

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Брянский государственный аграрный университет»

Безик В.А., Никитин А.М.

Качество электрической энергии

Методические указания по выполнению практических работ
для студентов направлений подготовки

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника,
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Брянская область
2018

УДК 621.31 (076)
ББК 31.279
Б 39

Безик, В. А. Качество электрической энергии: методические указания по выполнению практических работ для студентов направлений подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника, 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника / В. А. Безик, А. М. Никитин. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2018. – 47 с.

Методические указания содержат общие методические указания по выполнению практических работ, примеры решения задач и контрольные задания. Предназначены для выполнения практических работ студентами направлений 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника, 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Рецензент: заведующий кафедрой технических систем в агробизнесе, природообустройстве и дорожном строительстве, к.э.н., доцент Гринь А.М.

Рекомендовано к изданию решением методической комиссии института энергетики и природопользования Брянского ГАУ, протокол № 6 от 10.04.2018 года.

© Брянский ГАУ, 2018
© Безик В.А., 2018
© Никитин А.М. 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Теоретические сведения.....	5
1.1 Термины, определения и обозначения.....	5
1.2. Показатели и нормы качества электрической энергии.....	9
2. Расчет показателей качества электрической энергии.....	19
2.1 Расчет отклонений напряжения и оценка их допустимости.....	19
2.2 Оценка допустимости колебаний напряжения.....	21
2.3 Расчет коэффициента искажения синусоидальности кривой напряже- ния и оценка его допустимости.....	25
2.4 Расчет коэффициента несимметрии напряжения по обратной после- довательности и оценка его допустимости.....	31
3. Задачи для самостоятельного решения.....	37
4. Контрольные вопросы.....	45
Литература.....	46

Введение

В современных условиях развития электронных средств управления, использования импульсных методов в электротехнологиях вопросы электромагнитной совместимости приобретают все большее значение. Проектирование и эксплуатация электроустановок и систем электроснабжения не могут обойтись без рассмотрения вопросов электромагнитной совместимости.

Целью методических указаний является приобретение практических навыков по анализу электромагнитной обстановки, расчету показателей качества электрической энергии. Применяется при изучении раздела «Качество электрической энергии» для изучения теоретического материала и выполнения практических работ студентов направлений подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника, 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Методические указания содержат необходимый теоретический материал и расчеты, которые используются при проектировании и эксплуатации электрических сетей различного назначения.

1. Теоретические сведения

1.1 Термины, определения и обозначения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

Система электроснабжения общего назначения: совокупность электроустановок и электрических устройств, предназначенных для обеспечения электрической энергией различных потребителей электрических сетей.

Пользователь электрической сети: сторона, получающая электрическую энергию от электрической сети либо передающая электрическую энергию в электрическую сеть. К пользователям электрических сетей относят сетевые организации и иных владельцев электрических сетей, потребителей электрической энергии, а также генерирующие организации.

Распределительная электрическая сеть: совокупность электроустановок для передачи и распределения электрической энергии между пользователями электрической сети, состоящая из подстанций, распределительных устройств, токопроводов, воздушных и кабельных линий электропередачи, работающих на определенной территории.

Сетевая организация: организация, владеющая на праве собственности или на ином установленном законами основании объектами электросетевого хозяйства, с использованием которых оказывающая услуги по передаче электрической энергии и осуществляющая в установленном порядке технологическое присоединение энергопринимающих устройств (энергетических установок) юридических и физических лиц к электрическим сетям, а также осуществляющая право заключения договоров об оказании услуг по передаче электрической энергии с использованием объектов электросетевого хозяйства, принадлежащих другим собственникам и иным законным владельцам и не входящих в единую национальную электрическую сеть.

Потребитель электрической энергии: юридическое или физическое лицо, осуществляющее пользование электрической энергией (мощностью) на основании заключенного договора.

Точка передачи электрической энергии: точка электрической сети, находящаяся на линии раздела объектов электроэнергетики между владельцами по признаку собственности или владения на ином предусмотренном законами основании, определенная в процессе технологического присоединения.

