МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ
Проректор
_____ Т.Ю. Ткачева
«_2_» _11_ 2026 г.

КАЧЕСТВО И ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Методические указания по выполнению курсовой работы для студентов направления подготовки 13.04.02

Курск 2026

УДК 621.311
М 54
Составители: В.И. Бирюлин, Д.В. Куделина, В.О. Поданов, В.А. Чаплыгин

Рецензент:
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электроэнергетика и электротехника» *О.М. Ларин*

Качество и потери электроэнергии в электроэнергетических системах: методические указания по выполнению курсовой работы / Юго-Зап. гос. ун-т; сост. В.И. Бирюлин, Д.В. Куделина, В.О. Поданов, В.А. Чаплыгин. Курск, 2026. 29 с.: ил. 8, табл. 1. Библиогр.: с. 29.

Содержат сведения о методике расчета показателей качества электроэнергии. Указывается порядок выполнения курсового проекта, подходы к решению различных задач и правила оформления курсового проекта.

Предназначены для направления подготовки 13.04.02 всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать. Формат 60х84 1/16.
Усл.печ.л. 1,7. Уч.–изд.л. 1,5 Тираж 100 экз. Заказ. Бесплатно. 745
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях необходимости обеспечения роста объемов производств как в промышленных, так и сельскохозяйственных сферах экономики страны, а также бурного развития электроники и новейших технологий неизбежен рост потребления электроэнергии. Возникает ряд задач, непосредственно связанных с энергоснабжением потребителей. Одной из таких задач является соблюдение показателей качества электроэнергии.

Разработка курсовой работы считается первым шагом самостоятельной работы студента по своей специальности, который знакомится с основными приемами и методами определения показателей качества электроэнергии, приучается к обобщению теоретических сведений, полученных при изучении специальных курсов, к использованию нормативной документации, ГОСТов, справочной литературы для выполнения курсовой работы.

Объем расчетно-пояснительной записки курсовой работы составляет 30–50 страниц машинописного текста.

Текст должен быть лаконичным, логически связанным, расчеты после подробного изложения примера сводятся в таблицы указанной формы. Оформление пояснительной записки производится в полном соответствии с требованиями стандарта университета СТУ 02.030-2023 и ЕСКД.

Оборудование, рассматриваемое в проекте, должно выпускаться промышленностью в период разработки проекта. Сведения об источниках информации по оборудованию должны приводиться в списке использованных источников.

Настоящие методические указания посвящены расчету показателей качества электроэнергии и могут быть использованы студентами направления подготовки Электроэнергетика и электротехника.

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И СОСТАВ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Целью выполнения курсовой работы является углубление и закрепление студентом теоретических знаний путем применения их к комплексному решению поставленной задачи по изучаемой дисциплине, а также оценка компетентности обучающегося по данной дисциплине.

Системы электроснабжения и электроприемники выполняют такими, чтобы наилучшее функционирование достигалось при питании их от однофазной или симметричной трехфазной системы напряжением заданной амплитуды и синусоидальной формы частотой 50 Гц. Однако в реальных электрических сетях в результате различных электромагнитных помех происходят отклонения от этих идеальных параметров, что приводит к ухудшению работы установок потребителей электроэнергии, проявляющемуся в технико-экономическом ущербе.

Пониженное качество электроэнергии оказывает негативное влияние как на работу отдельных электроприемников, так и на нормальное функционирование энергосистемы в целом. При снижении качества электроэнергии в электрических сетях имеют место следующие отрицательные последствия:

- увеличение потерь электроэнергии во всех элементах электрической сети;
- перегрев вращающихся машин, ускоренное старение изоляции, сокращение срока службы или выход из строя электрооборудования;
- рост потребления электроэнергии и необходимой мощности электрооборудования;
- нарушение работы и ложные срабатывания устройств релейной защиты и автоматики;
- помехи в работе теле- и радиоаппаратуры, сбои электронных систем управления и вычислительной техники;
- отрицательное влияние на линии связи и устройства автоблокировки на железных дорогах;
- ухудшение показателей хозяйственной деятельности промышленных предприятий и т.д.

Наличие электрических связей между энергосистемами значительно расширяет зону отрицательного влияния снижения качества электроэнергии, обостряя тем самым проблему электромагнитной совместимости. Появилась необходимость оценивать и контролировать качество электроэнергии не только в данной точке присоединения потребителя к энергоснабжающей организации, но и в различных удаленных точках электрической сети.

Невнимание к качеству электроэнергии в процессе эксплуатации электрических сетей приводит к ухудшению электроснабжения потребителей и нарушениям работы электроприемников. Поэтому изучение вопросов оценки качества электроэнергии в различных точках электрической сети является важной задачей при подготовке инженеров электриков.

Курсовая работы направлена на закрепление знаний по курсу «Качество и потери электроэнергии в электроэнергетических системах», приобретение навыков самостоятельных технических решений, практических навыков инженерного расчета, подготовку к курсовому, дипломному проектированию, а также к практической деятельности по избранной специальности.

В курсовой работе необходимо рассчитать показатели качества электроэнергии для объекта, указанного в задании.

Основными этапами курсового проектирования являются:

1. Расчет потерь напряжения на участках 0,4 кВ питающихся от ТП1.
2. Расчет потерь напряжения на участках 0,4 кВ питающихся от ТП2.
3. Расчет потерь напряжения на участках 10 кВ.
4. Расчет потерь напряжения для потребителей цеха.
5. Анализ показателей качества электроэнергии.

ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ

Выполнять курсовую работу рекомендуется в порядке расположения разделов настоящих методических указаний в сроки, определенные графиком курсового проектирования.

Задание и состав курсовой работы для студентов очной и заочной форм обучения определяется преподавателем при выдаче задания, которое может быть изменено преподавателем с целью наибольшего приближения проекта к реальному.

Преподаватель является одновременно руководителем проекта и консультантом. Студент как автор курсовой работы полностью отвечает за принятые в проекте решения, правильность выполнения расчетов и практической части.

Выполненная студентом курсовая работа в виде расчетно-пояснительной записки предоставляется для проверки преподавателю в сроки, указанные в графике курсового проектирования.

