1)i}$  в  $i$ -ом наблюдении:

$$U_{0(1)i} = \frac{1}{6} \sqrt{\left[ \frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} - 3 \frac{U_{B(1)i}^2 - U_{A(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right]^2 + \left[ 4U_{BC(1)i}^2 - \left( U_{AB(1)i} - \frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2 \right]^2 - 3 \sqrt{\left[ 4U_{B(1)i}^2 - \left( U_{AB(1)i} - \frac{U_{B(1)i}^2 - U_{A(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2 \right]^2} \quad (5.17)$$

Допускается вычислять  $U_{0(1)i}$  по приближенной формуле:

$$U_{0(1)i} = 0,62(U_{н.б.(1)i} - U_{н.м.(1)i}), \quad (5.18)$$

где  $U_{н.б.(1)i}$ ,  $U_{н.м.(1)i}$  – наибольшее и наименьшее из трех действующих значений фазных напряжений основной частоты в  $i$ -ом наблюдении, В, кВ.

3. Вычисляют коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности  $K_{0Ui}$  в процентах как результат  $i$ -го наблюдения по формуле

$$K_{0Ui} = \frac{\sqrt{3}U_{0(1)i}}{U_{1(1)i}} 100, \quad (5.19)$$

где  $U_{0(1)i}$  – действующее значение напряжения нулевой последовательности основной частоты трехфазной системы напряжений в  $i$ -ом наблюдении, В,  $U_{1(1)i}$  – действующее значение междуфазного напряжения прямой последовательности основной частоты, В, кВ.

Допускается  $K_{0Ui}$  вычислять по формуле:

$$K_{0Ui} = \frac{U_{0(1)i}}{U_{ном.ф.}} 100, \quad (5.20)$$

где  $U_{ном.ф.}$  – номинальное значение фазного напряжения, В, кВ.

4. Вычисляют значение коэффициента несимметрии по нулевой последовательности  $K_{0Ui}$  в процентах как результат усреднения  $N$  наблюдений  $K_{0Ui}$  на интервале времени, равном 3 с по формуле

$$K_{0U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{0Ui}^2}{N}}. \quad (5.21)$$

Число наблюдений  $N$  должно быть не менее 9.

Качество электрической энергии по коэффициенту несимметрии напряжений по нулевой последовательности в точке общего присоединения считают соответствующим требованиям настоящего стандарта, если наибольшее из всех измеренных в течение 24 ч значений коэффициентов несимметрии напряжений по нулевой последовательности не превышает предельно допустимого значения, а значение коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности, соответствующее вероятности 95 % за установленный период времени, не превышает нормально допустимого значения [1].

Дополнительно допускается определять соответствие нормам стандарта по суммарной продолжительности времени выхода измеренных значений данного показателя за нормально и предельно допустимые значения.

При этом качество электрической энергии по коэффициенту несимметрии напряжений по нулевой последовательности считают соответствующим требованиям настоящего стандарта, если суммарная продолжительность времени выхода за нормально допустимые значения составляет не более 5 % от установленного периода времени, т.е. 1 ч 12 мин, а за предельно допустимые значения – 0 % от этого периода времени [1].

Нормально допустимое и предельно допустимое значения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности в точке общего присоединения к электрическим сетям равны 2,0 и 4,0 %.

Нормированные значения коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности в точке общего присоединения к четырехпроводным электрическим сетям с номинальным напряжением 0,38 кВ также равны 2,0 и 4,0 %.

## 5.5 Отклонение частоты

Отклонение частоты  $\Delta f$  есть величина, равная разности между установившимся значением частоты в системе электроснабжения в



рассматриваемый период времени и ее номинальным или базовым значением.

$$\Delta f = f_y - f_{\text{ном}}, \quad (5.22)$$

где  $f_y$  – усредненное значение частоты.

Оно определяется как результат усреднения  $N$  наблюдений  $f_i$  на интервале времени, равном 20 с, по формуле

$$f_y = \frac{\sum_{i=1}^N f_i}{N}. \quad (5.23)$$

Число наблюдений  $N$  должно быть не менее 15. Измерения проводятся в течение 24 ч.

Качество электрической энергии по отклонению частоты считают соответствующим требованиям настоящего стандарта, если все измеренные в течение 24 ч значения отклонений частоты находятся в интервале, ограниченном предельно допустимыми значениями, а не менее 95 % всех измеренных значений отклонения частоты находятся в интервале, ограниченном нормально допустимыми значениями.

Стандартом устанавливаются нормально и предельно допустимые значения отклонения частоты равные  $\pm 0,2$  Гц и  $\pm 0,4$  Гц соответственно [1].

## 5.6 Провал напряжения

Провалы напряжения представляют собой внезапное значительное снижение напряжения в точке электрической сети ниже уровня  $0,9 U_{\text{ном}}$ , за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему уровня через промежуток времени от десяти миллисекунд до нескольких десятков секунд (рисунок 5.6).

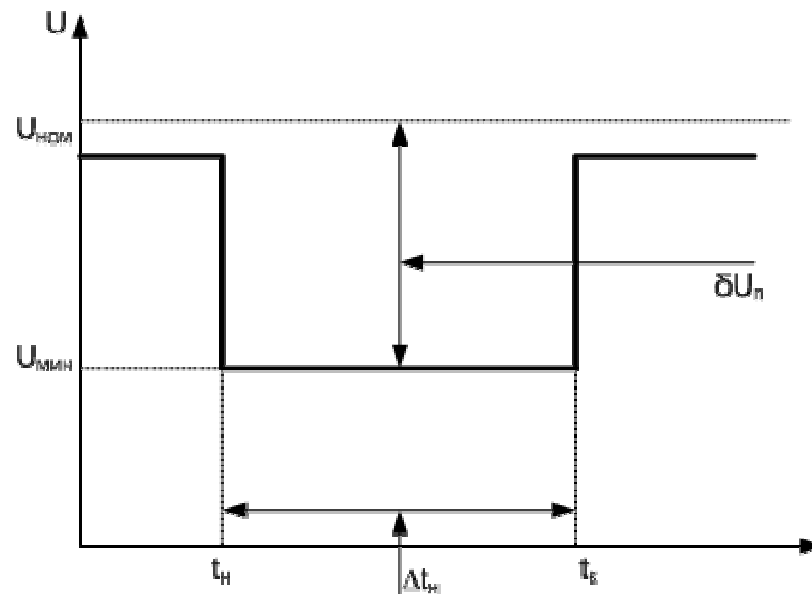


Рисунок 5.6 – Провал напряжения

Провал напряжения характеризуется показателем длительности провала напряжения, который определяется по формуле:

$$\Delta t_n = t_k - t_n, \quad (5.24)$$

где  $t_n$  и  $t_k$  – начальный и конечный моменты времени провала напряжения.

Длительность провала напряжения – это интервал времени между начальным моментом провала напряжения и моментом восстановления напряжения до первоначального или близкого уровня.

Провал напряжения характеризуется также глубиной провала напряжения  $\delta U_n$ , которая представляет собой разность между номинальным значением напряжения и минимальным действующим значением напряжения, выраженной в единицах напряжения или в процентах от его номинального значения. Провал напряжения вычисляется по выражениям:

$$\delta U_n = U_{\text{ном}} - U_{\text{мин}} \quad (5.25)$$

или, %

$$\delta U_n = \frac{U_{\text{ном}} - U_{\text{мин}}}{U_{\text{ном}}} 100. \quad (5.26)$$

Предельно допустимое значение длительности провала напряжения в электрических сетях напряжением до 20 кВ включительно равно 30 с. Длительность автоматически устраняемого провала напряжения в любой точке присоединения к электрическим сетям определяется выдержками времени релейной защиты и автоматики [1].

### 5.7 Импульс напряжения и временное перенапряжение

Искажение формы кривой напряжения может также происходить за счет появления высокочастотных импульсов при коммутациях в сети, работе разрядников и т. д.

**Импульс напряжения** – это резкое изменение напряжения в точке электрической сети, длящееся малый интервал времени относительно определенного интервала времени, за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему уровня.

Импульс напряжения характеризуется показателем импульсного напряжения (рисунок 5.7).

Импульсное напряжение в относительных единицах равно:

$$\delta U_{\text{имп}} = \frac{U_{\text{имп}}}{\sqrt{2}U_{\text{ном}}}, \quad (5.27)$$

где  $U_{\text{имп}}$  – значение импульсного напряжения, В.