Точка общего присоединения: электрически ближайшая к конкретной нагрузке пользователя сети точка, к которой присоединены нагрузки других пользователей сети.

Номинальное напряжение: напряжение, для которого предназначена или идентифицирована электрическая сеть, и применительно к которому устанавливают ее рабочие характеристики.

Напряжение электропитания: среднеквадратическое значение напряжения в определенный момент времени в точке передачи электрической энергии пользователю электрической сети, измеряемое в течение установленного интервала времени.

Согласованное напряжение электропитания U_c : напряжение, отличающееся от стандартного номинального напряжения электрической сети по ГОСТ 29322, согласованное для конкретного пользователя электрической сети при технологическом присоединении в качестве напряжения электропитания.

Низкое напряжение: напряжение, номинальное среднеквадратическое значение которого не превышает 1 кВ.

Среднее напряжение: напряжение, номинальное среднеквадратическое значение которого превышает 1 кВ, но не превышает 35 кВ.

Высокое напряжение: напряжение, номинальное среднеквадратическое значение которого превышает 35 кВ, но не превышает 220 кВ.

Частота напряжения электропитания: частота повторения колебаний основной гармоники напряжения электропитания, измеряемая в течение установленного интервала времени.

Номинальная частота: номинальное значение частоты напряжения электропитания.

Кондуктивная электромагнитная помеха: электромагнитная помеха, распространяющаяся по проводникам электрической сети. В некоторых случаях электромагнитная помеха распространяется через обмотки трансформаторов и может действовать в электрических сетях с разными значениями напряжения. Кондуктивные электромагнитные помехи могут ухудшить качество функционирования устройств, электроустановок или систем, или вызвать их повреждение.

Уровень электромагнитной совместимости в системе электроснабжения: регламентированный уровень кондуктивной электромагнитной помехи, используемый в качестве опорного для координации между допустимым уровнем помех, вносимым техническими средствами пользователей электрических сетей, и уровнем помех, воспринимаемым техническими средствами, подключенными к электрической сети, без нарушения их нормального функционирования.

Напряжение гармонической составляющей: среднеквадратическое значение синусоидального напряжения, частота которого является кратной основной частоте напряжения электропитания.

Напряжение интергармонической составляющей: среднеквадратическое значение синусоидального напряжения, частота которого не является кратной основной частоте напряжения электропитания.

Примечание. Одновременно возникающие интергармонические составляющие на сближенных частотах могут образовать напряжение с широкополосным спектром.

Напряжение сигналов в электрической сети: напряжение сигналов, добавляемое к напряжению электропитания при передаче информации в распределительных электрических сетях и электроустановках потребителей электрической энергии.

Быстрое изменение напряжения: быстрое изменение среднеквадратического значения напряжения между двумя последовательными уровнями установившегося напряжения.

Примечание. См. также ГОСТ 30804.3.3.

Опорное напряжение (при оценке провалов, прерываний напряжения и перенапряжений): значение напряжения, применяемое в качестве основы при установлении остаточного напряжения, пороговых значений напряжения и других характеристик провалов, прерываний напряжения и перенапряжений, выраженное в вольтах или в процентах номинального напряжения.

Примечание. В соответствии с требованиями настоящего стандарта опорное напряжение (при оценке провалов, прерываний напряжения и перенапряжений) считают равным номинальному или согласованному напряжению электропитания.

Прерывание напряжения: ситуация, при которой напряжение в точке передачи электрической энергии меньше 5% опорного напряжения.

Импульсное напряжение: перенапряжение, представляющее собой одиночный импульс или колебательный процесс (обычно сильно демпфированный), длительностью до нескольких миллисекунд.

Провал напряжения: временное уменьшение напряжения в конкретной точке электрической системы ниже установленного порогового значения.

Длительность провала напряжения: интервал времени между моментом, когда напряжение в конкретной точке системы электроснабжения падает ниже порогового значения начала провала напряжения, и моментом, когда напряжение возрастает выше порогового значения окончания провала напряжения.