Студенты очной формы обучения на индивидуальных консультациях должны предоставлять преподавателю для проверки результаты выполнения ими отдельных этапов проектирования.

Окончательно оформленная курсовая работа должна быть представлена руководителю проекта. Все замечания по курсовой работе приводятся в письменном виде руководителем курсовой работы.

Проверенные курсовые работы, не имеющие принципиальных ошибок, допускаются руководителем курсовой работы к защите.

Защита курсовой работы происходит открыто перед комиссией, назначенной заведующим кафедрой электроэнергетики и электротехники. На защите автор курсовой работы делает краткое сообщение по основным разделам проекта, отвечает на вопросы членов комиссии.

По результатам сообщения студента, ответов на поставленные вопросы, просмотра расчетно-пояснительной записки курсовой работы, замечаний и мнения руководителя курсовой работы комиссия определяет оценку курсовой работы.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЭТАПОВ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Характеристика основных показателей качества электроэнергии

Электроэнергия как товар обладает целым рядом специфических свойств. Она непосредственно используется при создании других видов продукции и оказывает существенное влияние на экономические показатели производства и качество выпускаемых изделий. Понятие качества электрической энергии отличается от понятия качества других товаров, так как качество электроэнергии проявляется через качество работы электроприемников.

Известно, что наиболее эффективное функционирование оборудования электрических сетей, систем электроснабжения и большинства электроприемников имеет место при номинальном напряжении (однофазном или симметричном трехфазном) синусоидальной формы и номинальной частоты. На электрических станциях электроэнергия производится с параметрами, близкими к номинальным. Изменение параметров электроэнергии происходит в результате ее передачи по элементам электрических сетей и в процессе потребления различными электроприемниками, в первую очередь, обладающими нелинейными, несимметричными и резкопеременными характеристиками (полупроводниковые преобразователи большой мощности, дуговые сталеплавильные печи, сварочное оборудование, главные приводы прокатных станов и т.п.).

Таким образом, качество электроэнергии характеризуется параметрами режима (напряжением и частотой) в узлах электрической системы. Отклонение этих параметров от идеальных (в зависимости от характера, интенсивности и продолжительности) оказывает неблагоприятное воздействие на силовые электроустановки, системы автоматики, телемеханики и релейной защиты, что приводит к снижению надежности электроснабжения, увеличению потерь электроэнергии, ухудшению качества и снижению количества выпускаемой продукции. Все это обусловливает возникновение проблемы качества электроэнергии и необходимость введения системы показателей для количественной оценки качества электроэнергии.

Основным нормативным документом является ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», в нем сформулированы требования к качеству электроэнергии в электрических сетях общего назначения.

В соответствии с ГОСТ 32144-2013 часть показателей качества электроэнергии характеризует помехи, вносимые установившимся режимом работы сети энергосистемы и потребителей, т.е. вызванные особенностями технологического процесса производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии. К ним относятся отклонения напряжения и частоты, искажения синусоидальности формы кривой напряжения, несимметрия и колебания напряжения. Для их нормирования ГОСТ 32144-2013 установлены допустимые значения.

Другая часть показателей характеризует кратковременные помехи, возникающие в электрической сети в результате коммуникационных процессов, грозовых и атмосферных явлений, работы средств защиты и автоматики и послеаварийных режимов. К ним относятся провалы и импульсы напряжения, кратковременные перерывы электроснабжения. Для этих показателей качества электроэнергии допустимых численных значений ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» не устанавливает. Однако такие параметры этих показателей, как амплитуда, длительность, частота и др., должны измеряться и составлять статистические массивы данных, характеризующие конкретную электрическую сеть в отношении вероятности появления кратковременных помех.

Всего ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» устанавливает 11 показателей качества электроэнергии:

1) отклонение частоты Δf, Гц;
2) установившееся отклонение напряжения δU_y, %;

3) размах изменения напряжения $\delta U_t, \%$;

4) доза фликера $P_t, o.e.$;

5) коэффициент искажения синусоидальности кривой междуфазного (фазного) напряжения $K_U, \%$;

6) коэффициент n-й гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}, \%$;

7) коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности $K_{2U}, \%$;

8) коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности $K_{OU}, \%$;

9) длительность провала напряжения Δt_U, с;

10) импульсное напряжения $U_{\text{ИМП}}$, кВ;

11) коэффициент временного перенапряжения $K_{\text{пер}U}$, о.е.

Первые два показателя характеризуют медленные изменения напряжения и частоты, третий и четвертый – колебания напряжения, т.е. быстрые изменения напряжения, пятый и шестой – синусоидальность формы кривой напряжения, седьмой и восьмой – несимметрию трехфазной системы напряжения, а остальные показатели – кратковременные помехи, связанные с коммутационными и грозовыми процессами.

Для первых восьми показателей качества электроэнергии в ГОСТ 32144-2013 введены допустимые нормативные значения, причем установлены два вида норм: нормально допустимые и предельно допустимые. Измеренные или расчетные значения показателей качества электроэнергии не должны превышать предельно допустимые нормы, а значения тех же показателей, определяемые с вероятностью 95 %, не должны превышать нормально допустимые значения.

Оценка соответствия показателей качества электроэнергии указанным нормам должна проводиться в течение расчетного периода, равного 24 часам. Допускается оценивать качество электроэнергии по суммарной продолжительности времени выхода показателей за допустимые значения. При этом в течение 95 % времени суток (22,8 ч) показатели качества не должны выходить за пределы нор-

мально допустимых значений и в течение всего времени суток не должны превышать предельных значений.

При изучении вопросов качества электроэнергии наибольшее внимание следует уделить первым восьми показателям, т.е. отклонениям напряжения и частоты, колебанию напряжения, искажению синусоидальности формы кривой напряжения и несимметрии напряжения. В первую очередь, необходимо ознакомиться с положениями ГОСТ 32144-2013, где приведены нормативные значения показателей качества электроэнергии.

Расчет отклонений напряжения и оценка их допустимости

Отклонение напряжения характеризуется показателем установившегося отклонения напряжения. Для установившегося отклонения напряжения δU_y установлены нормы нормально допустимого и предельно допустимого значения на выводах приемников электрической энергии, которые равны соответственно ±5 и ±10 % от номинального напряжения электрической сети.