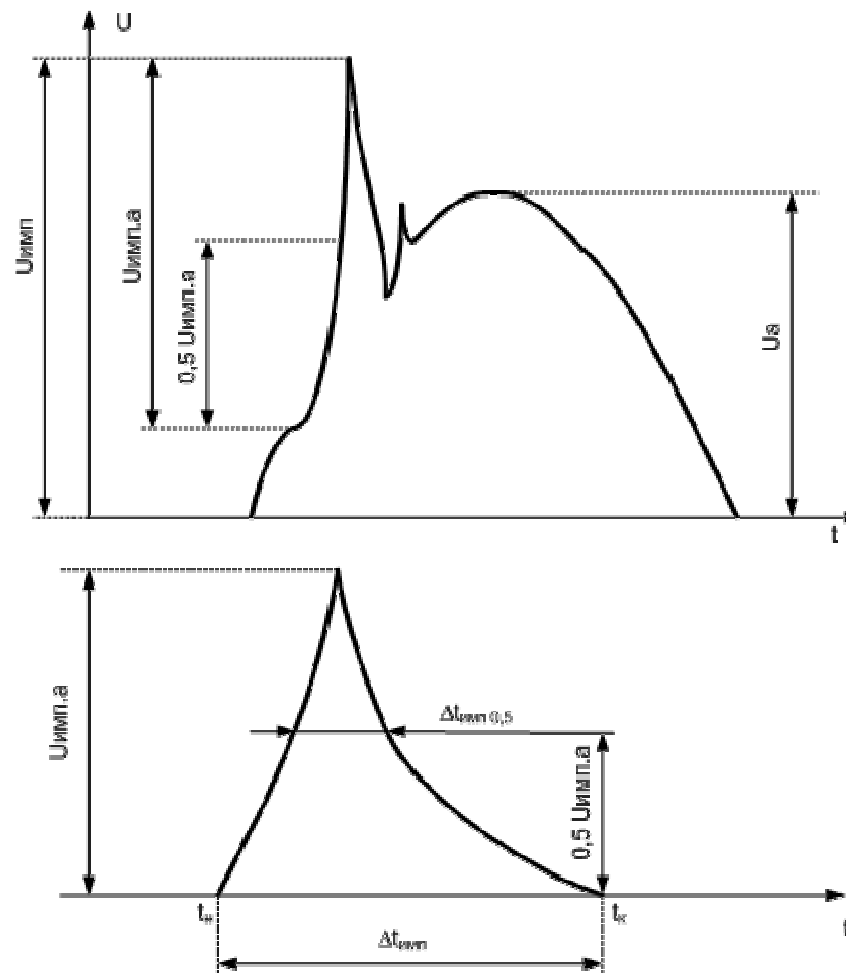


Рисунок 5.7 – Параметры импульсного напряжения

Амплитудой импульса называется максимальное мгновенное значение импульса напряжения. Длительность импульса – это интервал времени между начальным моментом импульса напряжения и моментом восстановления мгновенного значения напряжения до первоначального или близкого к нему уровня.

Значения грозовых импульсных напряжений с вероятностью 90% не превышают 10 кВ в воздушной сети напряжением 0,38 кВ и 6 кВ

– во внутренней проводке зданий и сооружений; в сетях 6–750 кВ – приведены в приложении Д ГОСТ 13109-97 [1].

Значения коммутационных импульсных напряжений при их длительности на уровне 0,5 амплитуды импульса, равной 1000–5000 мкс, приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Значения коммутационных импульсных напряжений

Номинальное напряжение сети, кВ	0,38	3	6	10	20	35	110	220
Коммутационное импульсное напряжение, кВ	4,5	15,5	27	43	85,5	148	363	705

**Временное перенапряжение** – это повышение напряжения в точке электрической сети выше  $1,1 U_{ном}$  продолжительностью более 10 мс, возникающее в системах электроснабжения при коммутациях или коротких замыканиях (рисунок 5.8).

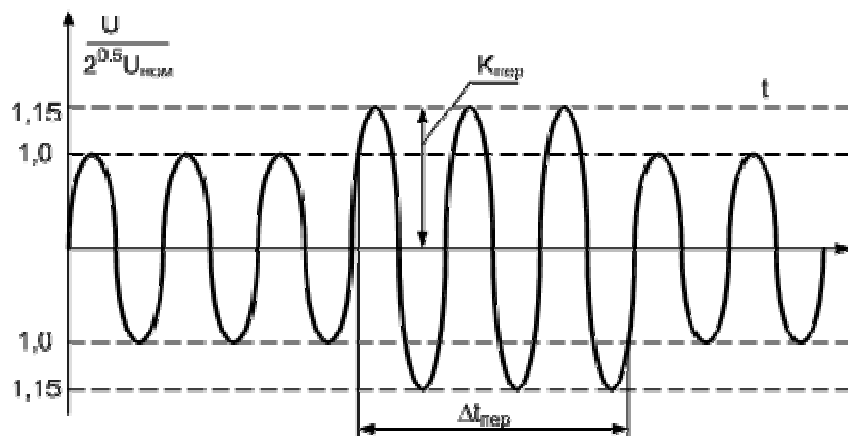


Рисунок 5.8 – Временное перенапряжение

Временное перенапряжение характеризуется коэффициентом временного перенапряжения ( $K_{перU}$ ). Этот коэффициент представ-

ляет собой отношение максимального значения огибающей амплитудных значений напряжения за время существования временного перенапряжения к амплитуде номинального напряжения сети:

$$K_{перU} = \frac{U_{a max}}{\sqrt{2} U_{ном}}. \quad (5.28)$$

Длительность временного перенапряжения представляет собой интервал времени между начальным моментом возникновения временного перенапряжения и моментом его исчезновения.

Длительность временного перенапряжения определяют следующим образом: фиксируют момент времени  $t_{н.пер}$  превышения действующим значением напряжения уровня, равного  $1,1 U_{ном}$  и момент времени  $t_{к.пер}$  спада напряжения до уровня  $1,1 U_{ном}$ . Затем вычисляют длительность временного перенапряжения в секундах по формуле

$$\Delta t_{пер.U} = t_{к.пер} - t_{н.пер}. \quad (5.29)$$

Коэффициент временного перенапряжения стандартом не нормируется.

Значения коэффициента временного перенапряжения в точках присоединения электрической сети общего назначения в зависимости от длительности временных перенапряжений не превышают значений, приведенных в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Зависимость коэффициента временного перенапряжения от длительности перенапряжения

Длительности временных перенапряжений, с	До 1	До 20	До 60
Коэффициент временного перенапряжения, о.е.	1,47	1,31	1,15

В среднем за год в точке присоединения может быть около 30 временных перенапряжений.

При обрыве нулевого проводника в трехфазных электрических сетях напряжением до 1 кВ, работающих с глухо заземленной нейтралью, возникают временные перенапряжения между фазой и землей. Уровень таких перенапряжений при значительной несимметрии фазных нагрузок может достигать значений междуфазного напряжения, а длительность – нескольких часов [1].

## 6 ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА РАБОТУ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Отклонение показателей качества электроэнергии от установленных стандартом норм отрицательно сказывается на работе электрооборудования энергоснабжающих организаций и потребителей электроэнергии. Они могут привести к значительному ущербу в промышленности, сельскохозяйственном производстве, в быту.

### 6.1 Распространенные виды потребителей

На предприятиях различных отраслей промышленности и сельского хозяйства наиболее широкое применение получили электродвигатели и установки электрического освещения. Значительное распространение на промышленных предприятиях также имеют электротермические установки, а также вентильные преобразователи, служащие для преобразования переменного тока в постоянный. Постоянный ток на промышленных предприятиях применяется для питания двигателей постоянного тока, для электролиза, в гальванических процессах, при некоторых видах сварки и т. д.

**Электродвигатели** применяются в различных производственных процессах и механизмах (кормоприготовление, навозоудаление, станки, сушильные установки и пр.). В установках, не требующих регулирования частоты вращения роторов электродвигателей в процессе работы, применяются асинхронные и синхронные электродвигатели.

В зависимости от напряжения установлены наиболее экономичные области применения **асинхронных и синхронных электродвигателей**. При напряжении до 1 кВ и мощности до 100 кВт экономичнее применять асинхронные двигатели, а свыше 100 кВт – синхронные; при напряжении до 6 кВ и мощности до 300 кВт – асинхронные двигатели, а выше 300 кВт – синхронные; при напря-

жении 10 кВ и мощности до 400 кВт – асинхронные двигатели, выше 400 кВт – синхронные [3].

Наиболее широкое распространение получили асинхронные двигатели. Это обусловлено их простотой в изготовлении и эксплуатации, сравнительно небольшой стоимостью.

**Синхронные двигатели** имеют ряд преимуществ по сравнению с асинхронными. В промышленности они обычно используются в качестве источников реактивной мощности. Их вращающий момент меньше зависит от напряжения на зажимах. Во многих случаях они имеют более высокий КПД. Однако в сельскохозяйственном производстве синхронные двигатели широкого применения не нашли, так как являются более дорогими и сложными в изготовлении и эксплуатации.

Установки **электрического освещения** применяются на предприятиях для внутреннего и наружного освещения. Они выполняются с лампами: накаливания, люминесцентными, дуговыми, ртутными, натриевыми, ксеноновыми.

**Вентильные преобразователи** являются потребителями реактивной мощности. Коэффициент мощности вентильных преобразователей, например, прокатных станов колеблется от 0,3 до 0,8. Это вызывает значительные отклонения напряжения в питающей сети. Вентильные преобразователи генерируют в сеть токи высокой частоты, что значительно искажает форму кривой напряжения. Коэффициент несинусоидальности при работе тиристорных преобразователей прокатных станов может достигать значения более 30 % на стороне 10 кВ питающего их напряжения. Так как характер нагрузки вентильных преобразователей симметричен, на симметрию напряжения они не влияют [3].

**Электросварочные установки** представляют собой однофазную неравномерную и несинусоидальную нагрузку с низким коэффициентом мощности: 0,3 – для дуговой сварки, 0,7 – для контактной. Сварочные трансформаторы и аппараты малой мощности подключаются к сети 380/220 В, более мощные – к сети 6–10 кВ. Они являются причиной нарушения нормальных условий работы для других электроприемников. В частности, сварочные агрегаты, мощность которых в настоящее время достигает 1500 кВт в единице, вызывают колебания напряжения в электрических сетях значительно большие, чем, например, пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Кроме того, эти колебания напряжения происходят продолжительное время и с широким диапазоном частот.