Пороговое значение окончания провала напряжения: среднеквадратическое значение напряжения в системе электроснабжения, установленное для определения окончания провала напряжения.

Остаточное напряжение провала напряжения: минимальное среднеквадратическое значение напряжения, отмеченное в течение провала напряжения.

Примечание. В соответствии с требованиями настоящего стандарта остаточное напряжение провала напряжения выражают в процентах опорного напряжения.

Пороговое значение начала провала напряжения: среднеквадратическое значение напряжения в системе электроснабжения, установленное для определения начала провала напряжения.

Перенапряжение: временное возрастание напряжения в конкретной точке электрической системы выше установленного порогового значения.

Длительность перенапряжения: интервал времени между моментом, когда напряжение в конкретной точке системы электроснабжения возрастает выше порогового значения начала перенапряжения, и моментом, когда напряжение падает ниже порогового значения окончания перенапряжения.

Пороговое значение окончания перенапряжения: среднеквадратическое значение напряжения в системе электроснабжения, установленное для определения окончания перенапряжения.

Пороговое значение начала перенапряжения: среднеквадратическое значение напряжения в системе электроснабжения, установленное для определения начала перенапряжения.

Фликер: ощущение неустойчивости зрительного восприятия, вызванное световым источником, яркость или спектральный состав которого изменяются во времени.

Среднеквадратическое значение: корень квадратный из среднеарифметического значения квадратов мгновенных значений величины, измеренных в течение установленного интервала времени и в установленной полосе частот.

Усреднение по времени: усреднение нескольких последовательных значений конкретного показателя КЭ, измеренных на одинаковых интервалах времени, для получения значения показателя при большем интервале времени.

Примечание. В ГОСТ 30804.4.30 применен термин "объединение по времени".

Маркированные данные: термин, применяемый для обозначения результатов измерений показателей КЭ и результатов их усреднения на временных интервалах, в пределах которых имели место прерывания, провалы напряжения или перенапряжения.

Примечания

1. При оценке соответствия электрической энергии нормам КЭ, установленным в настоящем стандарте, маркированные данные не учитывают.

2. В ряде случаев сведения о маркировании результатов измерений показателей КЭ могут учитываться при анализе качества электрической энергии (см. ГОСТ 30804.4.30).

Качество электрической энергии (КЭ): степень соответствия характеристик электрической энергии в данной точке электрической системы совокупности нормированных показателей КЭ.

Несимметрия напряжений: состояние трехфазной системы энергоснабжения переменного тока, в которой среднеквадратические значения основных составляющих междуфазных напряжений или углы сдвига фаз между основными составляющими междуфазных напряжений не равны между собой.

1.2. Показатели и нормы качества электрической энергии

Изменения характеристик напряжения электропитания в точке передачи электрической энергии пользователю электрической сети, относящихся к частоте, значениям, форме напряжения и симметрии напряжений в трехфазных системах электроснабжения, подразделяют на две категории - продолжительные изменения характеристик напряжения и случайные события.

Продолжительные изменения характеристик напряжения электропитания представляют собой длительные отклонения характеристик напряжения от номинальных значений и обусловлены в основном изменениями нагрузки или влиянием нелинейных нагрузок.

Случайные события представляют собой внезапные и значительные изменения формы напряжения, приводящие к отклонению его параметров от номинальных. Данные изменения напряжения, как правило, вызываются непредсказуемыми событиями (например, повреждениями оборудования пользователя электрической сети) или внешними воздействиями (например, погодными условиями или действиями стороны, не являющейся пользователем электрической сети).

Применительно к продолжительным изменениям характеристик напряжения электропитания, относящихся к частоте, значениям, форме напряжения и симметрии напряжений в трехфазных системах, в настоящем стандарте установлены показатели и нормы КЭ.

Для случайных событий в настоящем стандарте приведены справочные данные (см. Приложения А, Б).