На выход показателя за пределы норм влияют:

- суточные, сезонные и технологические изменения токовой нагрузки;
- изменение мощности генераторов и компенсирующих устройств;
- изменение схемы и параметров электрической сети.

Отклонение напряжения в любом узле электрической сети определяется по соотношению

$$\delta U_y = \frac{U - U_{\text{НСЕТИ}}}{U_{\text{НСЕТИ}}} \cdot 100\,\%, \qquad (1)$$

где U - напряжение в узле сети, где контролируется или рассчитывается δU_y, значение которого определяется из расчета установившегося режима или определяется по показаниям приборов.

Пример 1.

Оценить допустимость отклонения напряжения на зажимах ЭП (рис.1), сравнить его с допустимым по ГОСТ 32144-2013. Если необходимо, разработать мероприятия, обеспечивающие требуе-

мый уровень напряжения. Напряжение на зажимах СП1 принять 385 В.

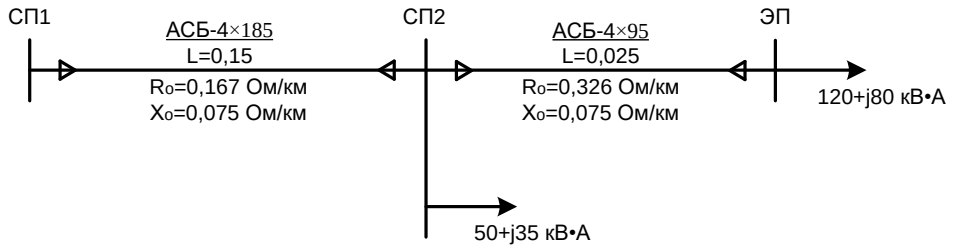


Рис. 1 Схема сети

Потеря напряжения определяется по соотношению

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U_{\text{НОМ}}}, \qquad (2)$$

где $R = R_O L$, $X = X_O L$.

Потеря напряжения

– на участке СП1-СП2

$$\Delta U_{\text{СП1}-\text{СП2}} = \frac{(120+50)\cdot 0{,}167 \cdot 0{,}15 + (80+35)\cdot 0{,}075 \cdot 0{,}15}{0{,}38} = 14{,}6 \text{ В};$$

– на участке СП2-ЭП

$$\Delta U_{\text{СП2}-\text{ЭП}} = \frac{120 \cdot 0{,}326 \cdot 0{,}025 + 80 \cdot 0{,}075 \cdot 0{,}025}{0{,}38} = 2{,}97 \text{ В}.$$

Тогда потеря напряжения на участке СП1-ЭП

$$\Delta U_{\Sigma} = U_{СП1-СП2} + U_{СП2-ЭП} = 14{,}6 + 2{,}97 = 17{,}57 \text{ В},$$

или $\Delta U_{\Sigma} = \frac{17{,}57}{380} \cdot 100\% = 4{,}62\ \%$.

Напряжение на зажимах ЭП составляет

$$U_{\text{ЭП}} = U_{\text{СП1}} - \Delta U_{\Sigma} = 385 - 17{,}57 = 367{,}43 \text{ В}.$$

Отклонение напряжения на зажимах ЭП по (1) $\delta U_У = \frac{367{,}07 - 380}{380} \cdot 100\% = -3{,}4\ \%$.

По ГОСТ 32144-2013 $\delta U_{\text{ДОП}} = -5\%$, следовательно, отклонение напряжения на зажимах ЭП допустимо.

Оценка допустимости колебаний напряжения

Колебания напряжения характеризуются следующими показателями:

- размахом изменения напряжения;
- дозой фликера.

Причины выхода показателей за пределы норм состоят в использовании электроприемников с быстропеременными режимами работы, сопровождающимися резкими изменениями мощности (главным образом реактивной) нагрузки. Наиболее распространенные электроприемники, порождающие колебания напряжения следующие:

- тяговые подстанции;
- приводы реверсивных прокатных станов;
- дуговые сталеплавильные печи;
- сварочные аппараты;
- электролизные установки.

Предельно допустимые значения размаха изменения напряжения δU_{t} в точках общего присоединения к электрическим сетям в зависимости от частоты повторения изменений напряжения $\text{F}_{\delta U_{\text{t}}}$ или интервала между изменениями напряжения $\Delta \text{t}_{\text{i,i+1}}$ равны значениям, определяемым по кривой 1 рис. 2, где представлены предельно допустимые размахи изменений напряжения в зависимости от частоты повторения изменений напряжения за минуту.

$$F_{\delta U_t} = \frac{m}{T}, \tag{3}$$

$$\Delta t_{i,i+1} = t_{i+1} + t_i, \tag{4}$$

где m – число изменений напряжения за время измерения T;

t_{i+1}, t_i – начальные моменты времени, которые соответствуют изменению напряжения.