**Электротермические установки** (в зависимости от области применения и метода нагрева) делятся на различные группы. В промышленности это дуговые печи, печи сопротивления прямого и косвенного действия, электронные плавильные печи, вакуумные, шлакового переплава, индукционные печи; в сельскохозяйственном производстве – электрические водонагреватели, электрические котлы, электрообогреваемые полы, электрокалориферные установки и пр. Такие электроприемники оказывает неблагоприятное влияние на питающую сеть. Например, дуговые печи, которые могут иметь мощность до 10 МВт, в настоящее время сооружаются как однофазные. Выпускается большое количество однофазных электрических водонагревателей. Это приводит к нарушению симметрии токов и напряжений (последнее происходит в связи с падением напряжения на сопротивлениях сети от токов разных последовательностей). Кроме того, дуговые печи, как и вентильные установки, являются нелинейными электроприемниками и приводят к несинусоидальности токов, а, следовательно, и напряжений.

Коммунально-бытовая электрическая нагрузка жилого сектора городов, поселков городского типа, сельских населенных пунктов характеризуется широким спектром бытовых электроприемников, которые (по их назначению и влиянию на электрическую сеть) можно разделить на следующие группы:

- пассивные потребители активной мощности (лампы накаливания, нагревательные элементы утюгов, плит, обогревателей);

- электроприемники с трехфазными асинхронными двигателями (приводы лифтов, насосов – в системе водоснабжения и отопления и др.);

- электроприемники с однофазными асинхронными двигателями (приводы компрессоров холодильников, стиральных машин и др.);

- электроприемники с коллекторными двигателями (приводы пылесосов, электродрелей и др.);

- сварочные агрегаты переменного и постоянного тока (для ремонтных работ в мастерских и др.);

- выпрямительные устройства (для зарядки аккумуляторов и др.);

- радиоэлектронная аппаратура (телевизоры, компьютерная техника и др.);

- высокочастотные установки (печи СВЧ и др.);

- лампы люминесцентного освещения [4].

Влияние каждого отдельно взятого бытового потребителя на качество электрической энергии в электрической сети незначительно, но в совокупности (при подключении их к шинам 0,4 кВ трансфор-

маторной подстанции) они оказывают существенное влияние на питающую сеть.

## 6.2 Влияние отклонения напряжения

**Асинхронные электродвигатели.** Наиболее распространенными приемниками электроэнергии в промышленности и сельском хозяйстве являются асинхронные электродвигатели. Отклонение напряжения от номинального оказывает существенное влияние на их работу. При изменении напряжения изменяется механическая характеристика электродвигателя (зависимость его вращающего момента  $M$  от скольжения  $s$  или частоты вращения), (рисунок 6.1).

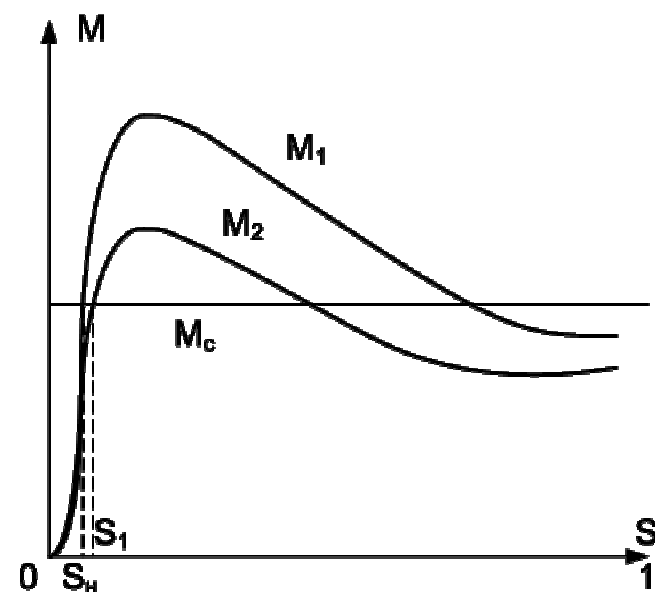


Рисунок 6.1 – Механическая характеристика двигателя при номинальном ( $M_1$ ) и пониженном ( $M_2$ ) напряжениях

В связи с тем, что вращающий момент двигателя пропорционален квадрату напряжения на его выводах, то при снижении напряжения уменьшается вращающий момент и частота вращения ротора двигателя, так как увеличивается его скольжение. Снижение частоты

ты вращения зависит также от закона изменения момента сопротивления  $M_c$  (на рисунке 6.1  $M_c$  принят постоянным) и от загрузки двигателя. Зависимость частоты вращения ротора двигателя от напряжения можно выразить:

$$n = n_c \left( 1 - k_3 \frac{U_{\text{ном}}^2}{U^2} S_{\text{ном}} \right), \quad (6.1)$$

где  $n_c$  – синхронная частота вращения;

$k_3$  – коэффициент загрузки двигателя;

$U_{\text{ном}}$ ,  $S_{\text{ном}}$  – номинальные значения напряжения и скольжения соответственно.

Из формулы (6.1) следует, что при малых нагрузках двигателя частота вращения ротора будет больше номинальной частоты вращения. В этих случаях понижение напряжения не приводит к уменьшению производительности технологического оборудования, так как не происходит снижения частоты вращения двигателей ниже номинальной.

При работе электродвигателей с полной нагрузкой понижение напряжения приводит к уменьшению частоты вращения. Если производительность механизмов зависит от частоты вращения двигателя, то на выводах таких двигателей необходимо поддерживать напряжение не ниже номинального. При значительном снижении напряжения на выводах двигателей, работающих с полной нагрузкой, момент сопротивления механизма может превысить вращающий момент. Это приводит к его остановке. В таких случаях (во избежание повреждений) двигатель необходимо отключить от сети.

Снижение напряжения в сети влияет на условия пуска асинхронных электродвигателей, так как пусковой момент их зависит от квадрата напряжения. При значительном снижении напряжения двигатель может не запуститься.

От значения напряжения на выводах электродвигателя зависит величина потребляемой им активной и реактивной мощности. В случае снижения напряжения на зажимах двигателя реактивная мощность намагничивания уменьшается (на 2–3 % при снижении напряжения на 1%), при той же потребляемой мощности увеличивается ток двигателя, что вызывает перегрев изоляции.

Если двигатель работает при пониженном напряжении продолжительное время, происходит ускоренный износ изоляции. Это приводит к снижению срока службы двигателя. Приблизительно срок службы изоляции  $T$  можно определить по формуле:

$$T = \frac{T_{\text{ном}}}{R}, \quad (6.2)$$

где  $T_{\text{ном}}$  – срок службы изоляции двигателя при номинальном напряжении и номинальной нагрузке;

$R$  – коэффициент, зависящий от значения и знака отклонения напряжения, а также от коэффициента загрузки двигателя и равный [5]:

$$R = (47\delta U^2 - 7.55\delta U + 1)k_3^2 \quad \text{при } -0,2 \leq \delta U_y < 0; \quad (6.3)$$

$$R = k_3^2 \quad \text{при } 0,2 \geq \delta U_y > 0. \quad (6.4)$$

Поэтому отрицательные отклонения напряжения более опасны в рассматриваемых пределах (с точки зрения нагрева двигателя).

Снижение напряжения приводит также к заметному росту реактивной мощности, теряемой в реактивных сопротивлениях рассеяния линий электропередачи, трансформаторов и асинхронных двигателей.

Работа электродвигателей при повышенном напряжении приводит к увеличению потребляемой ими реактивной мощности. При этом (с уменьшением коэффициента загрузки двигателя) удельное потребление реактивной мощности растет. В среднем на каждый процент повышения напряжения потребляемая реактивная мощность увеличивается на 3 % и более (в основном за счет увеличения тока холостого хода двигателя), что приводит к увеличению потерь активной мощности в элементах электрической сети.

**Лампы накаливания.** Лампы накаливания характеризуются номинальными параметрами: потребляемой мощностью  $P_{\text{ном}}$  (Вт), световым потоком  $F_{\text{ном}}$  (лм), световой отдачей  $H_{\text{ном}}$  (лм/Вт), сроком службы  $T_{\text{ном}}$  (ч). Эти показатели в значительной мере зависят от напряжения на выводах ламп накаливания. При отклонениях напряжения на 10 % эти характеристики приблизительно можно описать следующими эмпирическими формулами [5]:

$$P_{\text{о.в.}} = \frac{P}{P_{\text{ном}}} = \left( \frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^{1.53}; \quad (6.5)$$

$$F_{\text{о.в.}} = \frac{F}{F_{\text{НОМ}}} = \left(\frac{U}{U_{\text{НОМ}}}\right)^{3.67}; \quad (6.6)$$

$$T_{\text{о.в.}} = \frac{T}{T_{\text{НОМ}}} = \left(\frac{U}{U_{\text{НОМ}}}\right)^{-14.8}; \quad (6.7)$$

$$H_{\text{о.в.}} = \frac{H}{H_{\text{НОМ}}} = \left(\frac{U}{U_{\text{НОМ}}}\right)^{2.14}. \quad (6.8)$$

На рисунке 6.2 приведены зависимости номинальных параметров ламп накаливания от напряжения. Как следует из графика, при снижении напряжения значительно падает световой поток. При повышении напряжения выше номинального световой поток растет, растут также мощность лампы и световая отдача. Вследствие этого резко снижается срок службы лампы, наблюдается перерасход электроэнергии.