Отклонение частоты

Показателем КЭ, относящимся к частоте, является отклонение значения основной частоты напряжения электропитания от номинального значения Δf , Гц

$$\Delta f = f_m - f_{\text{ном}}, \quad (1.1)$$

где f_m - значение основной частоты напряжения электропитания, Гц, измеренное в интервале времени 10 с в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.30, подраздел 5.1;

$f_{\text{ном}}$ - номинальное значение частоты напряжения электропитания, Гц.

Номинальное значение частоты напряжения электропитания в электрической сети равно 50 Гц.

Для указанного показателя КЭ установлены следующие нормы:

- отклонение частоты в синхронизированных системах электроснабжения не должно превышать +/- 0,2 Гц в течение 95% времени интервала в одну неделю и +/- 0,4 Гц в течение 100% времени интервала в одну неделю;

- отклонение частоты в изолированных системах электроснабжения с автономными генераторными установками, не подключенных к синхронизированным системам передачи электрической энергии, не должно превышать +/- 1 Гц в течение 95% времени интервала в одну неделю и +/- 5 Гц в течение 100% времени интервала в одну неделю.

При оценке соответствия электрической энергии нормам КЭ, относящимся к частоте, установленным в настоящем стандарте, должны быть проведены измерения по ГОСТ 30804.4.30, класс А, при этом маркированные данные не учитываются.

Медленные изменения напряжения

Медленные изменения напряжения электропитания (как правило, продолжительностью более 1 мин) обусловлены обычно изменениями нагрузки электрической сети.

Показателями КЭ, относящимися к медленным изменениям напряжения электропитания, являются отрицательное $\delta U_{(-)}$ и положительное $\delta U_{(+)}$ отклонения напряжения электропитания в точке передачи электрической энергии от номинального/согласованного значения, %:

$$\delta U_{(-)} = \left[\frac{(U_0 - U_{m(-)})}{U_0} \right] \cdot 100; \quad (1.2)$$

$$\delta U_{(+)} = \left[\frac{(U_{m(+)} - U_0)}{U_0} \right] \cdot 100, \quad (1.3)$$

где $U_{m(-)}$, $U_{m(+)}$ - значения напряжения электропитания, меньшие U_0 и большие U_0 соответственно, усредненные в интервале времени 10 мин в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.30, подраздел 5.12;

U_0 - напряжение, равное стандартному номинальному напряжению $U_{\text{ном}}$ или согласованному напряжению U_c .

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

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

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

Примечание. Установленные нормы медленных изменений напряжения электропитания относятся к 1008 интервалам времени измерений по 10 минут каждый.

Допустимые значения положительного и отрицательного отклонений напряжения в точках общего присоединения должны быть установлены сетевой организацией с учетом необходимости выполнения норм настоящего стандарта в точках передачи электрической энергии.

В электрической сети потребителя должны быть обеспечены условия, при которых отклонения напряжения питания на зажимах электроприемников не превышают установленных для них допустимых значений при выполнении требований настоящего стандарта к КЭ в точке передачи электрической энергии.

При оценке соответствия электрической энергии нормам КЭ, относящимся к медленным изменениям напряжения, установленным в настоящем стандарте, должны быть проведены измерения по ГОСТ 30804.4.30, подраздел 5.12, класс А, при этом маркированные данные не учитываются.

Колебания напряжения и фликер

Колебания напряжения электропитания (как правило, продолжительностью менее 1 мин), в том числе одиночные быстрые изменения напряжения, обуславливают возникновение фликера.

Показателями КЭ, относящимися к колебаниям напряжения, являются кратковременная доза фликера P_{st} , измеренная в интервале времени 10 мин, и длительная доза фликера P_{lt} , измеренная в интервале времени 2 ч, в точке передачи электрической энергии.

Для указанных показателей КЭ установлены следующие нормы:

кратковременная доза фликера P_{st} не должна превышать значения 1,38,

длительная доза фликера P_{lt} не должна превышать значения 1,0

в течение 100% времени интервала в одну неделю.

При оценке соответствия электрической энергии нормам КЭ, относящимся к колебаниям напряжения, установленным в настоящем стандарте, должны быть проведены измерения по [1], при этом маркированные данные не учитывают.