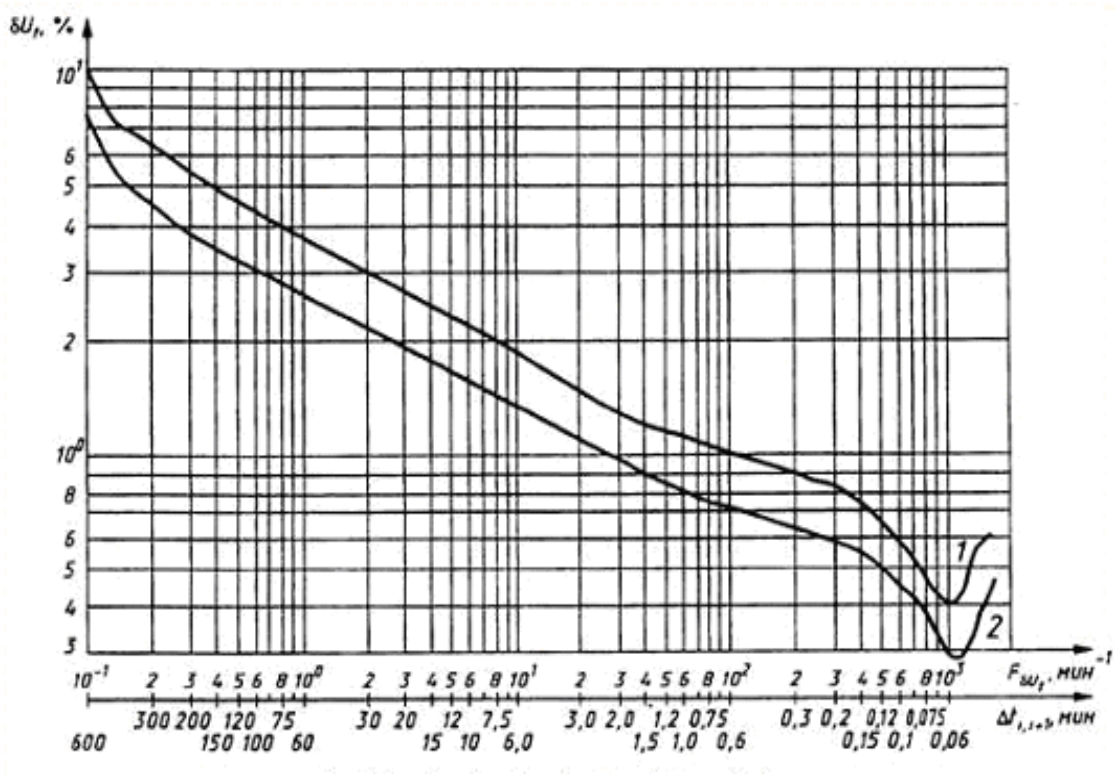


Рис. 2 Определение допустимости колебаний напряжения

Предельно допустимое значение размаха изменения напряжения δU_{t} в точках присоединения к электрическим сетям напряжением 0,38 кВ равно ±10 % от номинального напряжения.

Качество электроэнергии в точках общего присоединения при периодических колебаниях соответствует стандарту, если все измеренные или рассчитанные значения размахов δU_t,% меньше или равны допустимому размаху изменения напряжения $\delta U_{t\,доп}$, определенного по рис. 2, т.е.

$$\delta U_{t\,\text{доп}} \geq \delta U_t\,. \qquad (5)$$

Расчет размахов изменения напряжения при наличии ударных резкопеременных нагрузок ведется в предположении, что нарастание или снижение тока или мощности происходит с постоянной скоростью, т.е. по линейному закону. Принято, что длительность

периода напряжения промышленной частоты не менее времени протекания переходного процесса.

Значения размахов изменения напряжения в сети определяются по выражению

$$\delta U_t = \frac{\Delta P \cdot r + \Delta Q \cdot x}{U}, \quad (6)$$

где $\Delta P,\ \Delta Q$ – размахи изменения активной и реактивной мощностей, определяемые как разность между наибольшими значениями при набросе нагрузки и значениями предшествующего режима; r, x – активное и индуктивные сопротивления сети; U – напряжение в узле сети, к которому подключаются приемники электрической энергии.

Так как $\frac{\Delta P \cdot r}{U} << \frac{\Delta Q \cdot r}{U}$, то $\delta U_t = \frac{\Delta Q \cdot x}{U}$. В процентах $\delta U_t = \frac{\Delta Q \cdot x}{U^2} \cdot 100$ %, или

$$\delta U_t = \frac{\Delta Q}{S_{\text{КЗ}}} \cdot 100 \ \%, \quad (7)$$

где $S_{\text{КЗ}}$ – мощность КЗ в месте подключения резкопеременной нагрузки.

Для дуговых сталеплавильных печей размахи изменения напряжения определяются по соотношению

–для одной печи

$$\delta U_t = \frac{S_{\text{П.Т.}}}{S_{\text{КЗ}}} \cdot 100 \ \%, \quad (8)$$

где $S_{\text{П.Т.}}$ – мощность печного трансформатора; $S_{\text{КЗ}}$ – мощность КЗ в месте подключения ДСП;

– для нескольких печей одинаковой мощности

$$\delta U_t = \frac{S_{\text{П.Т.}}}{S_{\text{КЗ}}} \cdot \sqrt[4]{N} \cdot 100 \ \%, \quad (9)$$

где N – количество печей одинаковой мощности;

– для нескольких печей разной мощности

$$\delta U_t = \frac{S_{\text{П.Т.МАКС}}}{S_{\text{К}}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\sum_{i=1}^{N} S_{\text{П.Т.}i}}{S_{\text{П.Т.МАКС}}}} \cdot 100 \ \%, \qquad (10)$$

При схеме включения печи (рис. 3) размах изменения напряжения на шинах ВН определяется по выражению (11).

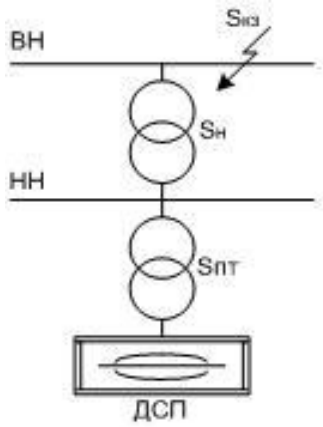


Рис. 3. Схема включения печи

$$\delta U_t = \frac{S_{\text{П.Т.}}}{S_{\text{К}}} \cdot \left(1 + \frac{S_{\text{КЗ}}}{\text{S}_{\text{Т НОМ}}} \cdot \frac{U_{\text{К}}}{100}\right) \cdot 100 \ \%, \qquad (11)$$

Для проверки соответствия допустимых размахов напряжения осветительных установок установленным требованиям предлагается выполнение следующего неравенства:

$$\sum_{i=1}^{n} \Delta t_{\text{Дi}} \le T \ , \qquad (12)$$

где T – общее время наблюдения размаха; $\Delta t_{\text{Дi}}$ – минимально допустимый интервал времени между размахами амплитуды δU_t, определяемый по нижней шкале кривой допустимых размахов изменения напряжения.

Пример 2.

Оценить допустимость колебаний напряжения в сети (схема РП показана на рис. 4).