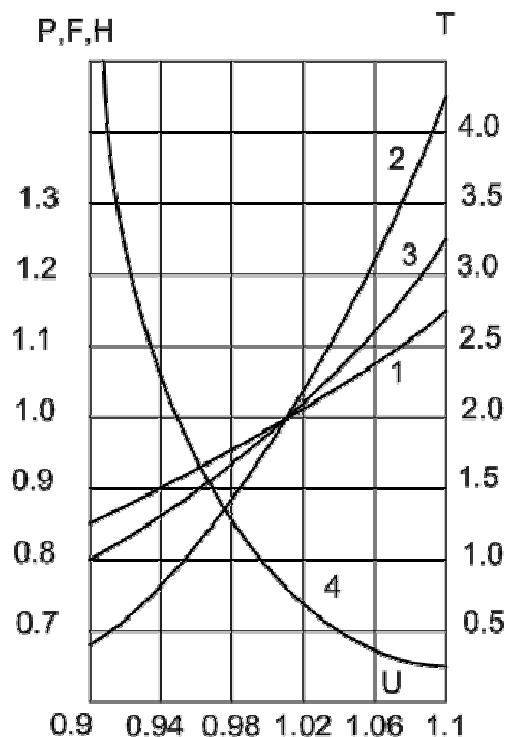


Рисунок 6.2 – Зависимости характеристик ламп накаливания от напряжения:  
 1 – потребляемая мощность; 2 – световой поток; 3 – световая отдача;  
 4 – срок службы

Если принять все эти величины при номинальном напряжении за 100 %, то при отклонении напряжения на  $\pm 1$  %:

- мощность лампы изменится на  $\pm 1,5$  %;
- световой поток – на  $\pm 3,5$  %;
- световая отдача – на  $\pm 1,8$  %;
- срок службы – на  $\mp 13$  %.

При напряжении 105 % от номинального срок службы ламп накаливания сокращается почти в 3 раза (составляет 350 ч вместо 1000 ч). При напряжении 95 % от номинального световой поток лампы составляет 82,5 %.

Изменения напряжения приводят к соответствующим изменениям светового потока и освещенности, которые оказывают влияние на производительность труда и утомляемость человека. Это подтверждается следующими данными [6]:

освещенность, %	30	60	100	200	300	600;
производительность труда, %	85	95	100	105	107	109.

За 100 % освещенности условно принята освещенность 50 лк.

**Люминесцентные лампы.** Люминесцентные лампы менее чувствительны к отклонениям напряжения. При повышении напряжения потребляемая мощность и световой поток у них увеличиваются, а при снижении – уменьшаются, но не в такой степени, как у ламп накаливания.

На  $\pm 1$  % изменения напряжения световой поток изменяется на  $\pm 1$  %, световая отдача – всего на  $\pm 0,5$  %.

Вместе с тем, при напряжении 93–94 % от номинального лампа не загорается, а при напряжении 106–107 % от номинального перегревается вспомогательная аппаратура.

При пониженном напряжении условия зажигания люминесцентных ламп ухудшаются, поэтому срок их службы, определяемый распылением оксидного покрытия электродов, сокращается как при отрицательных, так и при положительных отклонениях напряжения.

При отклонениях напряжения на 10% срок службы люминесцентных ламп снижается в среднем на 20–25%. Существенным недостатком люминесцентных ламп является потребление ими реактивной мощности, которая растет с увеличением подводимого к ним напряжения [7].

**Ультрафиолетовые лампы (эритемные и бактерицидные).** Лампы не зажигаются при понижении напряжения на 10 % от номинального и больше.

При повышении напряжения эритемный и бактерицидный потоки растут, при уменьшении – убывают.

В пределах изменения напряжения  $\pm 10$  % от его номинального значения световой поток (на каждый процент изменения напряжения) изменяется примерно на 2 %. Срок службы ламп при номинальном напряжении составляет 800–1000 ч. При повышении напряжения срок службы резко сокращается.

**Бытовая техника.** Отклонения напряжения отрицательно влияют на качество работы и срок службы бытовой электронной техники (радиоприемники, телевизоры, телефонно-телеграфная связь, компьютерная техника).

Снижение напряжения ухудшает изображение, повышение напряжения – сокращает срок службы деталей телевизоров.

Если при повышении напряжения цепей накала электронных ламп температура катода увеличивается на 3 %, то это приводит к снижению примерно в 2 раза срока службы эмитирующей поверхности.

Нагревательные бытовые приборы (плитки, утюги) мало реагируют на изменение напряжения. Однако необходимо учитывать, что их мощность меняется прямо пропорционально квадрату изменения напряжения. Например, при напряжении 90 % от номинального электрический утюг мощностью 400 Вт развивает мощность 324 Вт.

**Вентильные преобразователи.** Вентильные преобразователи автоматически (путем фазового управления) регулируют постоянный ток. При повышении напряжения в сети угол регулирования автоматически увеличивается, при понижении – уменьшается. Повышение напряжения на 1 % приводит к увеличению потребления реактивной мощности преобразователем примерно на 1–1,4 %, что снижает коэффициент мощности. В то же время другие показатели вентильных преобразователей с повышением напряжения улучшаются, вследствие этого выгодно повышать напряжение на их выводах в пределах допустимых значений [4].

**Электрические печи.** Электрические печи чувствительны к отклонениям напряжения. При понижении напряжения электродуговых печей на 7 % происходит удлинение процесса плавки стали в 1,5 раза, а повышение напряжения выше 5% приводит к перерасходу электроэнергии.

Отклонения напряжения отрицательно влияют на работу электросварочных машин (например, при изменении напряжения на 15 % для машин точечной сварки происходит 100 %-ый брак выпускаемой ими продукции) [8].

### 6.3 Влияние колебаний напряжения

Наиболее чувствительны к колебаниям напряжения осветительные приборы и электронная техника.

Колебания напряжения в сети вызывают колебания светового потока, влияющие на зрение человека. Мигание источников освещения вызывает неприятный психологический эффект, утомление зрения и организма в целом, что приводит к снижению производительности труда, а иногда и к травматизму. Наиболее сильное воздействие на глаз человека оказывают мигания с частотой 3–10 Гц. Допустимые колебания напряжения в этом диапазоне минимальные (менее 0,5 %) [9].

Лампы накаливания более чувствительны к колебаниям напряжения, чем газоразрядные. Однако колебания напряжения более 10 % могут привести к погасанию газоразрядных ламп. Зажигание их (в зависимости от типа ламп) происходит через несколько секунд и даже минут.

Колебания напряжения нарушают нормальную работу и уменьшают срок службы электронной аппаратуры: радиоприемников, телевизоров, телефонно-телеграфной связи, компьютерной техники, рентгеновских установок, радиостанций, телевизионных станций.

При колебаниях напряжения более 15% может быть нарушена нормальная работа электроприводов (возможно отпадение контактов магнитных пускателей, приводящее к остановке работающих электродвигателей).

Колебания напряжения с размахом 10–15 % могут привести к выходу из строя батарей конденсаторов, а также вентильных преобразователей.

### 6.4 Влияние несимметрии напряжений

Несимметрия нагрузок вызывает несимметрию напряжений. Одни однофазные электроприемники могут оказаться под повышенным напряжением, другие – под пониженным. На выводах трехфазных электроприемников появляется несимметричная система на-



пряжений. Отклонения напряжения у электроприемников перегруженной фазы могут превысить нормально допустимые значения, в то время как отклонения напряжения у электроприемников других фаз будут находиться в нормируемых пределах. При несимметричном режиме работы сети существенно ухудшаются условия работы как самих электроприемников, так и всех элементов сети, снижается надежность работы электрооборудования и системы электроснабжения в целом.

Рассмотрим влияние несимметрии напряжений на работу наиболее распространенных потребителей.

**Асинхронные электродвигатели.** При несимметричном напряжении сети особое влияние на работу асинхронных электродвигателей оказывает напряжение обратной последовательности. Сопротивление обратной последовательности электродвигателей примерно равно сопротивлению заторможенного двигателя и, следовательно, в 5–8 раз меньше сопротивления прямой последовательности. Следовательно, даже небольшая несимметрия напряжений вызывает значительные токи обратной последовательности. Токи обратной последовательности накладываются на токи прямой последовательности, создают противодействующий вращающий момент и вызывают дополнительный нагрев статора и ротора (особенно массивных частей ротора), что приводит к ускоренному старению изоляции электродвигателя, снижению его номинальной мощности. Срок службы полностью загруженного асинхронного электродвигателя, работающего при несимметрии напряжения 4%, сокращается в 2 раза. При несимметрии напряжения 5 % его мощность уменьшается на 5–10 % [9].

**Синхронные машины.** При несимметрии напряжений сети с появлением токов обратной последовательности в синхронных машинах возникают дополнительные потери активной мощности, происходит нагрев статора и ротора. В результате появления знакопеременных вращающих моментов и тангенциальных сил, пульсирующих с двойной частотой сети, могут также возникнуть опасные вибрации. При значительной несимметрии напряжений вибрация может оказаться опасной, особенно при недостаточной прочности и наличии дефектов сварных соединений. При несимметрии токов, не превышающей 30 %, опасные перенапряжения в элементах конструкций, как правило, не возникают [9].