Одиночные быстрые изменения напряжения

Одиночные быстрые изменения напряжения вызываются в основном резкими изменениями нагрузки в электроустановках потребителей, переключениями в системе либо неисправностями и характеризуются быстрым переходом среднеквадратического значения напряжения от одного установившегося значения к другому.

Обычно одиночные быстрые изменения напряжения не превышают 5% в электрических сетях низкого напряжения и 4% - в электрических сетях среднего напряжения, но иногда изменения напряжения с малой продолжительностью до 10% U_{nom} и до 6% U_c соответственно могут происходить несколько раз в день.

Если напряжение во время изменения пересекает пороговое значение начала провала напряжения или перенапряжения, одиночное быстрое изменение напряжения классифицируют как провал напряжения или перенапряжение.

Несинусоидальность напряжения.

Гармонические составляющие напряжения

Гармонические составляющие напряжения обусловлены, как правило, нелинейными нагрузками пользователей электрических сетей, подключаемыми к электрическим сетям различного напряжения. Гармонические токи, протекающие в электрических сетях, создают падения напряжений на полных сопротивлениях электрических сетей. Гармонические токи, полные сопротивления элек-

трических сетей и, следовательно, напряжения гармонических составляющих в точках передачи электрической энергии изменяются во времени.

Показателями КЭ, относящимися к гармоническим составляющим напряжения являются:

- значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка $K_{U^{(n)}}$ в процентах напряжения основной гармонической составляющей U_1 в точке передачи электрической энергии;

- значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (отношения среднеквадратического значения суммы всех гармонических составляющих до 40-го порядка к среднеквадратическому значению основной составляющей) K_U , % в точке передачи электрической энергии.

Для указанных показателей КЭ установлены следующие нормы:

а) значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U^{(n)}}$, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать значений, установленных в таблицах 1 - 3, в течение 95% времени интервала в одну неделю;

б) значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U^{(n)}}$, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать значений, установленных в таблицах 1 - 3, увеличенных в 1,5 раза, в течение 100% времени каждого периода в одну неделю;

в) значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U , усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать значений, установленных в таблице 4, в течение 95% времени интервала в одну неделю;

г) значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U , усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать значений, установленных в таблице 5, в течение 100% времени интервала в одну неделю.

Измерения напряжения гармонических составляющих U_n должны быть проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.7, класс I, в интервалах времени 10 периодов без промежутков между интервалами с последующим усреднением в интервале времени 10 мин. В качестве результатов измерений в интервалах времени 10 периодов должны быть применены гармонические подгруппы по ГОСТ 30804.4.7, подраздел 3.2.

Таблица 1.1

Значения коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения,
не кратных трем $K_{U(n)}$

Порядок гармонической составляющей n	Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$, % U_1			
	Напряжение электрической сети, кВ			
	0,38	6 - 25	35	110 - 220
5	6	4	3	1,5
7	5	3	2,5	1
11	3,5	2	2	1
13	3,0	2	1,5	0,7
17	2,0	1,5	1	0,5
19	1,5	1	1	0,4
23	1,5	1	1	0,4
25	1,5	1	1	0,4
> 25	1,5	1	1	0,4

Таблица 1.2

Значения коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения,
кратных трем $K_{U(n)}$

Порядок гармонической составляющей n	Значения коэффициентов напряжения гармонических составляющих $K_{U(n)}$, % U_1			
	Напряжение электрической сети, кВ			
	0,38	6 - 25	35	110 - 220
3	5	3	3	1,5
9	1,5	1	1	0,4
15	0,3	0,3	0,3	0,2
21	0,2	0,2	0,2	0,2
> 21	0,2	0,2	0,2	0,2