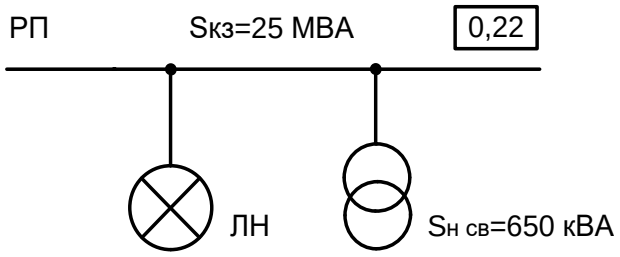


Рис. 4. Схема РП

Длительность работы сварки составляет $T_p = 3$ мин. При этом совершается $m = 120$ колебаний напряжения.

Расчетный размах изменения напряжения

$$\delta U_{t\,\text{р}} = \frac{S_{\text{н св}}}{S_{\text{кз}}} = \frac{0{,}65}{25} \cdot 100\ \% = 2{,}6\ \%.$$

Частота колебаний напряжения равна

$$F = \frac{m}{T_{\text{р}}} = \frac{120}{3} = 40\ \ мин^{-1}.$$

Допустимый размах изменения напряжения определяем по кривым предельно допустимых размахов изменений напряжения в зависимости от частоты повторения изменений напряжения: $\delta U_{t\,\text{доп}} = 0{,}9\ \%$.

$\delta U_{t\,\text{доп}} < \delta U_{t\,\text{р}} \Rightarrow$ колебания недопустимы.

Несинусоидальность напряжения. Расчет коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения и оценка его допустимости

При подключении к сети нелинейных приемников электроэнергии возникают токи высших гармоник. Токи высших гармоник, протекая по элементам сети, вызывают падения напряжения в сопротивлениях этих элементов, которые, накладываясь на основную синусоиду напряжения, приводят к искажению формы кривой напряжения. Несинусоидальность напряжения сети принято характеризовать коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения.

Наиболее распространенные электроприемники, порождающие несинусоидальность напряжения сети:

•вентильные преобразователи;
•дуговые электропечи;
•разрядные лампы;
•установки электродуговой сварки.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения определяется как

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_n U_n^2}}{U_1} \cdot 100 \ \%, \qquad (13)$$

где $U_1 = \frac{U_H}{\sqrt{3}}$ – фазное номинальное напряжение сети (напряжение первой гармоники при $f = 50 \ Гц$); U_n – напряжение n - й гармоники; n - номер гармоники.

Количество и номер гармоник зависит от вида нелинейной нагрузки. Для вентильных преобразователей 6-фазной схемы выпрямления напряжения учитываются гармоники 5, 7, 11, 13, для 12-фазной схемы выпрямления – 11, 13, 23, 25. Номера гармоник более высокого порядка определяются по выражению

$$n = k \cdot m \pm 1, \qquad (14)$$

где $k = 1, 2, 3...$ - последовательный ряд чисел; m – число фаз выпрямления.

Для дуговых сталеплавильных печей учитываются гармоники 2, 3, 4, 5, 6, 7, для разрядных ламп – 3, 5.

При оценке коэффициента искажения не учитываются гармоники, для которых значение напряжения не превышает 0,1 %.

Допустимые значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Допустимые значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения

Нормально допустимое значение при $U_{ном}$ сети, кВ				Предельное допустимое значение при $U_{ном}$ сети, 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

При расчете коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения исходят из представления нелинейных нагрузок в виде элементов, генерирующих токи *n*-й гармоники, и расчет ведется по схемам замещения, параметры которых изменяются для каждой гармоники в соответствии с ее порядковым номером. При этом сопротивления элементов схем замещения для *n*-й гармоники определяются по выражениям:

• сопротивление трансформатора –

$$X_{\text{Т}(n)} = n \cdot \frac{U_{K\%}}{100} \cdot \frac{U_{\text{Н}}^2}{S_{\text{НТ}}}, \qquad (15)$$

• сопротивление двигателя –

$$X_{\text{ДВ}(n)} = n \cdot X_{\text{ДВ}}, \qquad (16)$$

• сопротивление системы –

$$X_{\text{С}(n)} = n \cdot \frac{U_{\text{Н}}^2}{S_{\text{К}}}, \qquad (17)$$

• сопротивление реактора –

$$X_{\text{Р}(n)} = n \cdot X_{\text{Р}}, \qquad (18)$$

• сопротивление батареи конденсаторов –

$$X_{\text{БК}(n)} = -\frac{U_{\text{Н}}^2}{n \cdot Q_{\text{НББ}}}, \qquad (19)$$

• сопротивление нагрузки –

$$\overset{*}{Z}_{\text{Н}(n)} = (0{,}18 + j0{,}24 \cdot n) \cdot \frac{U_{\text{Н}}^2}{\text{S}_{\text{Н}}}, \qquad (20)$$

• сопротивление ЛЭП –

$$\overset{*}{Z}_{H(n)} = (r_0 + jn \cdot x_0) \cdot l. \qquad (21)$$

Напряжение *n* - й гармоники

$$U_n = I_{(n)} \cdot X_{(n)}, \qquad (22)$$

где $I_{(n)}$ – токовая нагрузка *n* – й гармоники;

$X_{(n)}$ – сопротивление схемы замещения *n* – й гармоники.

Токовая нагрузка *n*-й гармоники ДСП определяется по выражению

– для одной печи

$$I_{(n)} = \frac{I_{\text{П.Т.}}}{n}, \tag{23}$$

где $I_{\text{П.Т.}}$ – номинальный ток печного трансформатора; n – номер гармоники;

– для группы печей одинаковой мощности

$$I_{(n)\text{гр}} = I_{(n)} \cdot \sqrt[4]{N}, \tag{24}$$

где N – количество печей одинаковой мощности;

– для группы печей разной мощности

$$I_{(n)\text{гр}} = I_{(n)\text{МАКС}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\sum_{i=1}^{N} S_{\text{П.Т}.i}}{S_{\text{П.Т.МАКС}}}}, \tag{25}$$

Для установок дуговой и контактной сварки переменного тока токовая нагрузка n – ной гармоники определяется по формулам:

– для одной сварочной установки

$$I_{(n)} = \frac{S_T \cdot K_З \cdot \sqrt{ПВ_*}}{n^2 \cdot U_{\text{НОМ}}}, \tag{26}$$

где $S_{\text{Т}}$ – мощность сварочного трансформатора; $K_{\text{З}}$ – коэффициент загрузки трансформатора; n – номер гармоники.