В соответствии с Правилами технической эксплуатации электрических сетей и станций (ПТЭ) допускается длительная работа генераторов и синхронных компенсаторов при неравных токах фаз, если

разница токов не превышает 10 % от номинального тока статора для турбогенераторов и 20 % – для гидрогенераторов (токи в фазах не должны превышать номинальных значений). Если эти условия не выполняются, то необходимо принимать специальные меры по уменьшению несимметрии.

**Электрические сети.** При наличии в сети несимметрии напряжений по проводам линий электропередачи будут протекать токи обратной и нулевой последовательности. Это приводит к увеличению суммарных токов в отдельных фазах сети и к увеличению потерь активной мощности, что может быть недопустимым с точки зрения нагрева электрооборудования. Токи нулевой последовательности протекают постоянно через заземлители. При этом дополнительно высушивается и увеличивается сопротивление заземляющих устройств, что отрицательно влияет на работу релейной защиты, низкочастотных установок связи и устройств железнодорожной блокировки.

**Конденсаторные установки.** Конденсаторные установки при несимметрии напряжений неравномерно загружаются реактивной мощностью по фазам, что делает невозможным полное использование их установленной мощности. Кроме того, в этом случае конденсаторные установки усиливают уже существующую несимметрию напряжений (выдача реактивной мощности в сеть в фазе с наименьшим напряжением будет меньше, чем в остальных фазах) [3].

**Однофазные электроприемники.** Несимметрия напряжений значительно влияет на однофазные потребители. Например, лампы накаливания, подключенные к фазе с более высоким напряжением, имеют больший световой поток, но значительно меньший срок службы по сравнению с лампами, подключенными к фазе с меньшим напряжением. Несимметрия напряжений усложняет работу релейной защиты, ведет к ошибкам при работе счетчиков электроэнергии и т. д.

## 6.5 Влияние несинусоидальности напряжения

Потребители с нелинейными вольтамперными характеристиками, подключенные к сети с синусоидальным напряжением, потребляют несинусоидальные токи. Эти токи, проходя по элементам сети, создают падение напряжения в сопротивлениях этих элементов и, накладываясь на основную синусоиду напряжения, приводят к искажениям формы кривой напряжения. В связи с этим потребителей

с нелинейной вольтамперной характеристикой называют источниками высших гармоник.

Наиболее серьезные нарушения качества электроэнергии в электрической сети имеют место при работе мощных управляемых **вентильных преобразователей, электродуговых сталеплавильных и руднотермических печей, установок дуговой и контактной сварки, газоразрядных ламп, трансформаторов.**

Вентильные преобразователи (в зависимости от схемы выпрямления) генерируют в сеть гармоники тока: при 6-фазной схеме – до 19-го порядка; при 12-фазной – до 25-го порядка включительно [9].

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения в сетях с **электродуговыми сталеплавильными и руднотермическими печами** определяется в основном 2, 3, 4, 5, 7-ой гармониками.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения **установок дуговой и контактной сварки** определяется в основном 5, 7, 11, 13-ой гармониками.

Токи 3-ей гармоники **газоразрядных ламп** составляют 10 % от тока 1-ой гармоники, 5-ой гармоники – 3 %. Эти токи совпадают по фазе в соответствующих линейных проводах сети и, складываясь в нулевом проводе сети 380/220 В, обуславливают ток в нем, почти равный току в фазном проводе. Остальными гармониками для газоразрядных ламп можно пренебречь [9].

Исследования кривой тока намагничивания **трансформаторов**, включенных в сеть синусоидального напряжения, показали, что при трехсердцевом сердечнике и соединениях обмоток «звезда-звезда-нуль» и «треугольник-звезда-нуль» в электрической сети имеются все нечетные гармоники, в том числе гармоники, кратные трем. Гармоники, кратные трем, обусловлены несимметрией намагничивающих токов по фазам.

Токи намагничивания образуют системы токов прямой и обратной последовательности, которые по абсолютной величине одинаковы для гармоник, кратных трем. Для других нечетных гармоник токи обратной последовательности составляют около 0,25 токов прямой последовательности. Если на вводы трансформаторов подается несинусоидальное напряжение, возникают дополнительные составляющие высших гармоник тока.

В целом несинусоидальные режимы обладают теми же недостатками, что и несимметричные.

Высшие гармоники тока и напряжения вызывают дополнительные потери активной мощности во всех элементах системы электро-

снабжения: в **линиях электропередачи, трансформаторах, электрических машинах, статических конденсаторах.**

Если конденсаторы, устанавливаемые в целях компенсации реактивной мощности, работают при напряжении с повышенной частотой, их сопротивление уменьшается. При наличии в напряжении питающей сети высших гармоник, сопротивление конденсаторов на этих гармониках оказывается значительно ниже, чем на частоте 50 Гц. Из-за этого в конденсаторах, предназначенных для компенсации реактивной мощности, даже небольшие напряжения высших гармоник могут вызвать значительные токи гармоник. На предприятиях с большим удельным весом нелинейных нагрузок батареи конденсаторов работают плохо. Они или отключаются защитой от перегрузки по току, или за короткий срок выходят из строя из-за вспучивания банок (ускоренного старения изоляции) [8].

Высшие гармоники вызывают в **синхронных и асинхронных двигателях** паразитные поля и электромагнитные моменты, ухудшающие их механические характеристики и КПД.

В результате необратимых физико-химических процессов, протекающих под воздействием полей высших гармоник, а также повышенного нагрева токоведущих частей, наблюдается ускоренное старение изоляции электрических машин, трансформаторов, кабелей; ухудшение коэффициента мощности электроприемников; нарушается работа **устройств автоматики, телемеханики, компьютерной техники и других устройств с элементами электроники**; возникают погрешности измерений **индукционных счетчиков электроэнергии**; нарушается работа **вентильных преобразователей** [10].

Наличие высших гармоник неблагоприятно сказывается на работе не только электрооборудования потребителей, но и на работе **электронных устройств энергосистем.**

Необходимо отметить, что (при работе потребителей электроэнергии) несинусоидальность напряжения проявляется совместно с действиями других влияющих факторов. Следовательно, следует рассматривать совместно всю совокупность влияющих факторов.

## 6.6 Влияние отклонения частоты

Отклонение частоты питающего напряжения серьезно влияет на режимы работы электрооборудования, ход технологических процессов производства и, как следствие, на технико-

экономические показатели работы предприятий. В сельскохозяйственном производстве последствия отклонения частоты питающего напряжения проявляются в меньшей степени, в промышленности – значительнее.

При снижении частоты возрастают потери активной мощности в электрической сети, растет потребление активной и реактивной мощностей. При снижении частоты на 1 % потери в электрических сетях возрастают на 2 % [3]. Кроме этого, пониженная частота в электрической сети влияет на срок службы оборудования, содержащего элементы со сталью (электродвигатели, трансформаторы, реакторы со стальными магнитопроводами), за счет увеличения тока намагничивания в таких аппаратах и дополнительного нагрева стальных сердечников.

Отклонение частоты отрицательно сказывается на работе асинхронных электродвигателей. Частота вращения роторов двигателей пропорциональна изменению частоты сети, а производительность технологических линий зависит от частоты вращения двигателя.

Степень влияния частоты на производительность ряда механизмов может быть выражена через потребляемую ими активную мощность:

$$P = af^n, \quad (6.9)$$

где  $a$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от типа механизма;

$f$  – частота сети;

$n$  – показатель степени, (1...4).

Наиболее чувствительны к понижению частоты **двигатели собственных нужд электростанций**. Снижение частоты приводит к уменьшению их производительности, что сопровождается снижением располагаемой мощности генераторов, дальнейшим дефицитом активной мощности и снижением частоты.

**Лампы накаливания, печи сопротивления, дуговые электрические печи** на изменение частоты практически не реагируют [10].

Отклонение частоты отрицательно сказывается на работе **электронной техники**. Отклонение частоты более +0,1 Гц приводит к яркостным и геометрическим фоновым искажениям телевизионного изображения. Изменение частоты от 49,9 до 49,5 Гц влечет за собой почти четырехкратное увеличение допустимого размаха телевизионного сигнала к фоновой помехе. Изменение частоты до 49,5 Гц требует существенного ужесточения требований к отношению сиг-

нал/фоновая помеха во всех звеньях телевизионного тракта – от оборудования аппаратно-студийного комплекса до телевизионного приемника, выполнение которых сопряжено со значительными материальными затратами [9].

С целью недопущения аварий в системе электроснабжения, вызванных снижением частоты, предусматриваются специальные устройства автоматической частотной разгрузки (АЧР), отключающие часть менее ответственных потребителей. После ликвидации дефицита мощности (например, после включения резервных источников) специальные устройства частотного автоматического повторного включения (ЧАПВ) включают отключенных потребителей, нормальная работа системы восстанавливается.

### 6.7 Влияние провалов напряжения, импульсов напряжения и временного перенапряжения

Провалы напряжения возникают, в основном, при однофазных коротких замыканиях воздушных линий вследствие перекрытия изоляции. Эти повреждения могут самоликвидироваться либо устраниться при кратковременном отключении линии (с последующим автоматическим повторным ее включением). Кроме того, причиной возникновения провалов напряжения могут быть междуфазные замыкания, возникающие в результате атмосферных явлений, а также отключения питающих линий и конденсаторов. Количество провалов напряжения с глубиной до 20 % достигает в распределительных сетях 55–60 %. Свыше 60 % остановок механизмов приходится на провалы напряжения с глубиной более 20 % [9].