Таблица 1.3

Значения коэффициентов напряжения четных гармонических составляющих

$$K_{U(n)}$$

Порядок гармонической составляющей n	Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$, % U_1			
	Напряжение электрической сети, кВ			
	0,38	6 - 25	35	110 - 220
2	2	1,5	1	0,5
4	1	0,7	0,5	0,3
6	0,5	0,3	0,3	0,2
8	0,5	0,3	0,3	0,2
10	0,5	0,3	0,3	0,2
12	0,2	0,2	0,2	0,2
> 12	0,2	0,2	0,2	0,2

Таблица 1.4

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения

$$K_U$$

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U , %			
Напряжение электрической сети, кВ			
0,38	6 - 25	35	110 - 220
8,0	5,0	4,0	2,0

Таблица 1.5

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения

$$K_U$$

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U , %			
Напряжение электрической сети, кВ			
0,38	6 - 25	35	110 - 220
12,0	8,0	6,0	3,0

В качестве суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U должны быть применены суммарные коэффициенты гармонических подгрупп по ГОСТ 30804.4.7, подраздел 3.3.

При оценке соответствия электрической энергии нормам КЭ, относящимся к гармоническим составляющим напряжения, установленным в настоящем стандарте, маркированные данные не учитывают.

Интергармонические составляющие напряжения

Уровень интергармонических составляющих напряжения электропитания увеличивается в связи с применением в электроустановках частотных преобразователей и другого управляющего оборудования.

Допустимые уровни интергармонических составляющих напряжения электропитания находятся на рассмотрении.

Несимметрия напряжений в трехфазных системах

Несимметрия трехфазной системы напряжений обусловлена несимметричными нагрузками потребителей электрической энергии или несимметрией элементов электрической сети.

Показателями КЭ, относящимися к несимметрии напряжений в трехфазных системах, являются коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} .

Для указанных показателей КЭ установлены следующие нормы:

- значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 2% в течение 95% времени интервала в одну неделю;

- значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 4% в течение 100% времени интервала в одну неделю.

При оценке соответствия электрической энергии нормам КЭ, относящимся к несимметрии напряжений, установленным в настоящем стандарте, должны быть проведены измерения по ГОСТ 30804.4.30, подраздел 5.7, класс А, при этом маркированные данные не учитывают.

Напряжения сигналов, передаваемых по электрическим сетям

Допустимые уровни напряжения сигналов, передаваемых по электрическим сетям, и методы оценки соответствия требованиям находятся на рассмотрении.

Случайные события. Прерывания напряжения

Прерывания напряжения относят к создаваемым преднамеренно, если пользователь электрической сети информирован о предстоящем прерывании напряжения, и к случайным, вызываемым длительными или кратковременными неисправностями, обусловленными в основном внешними воздействиями, отказами оборудования или влиянием электромагнитных помех.

Создаваемые преднамеренно прерывания напряжения, как правило, обусловлены проведением запланированных работ в электрических сетях.

Случайные прерывания напряжения подразделяют на длительные (длительность более 3 мин) и кратковременные (длительность не более 3 мин).

Ежегодная частота длительных прерываний напряжения (длительностью более 3 мин) в значительной степени зависит от особенностей системы электропитания (в первую очередь, применения кабельных или воздушных линий) и климатических условий. Кратковременные прерывания напряжения наиболее вероятны при их длительности менее нескольких секунд.

В трехфазных системах электропитания к прерываниям напряжения относят ситуацию, при которой напряжение меньше 5% опорного напряжения во всех фазах. Если напряжение меньше 5% опорного напряжения не во всех фазах, ситуацию рассматривают, как провал напряжения.

Пороговое значение начала прерывания считают равным 5% опорного напряжения.

Провалы напряжения и перенапряжения. Провалы напряжения

Провалы напряжения обычно происходят из-за неисправностей в электрических сетях или в электроустановках потребителей, а также при подключении мощной нагрузки.

Провал напряжения, как правило, связан с возникновением и окончанием короткого замыкания или иного резкого возрастания тока в системе или электроустановке, подключенной к электрической сети. В соответствии с требованиями настоящего стандарта провал напряжения рассматривается как электромагнитная помеха, интенсивность которой определяется как напряжением, так и длительностью. Длительность провала напряжения может быть до 1 мин.