– для группы сварочных установок

$$I_{(n)\text{гр}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} I_{(n)i}^2}, \tag{27}$$

где N – число сварочных установок; $I_{(n)\text{i}}$ – номинальный ток n-й гармоники для i - й установки.

Для дуговой сварки постоянного тока учитываются гармоники 5, 7, 11. При этом для одной сварочной установки

$$I_{(n)} = \frac{I_{\text{СВ}}}{n^2}, \tag{28}$$

где $I_{\text{СВ}}$ – первичный ток сварочной установки.

Для группы сварочных установок

$$I_{(n)\text{гр}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} I_{(n)i}^2}, \tag{29}$$

где N – число сварочных установок.

При проверке возможности работы батарей конденсаторов в сети с высшими гармониками необходимо, чтобы эквивалентный ток всех гармоник, проходящий через БК, в данном режиме не превышал допустимого тока БК:

$$I_{(\text{ЭКВ})\text{БК}} \le I_{\text{ДОП.БК}}, \qquad (30)$$

где $I_{(\text{ЭКВ})\text{БК}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} I^2_{(n)\text{БК}}}$;

$I_{\text{ДОП БК}} = 1{,}3 \cdot I_{\text{НОМ.БК}}$

$I_{НОМ.БК}$ – номинальный ток батареи конденсаторов.

В сети, содержащей индуктивность и емкость, возможен резонанс токов, если

$$nX_{\Sigma(\text{L})} = \frac{X_{\Sigma(C)}}{n}, \qquad (31)$$

откуда определяется номер гармоники n, на которой возможен резонанс токов.

Пример 3.

Оценить возможность совместной работы шестифазного вентильного преобразователя и нагрузки (рис. 5).

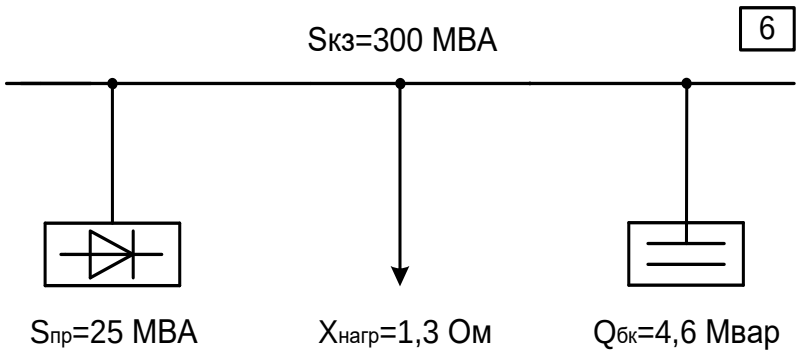


Рис. 5. Схема подключения вентильного преобразователя и нагрузки

Для данной схемы нормально допустимое значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения равно $K_U = 5$ %.

Вентильный преобразователь генерирует гармоники 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23. Учтем только 5, 7 и 11.

Схема замещения сети представлена на рис. 6.

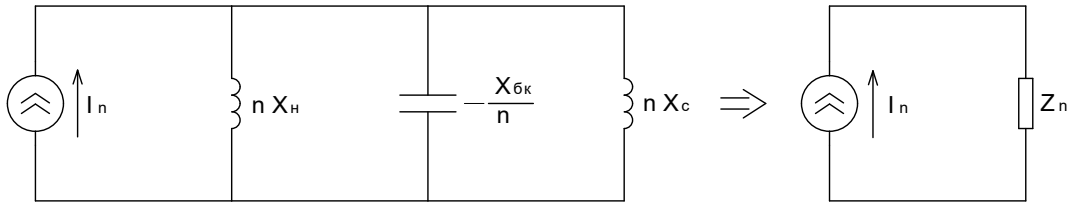


Рис. 6. Схема замещения

Параметры схемы замещения: $X_H = 1{,}3$ Ом;

$X_{\text{БК}} = U_{\text{Н}}{}^2 / Q_{\text{БК}} = 6^2 / 4{,}6 = 7{,}826$ Ом;

$X_{\text{С}} = U_{\text{Н}}{}^2 / S_{\text{КЗ}} = 6^2 / 300 = 0{,}12$ Ом.

Значение фазного тока для *n*-й гармоники (при $n \le 13$) определяем по формуле

$$I_n = \frac{S_{\text{пр}}}{\sqrt{3} U_н n}, \qquad (32)$$

$I_5 = \dfrac{25}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 5} = 0{,}481$ кА; $I_7 = 0{,}343$ кА; $I_{11} = 0{,}218$ кА.

Суммарное сопротивление сети для 5-й гармоники

$$Z_5 = \frac{5X_{\text{Н}} \cdot \left(-\dfrac{X_{\text{БК}}}{5} \cdot 5X_{\text{С}} \right) \Big/ \left(-\dfrac{X_{\text{БК}}}{5} + 5X_{\text{С}} \right)}{5X_{\text{Н}} + \left(-\dfrac{X_{\text{БК}}}{5} \cdot 5X_{\text{С}} \right) \Big/ \left(-\dfrac{X_{\text{БК}}}{5} + 5X_{\text{С}} \right)};$$

$$Z = \frac{5 \cdot 1{,}3 \cdot \left(-\dfrac{7{,}826}{5} \cdot 5 \cdot 0{,}12 \right) \Big/ \left(-\dfrac{7{,}826}{5} + 5 \cdot 0{,}12 \right)}{5 \cdot 1{,}3 + \left(-\dfrac{7{,}826}{5} \cdot 5 \cdot 0{,}12 \right) \Big/ \left(-\dfrac{7{,}826}{5} + 5 \cdot 0{,}12 \right)} = 0{,}848\ Ом.$$

Аналогично получаем суммарное сопротивление сети для 7-й и 11-й гармоник: $Z_7 = 2{,}482\ Ом$, $Z_{11} = 1{,}716\ Ом$.