Импульсные и временные перенапряжения в системах электроснабжения возникают при:

- ✓ однофазных замыканиях на землю;
- ✓ коммутациях батарей конденсаторов и резонансных фильтров;
- ✓ отключении ненагруженных кабельных линий и трансформаторов; одновременной коммутации контактов выключателей и другой коммутационной аппаратуры;
- ✓ неполнофазных режимах работы электрической сети.

Провалы напряжения, импульсы напряжения и кратковременные перенапряжения являются характеристикой электромагнитных переходных помех в энергосистеме. Для этих показателей качества электроэнергии стандарт не устанавливает допустимых численных

значений, но рассматривает данные помехи в рамках проблемы электромагнитной совместимости.

В системах электроснабжения общего назначения нашли широкое применение электронные и микроэлектронные системы управления, микропроцессоры и ЭВМ. Наличие в энергосистеме провалов напряжения, импульсов напряжения и временных перенапряжений приводит к снижению уровня помехоустойчивости систем управления электроприемников, резкому возрастанию количества их отказов. Основной причиной отказов является воздействие электромагнитных переходных помех, возникающих при электромагнитных переходных процессах в сетях энергосистем, в городских и промышленных электрических сетях. Длительность протекания переходных процессов составляет от нескольких периодов тока промышленной частоты до нескольких секунд, а эффективная полоса частот помех может достигать десятков мегагерц.

Увеличение мощности энергосистем и количества воздушных линий, применяемых для повышения надежности электроснабжения промышленных предприятий, приводит к снижению надежности функционирования сложных электронных систем управления и возрастанию числа отказов помехочувствительных потребителей.

При значениях всех показателей качества напряжения электроэнергии, отличных от нормируемых, происходит ускоренное старение изоляции электрооборудования. В результате возрастает интенсивность потоков отказов с течением времени. При несинусоидальности кривой напряжения сети (даже при резонансной настройке дугогасящих аппаратов) через место замыкания на землю проходит ток высших гармоник. В данном случае может произойти прожигание кабеля в месте первого повреждения. Возможно возникновение, как показывает опыт эксплуатации, одновременно двух и более аварий из-за перенапряжения [9].

Качество электроэнергии существенно влияет на надежность электроснабжения. Аварийность в сетях с низким качеством электроэнергии выше, чем в случаях, когда показатели качества электроэнергии находятся в допустимых пределах.

## 7 КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

### 7.1 Задачи и виды контроля качества электроэнергии

Основными задачами контроля показателей качества электрической энергии являются [10]:

1) контроль показателей качества электроэнергии в электрических сетях общего назначения в процессе эксплуатации на соответствие требованиям стандарта;

2) проверка соответствия действительных значений показателей качества электроэнергии на границе раздела сети по балансовой принадлежности значениям, зафиксированным в договоре на энергоснабжение;

3) разработка технических условий на присоединение потребителя в части качества электроэнергии;

4) проверка выполнения договорных условий потребителем в части качества электрической энергии с определением допустимого расчетного и фактического вклада его в ухудшение показателей качества электроэнергии;

5) разработка технических и организационных мероприятий по обеспечению качества электроэнергии;

6) сертификация электрической энергии;

7) поиск “виновника” искажений показателей качества электроэнергии.

В зависимости от целей, решаемых при контроле и анализе качества электроэнергии, измерения показателей качества электроэнергии могут иметь следующие формы [2]:

диагностический контроль;

инспекционный контроль;

оперативный контроль;

коммерческий учет.

**Диагностический контроль качества электроэнергии.** Он проводится на границе раздела балансовой принадлежности электрических сетей потребителя и энергоснабжающей организации. Его целью является обнаружение “виновника” ухудшения качества электроэнергии, определение его допустимого вклада в нарушение требований стандарта по каждому показателю качества электроэнергии.

Диагностический контроль необходимо проводить при выдаче и проверке выполнения технических условий на присоединение

потребителя к электрической сети, при контроле договорных условий на электроснабжение, а также в тех случаях, когда необходимо определить долевой вклад в ухудшение качества электроэнергии группы потребителей, присоединенных к общему центру питания. Диагностический контроль должен проводиться периодически и предусматривать кратковременные (не более одной недели) измерения показателей качества электроэнергии. При диагностическом контроле измеряют как нормируемые, так и ненормируемые показатели качества электроэнергии, а также токи и их гармонические и симметричные составляющие, соответствующие им потоки мощности.

Если результаты диагностического контроля качества электроэнергии подтверждают «виновность» потребителя в нарушении норм качества электроэнергии, то энергоснабжающая организация совместно с потребителем должны разработать мероприятия по нормализации качества электроэнергии (с учетом существующих возможностей и сроков их выполнения). На период до реализации этих мероприятий на границе раздела электрических сетей потребителя и энергоснабжающей организации осуществляются оперативный контроль и коммерческий учет качества электроэнергии.

**Инспекционный контроль качества электроэнергии.** Инспекционный контроль качества электрической энергии должен проводиться органами сертификации. Целью его является получение информации о состоянии сертифицированной электроэнергии в электрических сетях энергоснабжающей организации, о соблюдении условий и правил применения сертификата; получение информации о том, что качество электроэнергии в течение времени действия сертификата продолжает соответствовать требованиям стандарта.

**Оперативный контроль качества электроэнергии.** Он проводится энергоснабжающей организацией в условиях эксплуатации электрических сетей в точках, где имеются и в ближайшее время не могут быть устранены причины искажения напряжения. Особенно оперативный контроль необходим в местах присоединения тяговых подстанций железнодорожного и городского электрифицированного транспорта, подстанций предприятий, имеющих потребителей с нелинейными характеристиками. Результаты оперативного контроля должны поступать по каналам связи на диспетчерские пункты электрической сети энергоснабжающей организации и системы электроснабжения предприятия.

**Коммерческий учет показателей качества электроэнергии.** Коммерческий учет показателей качества электрической энергии должен осуществляться на границе раздела балансовой принадлежности электрических сетей потребителя и энергоснабжающей организации. По его результатам должны определяться скидки (надбавки) к тарифам на электроэнергию с учетом ее качества..

Правовой и методической базой обеспечения коммерческого учета КЭ в электрических сетях Российской Федерации являются:

Гражданский кодекс (ГК РФ), ч.2;

ГОСТ 13109 – 97;

Инструкция о порядке расчетов за электрическую и тепловую энергию (№ 449 от 28 декабря 1993г., Минюст РФ).

В Республике Беларусь соответствующая нормативная база отсутствует.

Коммерческий учет качества электроэнергии должен непрерывно осуществляться в точках учета потребляемой электроэнергии как средство экономического воздействия на «виновника» ухудшения качества электроэнергии. Для этих целей должны применяться приборы, совмещающие в себе функции учета электроэнергии и измерения ее качества. Наличие в одном приборе функций учета электроэнергии и контроля показателей качества электроэнергии позволяет совместить оперативный контроль и коммерческий учет качества электроэнергии.

Приборы коммерческого учета качества электроэнергии должны регистрировать относительное время превышения нормально и предельно допустимых значений показателей качества электроэнергии (ПКЭ) в точке контроля электроэнергии за расчетный период.

## 7.2. Требования стандарта к контролю качества электроэнергии

Контроль за соблюдением выполнения требований стандарта энергоснабжающими организациями и потребителями электрической энергии должны осуществлять органы государственного надзора и аккредитованные испытательные лаборатории.

Контроль качества электроэнергии в точках общего присоединения потребителей электрической энергии к системам общего назначения проводят энергоснабжающие организации. Они выбирают точки контроля в соответствии с действующими нормативными документами, определяют периодичность контроля.

Периодичность измерений показателей качества электроэнергии устанавливаются:

для установившегося отклонения напряжения – не реже двух раз в год (в зависимости от сезонного изменения нагрузок в распределительной сети центра питания), а при наличии автоматического встречного регулирования напряжения в центре питания – не реже одного раза в год. При незначительном изменении суммарной нагрузки центра питания, неизменности схемы сети и параметров ее элементов, незначительном изменении характера электрических нагрузок потребителя, ухудшающего качество электроэнергии, допускается увеличивать интервал между контрольными измерениями для сети и ее элементов;

для остальных показателей – не реже одного раза в два года при неизменности схемы [1].

Конкретные сроки проведения периодического контроля качества электроэнергии в точках присоединения потребителей к системе электроснабжения общего назначения устанавливаются электроснабжающей организацией в эксплуатационных режимах, соответствующих нормальным схемам или длительным ремонтным схемам сетей общего назначения.

Потребители, ухудшающие качество электроэнергии, должны проводить контроль в точках собственных сетей, ближайших к точкам общего присоединения указанных сетей к электрической сети общего назначения, а также на выводах приемников электрической энергии.

Периодичность контроля качества электроэнергии устанавливает потребитель электрической энергии по согласованию с энергоснабжающей организацией.

Контроль качества тяговыми подстанциями переменного тока в электрической сети напряжением 6–35 кВ следует проводить:

для электрических сетей 6–35 кВ, находящихся в ведении энергосистем, – в точках присоединения этих сетей к тяговым подстанциям;

для электрических сетей 6–35 кВ, не находящихся в ведении энергосистем, в точках, выбранных по согласованию между тяговыми подстанциями и потребителями электроэнергии, а для вновь строящихся и реконструируемых (с заменой трансформаторов) тяговых подстанций – в точках присоединения потребителей электрической энергии к этим сетям [1].

## **8 СОСТОЯНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ И СПОСОБЫ ЕГО ПОВЫШЕНИЯ**

### **8.1 Состояние качества электроэнергии в сельских электрических сетях**

Даже при тщательном распределении нагрузки между фазами (по данным исследований Академии коммунального хозяйства им. Памфилова) не удалось получить несимметрию напряжения ниже 20 %.

Исследования, проведенные в 1958–1960 годах ВИЭСХом в сельских сетях Московской, Челябинской, Ростовской, Крымской, Запорожской, Киевской, Черкасской, Донецкой и Сумской областях, показали, что несимметрия напряжения резко выражена. В 75 % всех измерений ток в нулевом проводе превышал 25 % от среднего тока, а в 50 % всех измерений составлял больше половины среднего тока.

Исследования несимметрии напряжений были проведены в Саратовской области (Соколов Н.М., Ермаков Ю.А.–1972 г.), на Украине (Рожавский С. М., Зубко В. М., Свергун Ю. Ф. – 1972 г.), в Узбекистане (Ганихаджаев Н. Г. – 1972 г.). Анализ этих исследований показал, что несимметрия напряжений в сельских электрических сетях значительная, ее необходимо учитывать.

В 1972 году исследованием несимметрии напряжений в Белоруссии занимался ЦНИИМЭСХ. Была собрана и проанализирована информация с 187 подстанций напряжением 10/0,4 кВ Минского и Гомельского сельских районов. Исследования показали, что 33 % всех отклонений напряжения за летние сутки и 53 % за зимние сутки выходили за допустимые в то время пределы ( $\pm 7,5$  %). Только в 20 % измерений коэффициент несимметрии напряжения не превышал величины 5 %, нормируемый в то время для электродвигателей.

Кафедрой электроснабжения БГАТУ исследования качества напряжения проводились в сетях Республики Беларусь в 80-ых годах. Они показали, что отклонения напряжения от номинального нередко значительно превышают допустимые пределы. Так, например, максимальные значения их достигали в начале линии +11,4 % и –4,8 %, а в конце линии +8,3 % и –18,2 %, что недопустимо.

Как показали исследования, в сельских электрических сетях республики имеет место несимметрия напряжений. Коэффициент не-

симметрии по обратной последовательности составил 4 %, а коэффициент несимметрии по нулевой последовательности – около 8 %.

В 2007 году с использованием новейших приборов было проверено качество напряжения в электрических сетях ряда регионов республики. Исследования показали, что при загрузке трансформаторов менее 50 %, установленных в жилом секторе, коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности в течение суток изменялся от 0,7 до 1,1. Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности – от 0,9 до 2,1. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения находился в пределах от 0,9 до 2,1.

При загрузке трансформаторов более 50 %, установленных в коммунально-бытовом секторе, коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности составил 2,1%, коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности – 5,8 %, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения – 8,3 %.

В производственном секторе значения этих коэффициентов оказались несколько ниже. В ремонтных мастерских значение коэффициента  $K_{2U}$  составило 1,2–1,6 %,  $K_{0U}$  – 1,4–2,4 %,  $K_U$  – 2,1–6 %. Имели место всплески коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения до 8,1–8,4 %. На свиноводческой ферме коэффициент  $K_{2U}$  находился в пределах 0,7–1,2 %,  $K_{0U}$  – 0,3–0,6 %,  $K_U$  – 2,6–6,2 %.

## 8.2 Способы повышения качества электрической энергии

Существуют различные способы повышения показателей качества электроэнергии.

Рассмотрим способы регулирования и симметрирования напряжения.

Регулирование напряжения осуществляется:

стабилизаторами,

конденсаторами,

вольтдобавочными трансформаторами,

с помощью трансформаторов с регулировкой напряжения под нагрузкой.

Симметрирование напряжения можно осуществлять:

увеличением сечения нулевого провода;

конденсаторами;

кольцеванием сетей;

нейтралерами;

трансреакторами;

с помощью трансформаторов со специальными схемами соединения обмоток.

Увеличением сечения нулевого провода достигается уменьшение сопротивления нулевой последовательности, а это, в свою очередь, улучшает качество напряжения. Однако этот способ очень дорогой, применяется не всегда.

Конденсаторы не получили большого применения, поскольку обеспечивают ступенчатое регулирование напряжения (только обратной последовательности).

Исследования ряда авторов показывают, что симметрирующей способностью обладают асинхронные двигатели. Эффект от такого симметрирования в сельских электрических сетях (при большом удельном весе однофазных нагрузок) незначителен.

Одним из способов уменьшения несимметрии напряжений является кольцевание сетей. При этом наиболее загруженная фаза разгружается, а слабо загруженная – загружается, т. е. происходит взаимное выравнивание нагрузки фаз, несимметрия напряжений снижается. Однако кольцевание сетей не обеспечивает (при повышении надежности электроснабжения) необходимого качества напряжения. Несимметрия напряжений снижается только на 33 %.

В 1937 году инженером Куликовским А. А. был предложен специальный аппарат для уменьшения длины нулевого провода, получивший название нейтралер. Он представляет собой трехфазный автотрансформатор с коэффициентом трансформации равным единице. Обмотки выполнены по типу вторичной обмотки трансформатора «звезда-зигзаг». На каждом стержне помещаются половины обмоток двух разных фаз [11]. Исследования показали, что данный аппарат способен симметрировать напряжение. По экономическим соображениям нейтралер не нашел применения.

В Харьковском национальном техническом университете сельского хозяйства для улучшения симметрии напряжений был предложен специальный аппарат – трансреактор. Он представляет собой трансформатор, первичная обмотка которого включается в цепь нулевого провода, а во вторичную обмотку включается емкость, осуществляющая продольную компенсацию реактивной составляющей индуктивного сопротивления нулевой последовательности (рисунок 8.1) [12].

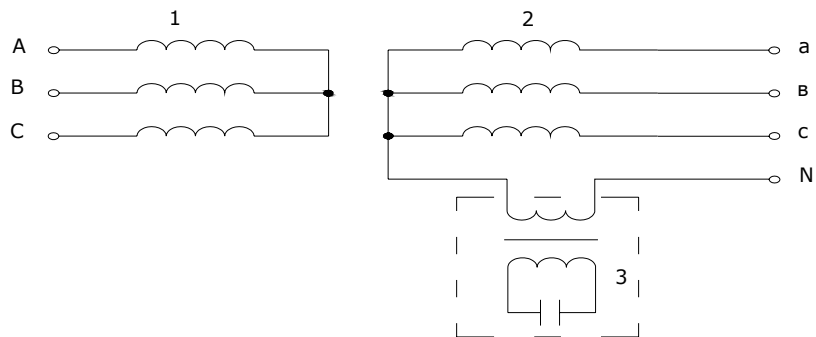


Рисунок 8.1 – Симметрирование напряжения с помощью трансреактора:  
 1 – обмотка высшего напряжения трансформатора; 2 – обмотка низшего напряжения трансформатора; 3 – трансреактор

Трансреактор в настоящее время не получил широкого распространения. Он способен снизить смещения нейтрали только до 50 %, а стоимость его соизмерима со стоимостью потребительских трансформаторов.

Способностью симметрировать напряжение (согласно теории электрических машин) обладают трансформаторы с некоторыми схемами соединения обмоток («звезда-зигзаг-нуль», «звезда-звезда-разомкнутый треугольник с нулем», «звезда-звезда-нуль с симметрирующим устройством» и др.).

Схема соединения обмоток трансформаторов «звезда-зигзаг-нуль» рекомендована ГОСТ 3484–65 как наиболее целесообразная для сельских электрических сетей [12]. Она обеспечивает симметрию фазных и линейных напряжений при несимметричной нагрузке фаз, дает возможность включать потребителей на линейные и на фазные напряжения (рисунок 8.2).

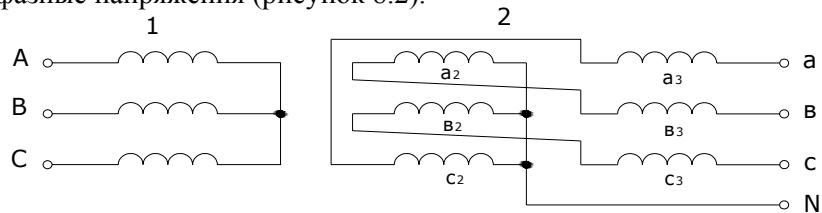


Рисунок 8.2 – Схема соединения обмоток трансформатора «звезда-зигзаг-нуль»:  
 1 – обмотка высшего напряжения трансформатора; 2 – обмотка низшего напряжения трансформатора

Наряду с указанными преимуществами трансформатор с данной схемой соединения обмоток обладает рядом недостатков. Вес обмоток у него возрастает до 17 % (по сравнению со схемой «звезда-звезда-нуль»). Потери мощности также будут больше, потому что помимо дополнительных затрат энергии ухудшается тепловой режим работы. Кроме того, данная схема не может работать в замкнутых сетях или в параллельно с трансформаторами «звезда-звезда-нуль», так как она имеет одиннадцатую группу соединения обмоток. Повышение надежности требует как установки двухтрансформаторных подстанций, так и кольцевания сетей для обеспечения потребителей высококачественной электроэнергией.

Таким образом, использование трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда-зигзаг-нуль» в сельских электрических сетях целесообразно там, где имеет место несимметрия напряжений и не требуется кольцевание сетей или параллельная работа с трансформаторами «звезда-звезда-нуль».