Значения *n*-й гармонической составляющей напряжения

$U_5 = I_5 Z_5 = 0{,}481 \cdot 0{,}848 = 0{,}408$ кВ, $U_7 = 0{,}851$ кВ,

$U_{11} = 0{,}374$ кВ.

Значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения

$$K_U = \frac{\sqrt{U_5 + U_7 + U_{11}}}{\frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}}} \cdot 100\,\% = \frac{\sqrt{0{,}408^2 + 0{,}851^2 + 0{,}374^2}}{\frac{6}{\sqrt{3}}} \cdot 100\,\% = 29{,}3\ \%$$

$K_{U\,\text{доп}} < K_U \Rightarrow$ совместная работа вентильного преобразователя и нагрузки не допустима.

Несимметрия напряжения. Расчет коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности и оценка его допустимости

Несимметричным режимом работы системы электроснабжения называют такой режим, при котором условия работы одной или всех фаз сети оказываются неодинаковыми. Различают кратковременные и длительные несимметричные режимы. Кратковременная несимметрия обычно связана с аварийными процессами в электрических сетях, такими как КЗ, обрыв проводников с замыканием на землю, отключение фазы при однофазном АПВ. Длительная несимметрия возникает при наличии несимметрии в том или ином элементе электрической сети или при подключении к системе электроснабжения несимметричных приемников электрической энергии. К числу таких приемников относятся осветительные приборы, однофазные установки электросварки, индукционные и дуговые сталеплавильные печи, установки электрошлакового переплава, электровозы переменного тока.

Наличие несимметрии нагрузок фаз вызывает появление токов обратной и нулевой последовательности. Эти токи, протекая по элементам сети, вызывают в них падения напряжения соответственно обратной и нулевой последовательности, которые, складываясь с напряжением прямой последовательности промышленной частоты, приводят к возникновению несимметрии напряжения сети.

Несимметрия напряжения характеризуется следующими показателями:

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

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

Нормально допустимое и предельно допустимое значения коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности в точках общего присоединения к четырехпроводным электрическим сетям с номинальным напряжением 0,38 кВ равны 2,0 и 4,0 % соответственно.

Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100 \ \ \%, \tag{33}$$

где U_2 – действующее значение обратной последовательности напряжения,

$$U_2 = I_{2\text{ЭКВ}} \cdot Z_{2\Sigma} . \tag{34}$$

Здесь $I_{2\text{ЭКВ}}$ – эквивалентный ток обратной последовательности, обусловленный несимметричными нагрузками;

$Z_{2\Sigma}$ – суммарное сопротивление обратной последовательности сети.

При подключении однофазных нагрузок на линейное напряжение ток обратной последовательности и начальная фаза этого тока определяются по соотношениям

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot \sqrt{3 \cdot I_{\text{AB}}^2 + (I_{\text{AB}} - 2I_{\text{BC}})^2} , \tag{35}$$

$$\Psi_2 = arctg \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\text{AB}}}{I_{\text{AB}} - 2 \cdot I_{\text{BC}}} - \varphi_{\text{H}} \tag{36}$$

или через мощности

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{6U_{\text{H}}} \cdot \sqrt{3 \cdot S_{\text{AB}}^2 + (S_{\text{AB}} + -2 \cdot S_{\text{BC}})^2} , \tag{37}$$

$$\Psi_2 = arctg\,\frac{\sqrt{3}\cdot S_{\text{AB}}}{S_{\text{AB}} - 2\cdot S_{\text{BC}}} - \varphi_{\text{H}}\,, \tag{38}$$

где φ_{H} – фазный угол нагрузки.

В общем случае относительное значение сопротивления обратной последовательности по отношению к секции или системе шин

$$Z_{2^*} = \frac{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} S_{\text{H}i}\cdot\cos\varphi_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{n} S_{\text{H}i}\cdot\sin\varphi_i\right)^2}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} S_{\text{H}i}\cdot y_i\cdot\cos\varphi_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{n} S_{\text{H}i}\cdot y_i\cdot\sin\varphi_i\right)^2}}\,, \tag{39}$$

где S_{Hi}, φ_i – номинальная мощность и фазный угол i-го присоединения линейной или нелинейной части нагрузок; y_i – относительное значение полной проводимости i-го присоединения.

$$\arg Z_{2^*} = \text{arctg}\,\frac{\sum_{i=1}^{n} S_{\text{H}i}\cdot y_i\sin\varphi_i}{\sum_{i=1}^{n} S_{\text{H}i}\cdot y_i\cos\varphi_i}\,. \tag{40}$$

Обычно определение коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности проводится по схеме замещения сети с представлением ее элементов в виде проводимостей:

$$y_2 = \frac{1}{Z_2}\,, \tag{41}$$

При этом сопротивления обратной последовательности элементов схем замещения определяются по выражениям

• сопротивление системы

$$X_{2\text{C}} = \frac{U_{\text{H}}^2}{S_{\text{КЗ}}}\,, \tag{42}$$

• сопротивление батареи конденсаторов

$$X_{2\text{БК}} = \frac{U_{\text{H}}^2}{Q_{\text{НББ}}}\,, \tag{43}$$

• сопротивление симметричной нагрузки

$$\overset{*}{Z}_{2\text{Н}} = \overset{*}{Z}_{2\text{Н}*} \cdot \frac{U_{\text{Н}}^2}{\text{S}_{\text{СИМ}}}, \qquad (44)$$

где $\overset{*}{Z}_{2\text{Н}} = (0{,}18 + j0{,}24)$ при $U_{\text{Н}} = 6\ кВ$ и $10\ кВ$; $\overset{*}{Z}_{2\text{Н}} = (0{,}19 + j0{,}36)$ при $U_{\text{Н}} = 35\ кВ$ и $110\ кВ$,

• сопротивление двигателя

$$X_{2\text{ДВ}} = X_{\text{ДВ}*} \cdot \frac{U_{\text{Н}}^2}{S_{\text{ДВ}}}, \qquad (45)$$

где $X_{\text{ДВ}*} \cong \frac{1}{K_{\text{П}}}$;

$K_{П}$ – кратность пускового тока,

• сопротивление преобразователей

$$X_{2\text{ПР}} = 2{,}5 \cdot \frac{U_{\text{Н}}^2}{S_{\text{ПР}}}, \qquad (46)$$

где $S_{\text{ПР}}$ - потребляемая мощность преобразователя.

Пример 4.

К шинам распределительного устройства подключены следующие нагрузки (рис.7): трехфазная симметричная мощностью $S_{\text{СИМ}} = 25\ \text{МВ} \cdot \text{А}$, две однофазные мощностью $S_{\text{АВ}} = 11\ \text{МВ} \cdot \text{А}$ и $S_{\text{ВС}} = 9\ \text{МВ} \cdot \text{А}$, включенные на разные междуфазные напряжения, и батарея статических конденсаторов мощностью $Q_{\text{БСК}} = 10\ \text{Мвар}$. Мощность короткого замыкания на шинах распределительного устройства $S_{\text{КЗ}} = 500\ \text{МВ} \cdot \text{А}$. Требуется определить коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности и оценить его допустимость.

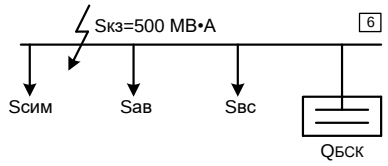


Рис. 7. Схема распределительного устройства

Расчет несимметрии напряжения производится по схеме замещения сети обратной последовательности (рис.8), в которой источник несимметрии (однофазная нагрузка) учитывается током обратной последовательности (I_2), а элементы схемы (симметричная нагрузка, БСК, система) представляются в виде проводимостей обратной последовательности.

Схема замещения сети представлена на рис. 8.

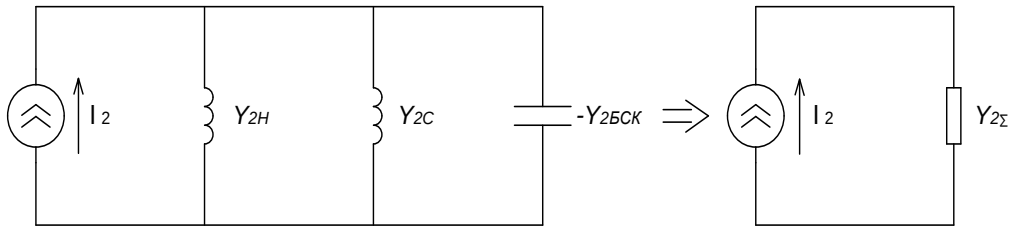


Рис. 8. Схема замещения

Параметры схемы замещения:

$$y_{2C} = \frac{S_{\text{КЗ}}}{U_{\text{Н}}^2} = \frac{500}{6^2} = 13{,}89 \text{ См},$$

$$y_{2\text{Н}} = \frac{1}{Z_{2\text{Н}}^*} \cdot \frac{S_{\text{СИМ}}}{U_{\text{Н}}^2} = \frac{1}{(0{,}18 + j0{,}24)} \cdot \frac{25}{6^2} = 1{,}39 - j1{,}85 \text{ См},$$

$$y_{2\text{БСК}} = -\frac{Q_{\text{НББ}}}{U_{\text{Н}}^2} = -\frac{10}{6^2} = -0{,}27 \text{ См}.$$

Суммарная проводимость обратной последовательности

$$y_{2\Sigma} = y_{2\text{Н}} + y_{2\text{С}} - y_{2\text{БСК}} = (1{,}39 - j1{,}85) + 13{,}89 - 0{,}27 = 15{,}01 - j1{,}85 \text{ См},$$

$$\left| y_{2\Sigma} \right| = 15{,}038 \text{ См}.$$

Мощность однофазной (эквивалентной) нагрузки, включенной на линейные напряжения ($U_{\text{АВ}}$ и $U_{\text{ВС}}$):

$$S_{\text{ОДН}} = \sqrt{3 \cdot S_{\text{АВ}}^2 + (S_{\text{АВ}} - 2 \cdot S_{\text{ВС}})^2} = \sqrt{3 \cdot 11^2 + (11 - 2 \cdot 9)^2} = 20{,}3 \text{ МВ} \cdot \text{А}$$

Ток обратной последовательности однофазной нагрузки определяется по выражению

$$I_2 = \frac{\sqrt{3} \cdot \text{S}_{\text{ОДН}}}{6U_{\text{Н}}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 20{,}3}{6 \cdot 6} = 0{,}976 \text{ кА},$$

Напряжение обратной последовательности

$$U_2 = \frac{I_2}{|y_{2\Sigma}|} = \frac{0{,}976}{15{,}038} = 0{,}0649 \text{ кВ}.$$

Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100\,\% = \frac{0{,}0649}{6} \cdot 100\,\% = 1{,}08 \text{ }\%.$$

Для данной схемы нормально допустимое значение коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности равно $K_{2U\,\text{ДОП}} = 2\%$.

При этом получаем $K_{2U\,\text{ДОП}} > K_{2U}$, следовательно, совместная работа трехфазной и однофазной нагрузок допустима.

ОФОРМЛЕНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Оформление курсовой работы выполняется в строгом соответствии с действующим СТУ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». - М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

2. Сибикин, Ю. Д. Электроснабжение промышленных предприятий и установок [Электронный ресурс] : учебник / Ю. Д. Сибикин, М. Ю. Сибикин, В. А. Яшков. - М.|Берлин : Директ-Медиа, 2014. - 337 с..

3. Аверченков В.И., Федоров В.П., Хейфец М.Л. Основы математического моделирования технических систем [Электронный ресурс] : учебное пособие. - 2-е изд., стереот. - М. : ФЛИНТА, 2011. — 271 с. // Режим доступа — http://biblioclub.ru/

4. Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии [Электронный ресурс]: руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. – Москва: ЭНАС, 2009. – 456 с.

5. Управление качеством электроэнергии [Текст] : учебное пособие : рек. УМО / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов ; под ред. Ю. В. Шарова. – М.: Изд-ий дом МЭИ, 2006. - 355 с.