На кафедре электроснабжения БГАТУ разработана схема соединения обмоток «звезда-звезда-разомкнутый треугольник с нулем» [13]. Схема содержит дополнительные компенсирующие витки, расположенные на всех трех стержнях магнитопровода трансформатора и соединенные в разомкнутый треугольник. Один из свободных концов разомкнутого треугольника подключен к нейтрали обмотки низшего напряжения, другой через фарфоровый ввод, закрепленный на крышке трансформатора, выведен наружу (рисунок 8.3).

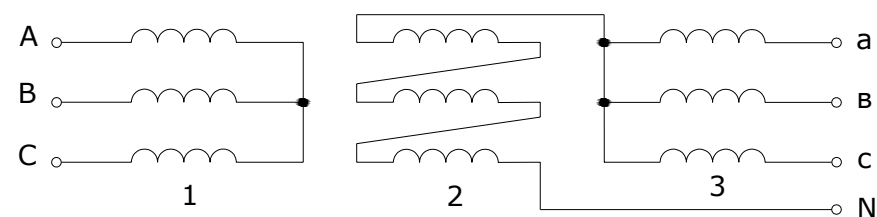


Рисунок 8.3 – Схема соединения обмоток трансформатора «звезда-звезда-разомкнутый треугольник с нулем»: 1 – обмотка высшего напряжения трансформатора; 2 – компенсирующие витки; 3 – обмотка низшего напряжения трансформатора



Компенсирующие витки уложены и включены таким образом, чтобы ток нулевого провода, равный утроенной величине тока нулевой последовательности, проходя по виткам, создавал встречные компенсирующие потоки нулевой последовательности в той же магнитной цепи, в которой протекают потоки нулевой последовательности, создаваемые токами рабочих обмоток. При равенстве потоков от компенсирующих витков и рабочих обмоток будет иметь место полная компенсация потоков нулевой последовательности.

Схема «звезда-звезда-разомкнутый треугольник с нулем» не препятствует кольцеванию сетей с трансформаторами «звезда-звезда-нуль» и может работать с ними в параллели, так как имеет ту же группу. Она обладает всеми достоинствами трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-зигзаг-нуль».

В 1984 году на кафедре электроснабжения БГАТУ была разработана новая схема соединения обмоток трансформатора «звезда-звезда-нуль с симметрирующим устройством» [14].

Трансформатор с указанной схемой соединения обмоток содержит обмотки высшего напряжения, обмотки низшего напряжения и компенсационную обмотку, охватывающую все основные обмотки. Один конец компенсационной обмотки подключен к нейтрали обмоток низшего напряжения, а другой конец выведен наружу (рисунок 8.4).

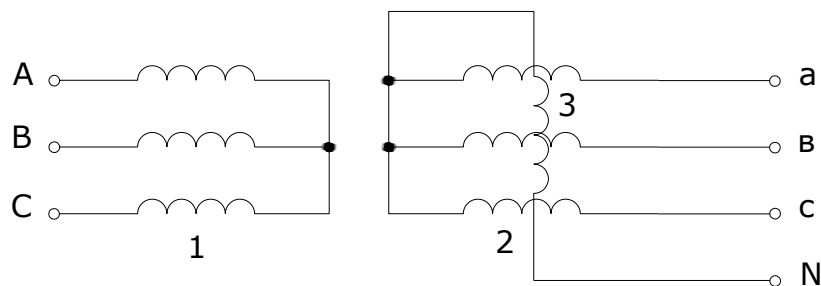


Рисунок 8.4 – Схема соединения обмоток трансформатора «звезда-звезда-нуль с симметрирующим устройством»: 1 – обмотка высшего напряжения трансформатора; 2 – обмотка низшего напряжения трансформатора; 3 – компенсационная обмотка

Компенсационная обмотка уложена и включена таким образом, чтобы ток нулевого провода, равный утроенной величине тока нулевой последовательности, проходя по виткам, создавал встречные

компенсирующие потоки нулевой последовательности в той же магнитной цепи, в которой протекают потоки нулевой последовательности, создаваемые токами рабочих обмоток. Полная компенсация потоков выполняется при равенстве ампервитков рабочей обмотки и дополнительных компенсирующих витков.

Сопротивление нулевой последовательности данного трансформатора уменьшается более чем в десять раз, при этом существенно улучшается качество напряжения.

Трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда-звезда-нуль с симметрирующим устройством» обладает всеми достоинствами трансформатора со схемой «звезда-звезда-разомкнутый треугольник с нулем» и более удобен при изготовлении. Данный трансформатор улучшает также форму кривой напряжения, так как компенсирует высшие гармонические напряжения, кратные трем, имеющие нулевую последовательность.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 13109–97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 08.01.1999. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 31 с.
2. Горюнов И.Т., Мозгалев В.С., Дубинский Е.В., Богданов В.А., Карташев И.И., Пономаренко И.С. Основные принципы построения системы контроля, анализа и управления качеством электроэнергии // Электрические станции. – 1998. – № 12.
3. Иванов, В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С. Иванов, В.И.Соколов. – Москва: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.
4. Петров В.М., Щербаков Е.Ф., Петрова М.В. О влиянии бытовых электроприемников на работу смежных электротехнических устройств // Промышленная энергетика. – 1998. – № 4.
5. Левин, М.С. Качество электроэнергии в сетях сельских районов / М.С. Левин, А.Е. Мурадян, Н.Н. Сырых. – Москва: Энергия, 1975. – 224 с.
6. Андрианов В.И., Быстрицкий Д.Н., Сырых Н.Н. Качество напряжения в сельских электросетях // Вестник с.-х. науки.– 1966. – № 6. – С. 114–122.
7. Жилинский, Ю.М. Электрическое освещение и облучение в сельскохозяйственном производстве / Ю.М. Жилинский, И.И. Свентицкий . – Москва: Колос, 1968.
8. Кудрин, Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий / Б.И. Кудрин, В.В. Прокопчик. – Минск : Высшая школа, 1988. – 357 с.
9. Жежеленко, И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко. – Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.
10. Суднова, В.В. Качество электрической энергии / В.В. Суднова. – Москва: ЗАО «Энергосервис», 2000. – 80 с.
11. Куликовский А.А. Система городских распределительных сетей с искусственной нейтральной точкой // «Электричество». – 1947. – № 9.
12. Рожавский, С.М. Уменьшение смещения нейтрали в неравномерно нагруженных сельскохозяйственных сетях 0,4/0,23 кВ с помощью трансреакторов / С.М. Рожавский, В.М. Зубко, Ю.Ф. Свергун // Материалы Всесоюзного научно-технического совещания по электрификации сельского хозяйства: сб., вып. 2. – Москва-Уфа, 1971.
13. Янукович, Г.И. О целесообразности использования в сельских электрических сетях трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда-звезда-нуль-разомкнутый треугольник» / Г.И. Янукович, А.П. Сердешнов // Обеспечение надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей: сб. – М., 1972.
14. А.С.№ 1099328(СССР). Трехфазный трансформатор / А.П. Сердешнов, Г.И. Янукович, Н.Е.Шевчик и др.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 ЗАДАЧИ ЭНЕРГЕТИКИ ПО ПОВЫШЕНИЮ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.....	4
2 ПОНЯТИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.....	6
3 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОГО СТАНДАРТА НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ...	8
4 НОМЕНКЛАТУРА ПРОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ .....	10
5 ХАРАКТЕРИСТИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРО- ЭНЕРГИИ И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НИМ.....	14
5.1 Отклонение напряжения.....	14
5.2 Колебания напряжения.....	16
5.3 Несинусоидальность напряжения.....	19
5.4 Несимметрия напряжения.....	25
5.5 Отклонение частоты.....	31
5.6 Провал напряжения.....	32
5.7 Импульс напряжения и временное перенапряжение.....	34
6 ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА РАБОТУ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ.....	38
6.1 Распространенные виды потребителей.....	38
6.2 Влияние отклонений напряжения.....	41
6.3 Влияние колебаний напряжения.....	47
6.4 Влияние несимметрии напряжений.....	47
6.5 Влияние несинусоидальности напряжения.....	49
6.6 Влияние отклонения частоты .....	51
6.7 Влияние провалов напряжения, импульсов напряжения и временного перенапряжения.....	53
7 КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.....	55
7.1 Задачи и виды контроля качества электроэнергии.....	55
7.2 Требования стандарта к контролю качества электроэнергии..	57
8 СОСТОЯНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ И СПОСОБЫ ЕГО ПОВЫШЕНИЯ.....	59
8.1 Состояние качества электроэнергии в сельских электрических сетях.....	59
8.2 Способы повышения качества электрической энергии .....	60
ЛИТЕРАТУРА.....	66

Учебное издание

**Янукович** Генрих Иосифович

### КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И СПОСОБЫ ЕГО ПОВЫШЕНИЯ

*Пособие*

Ответственный за выпуск *Н.Е. Шевчик*

Редактор *Н.А. Антипович*

Корректор *Н.А. Антипович*

Компьютерная верстка *Н.А. Антипович, Д.О. Хмелевская*

Подписано в печать 23.10.2008 г. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>

Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 4,2.

Уч.-изд. л. 3,5. Тираж 100 экз. Заказ 928.

Издатель и полиграфическое исполнение

Белорусский государственный аграрный технический университет  
ЛИ № 02330/0131734 от 10.02.2006. ЛП № 02330/0131656 от 02.02.2006.

220023, г. Минск, пр. Независимости, 99, к. 2