В трехфазных системах электропитания за начало провала напряжения принимают момент, когда напряжение хотя бы в одной из фаз падает ниже порогового значения начала провала напряжения, за окончание провала напряжения

принимают момент, когда напряжение во всех фазах возрастает выше порогового значения окончания провала напряжения.

Перенапряжения

Перенапряжения, как правило, вызываются переключениями и отключениями нагрузки. Перенапряжения могут возникать между фазными проводниками или между фазными и защитным проводниками. В зависимости от устройства заземления короткие замыкания на землю могут также приводить к возникновению перенапряжения между фазными и нейтральным проводниками. В соответствии с требованиями настоящего стандарта перенапряжение рассматривается как электромагнитная помеха, интенсивность которой определяется как напряжением, так и длительностью. Длительность перенапряжения может быть до 1 мин.

Определение и оценка провалов напряжения и перенапряжений

Оба явления - провалы и перенапряжения - непредсказуемы и в значительной степени случайны. Частота возникновения их зависит от типа системы электроснабжения, точки наблюдения, времени года.

Импульсные напряжения

Импульсные напряжения в точке передачи электрической энергии пользователю электрической сети вызываются в основном молниевыми разрядами или процессами коммутации в электрической сети или электроустановке потребителя электрической энергии. Время нарастания импульсных напряжений может изменяться в широких пределах (от значений менее 1 микросекунды до нескольких миллисекунд).

Импульсные напряжения, вызванные молниевыми разрядами в основном имеют большие амплитуды, но меньшие значения энергии, чем импульсные напряжения, вызванные коммутационными процессами, характеризующимися, как правило, большей длительностью.

2. Расчет показателей качества электрической энергии

2.1 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

$$\delta U_y = \frac{U - U_{\text{НСЕТИ}}}{U_{\text{НСЕТИ}}} \cdot 100 \quad \%, \quad (2.1)$$

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 (Рисунок 3.1), сравнить его с допустимым по ГОСТ. Если необходимо, разработать мероприятия, обеспечивающие требуемый уровень напряжения. Напряжение на зажимах СП1 принять 385 В.

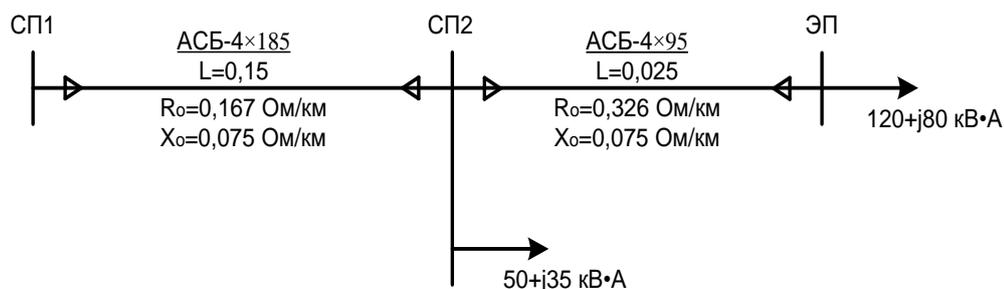


Рисунок 2.1 Расчетная схема

Потеря напряжения определяется по соотношению

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U_{\text{НОМ}}}, \quad (2.2)$$

где $R = R_0 L$, $X = X_0 L$.

Потеря напряжения

на участке СП1-СП2

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

на участке СП2-ЭП

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

Тогда потеря напряжения на участке СП1-ЭП

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

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 (2.1)

$$\delta U_{\text{У}} = \frac{367,07 - 380}{380} \cdot 100\% = -3,4\%.$$

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

2.2 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 $F_{\delta U_t}$ или интервала между изменениями напряжения $\Delta t_{i,i+1}$ равны значениям, определяемым по кривой 1 Рисунок 2.2, где представлены предельно допустимые размахи изменений напряжения в зависимости от частоты повторения изменений напряжения за минуту.

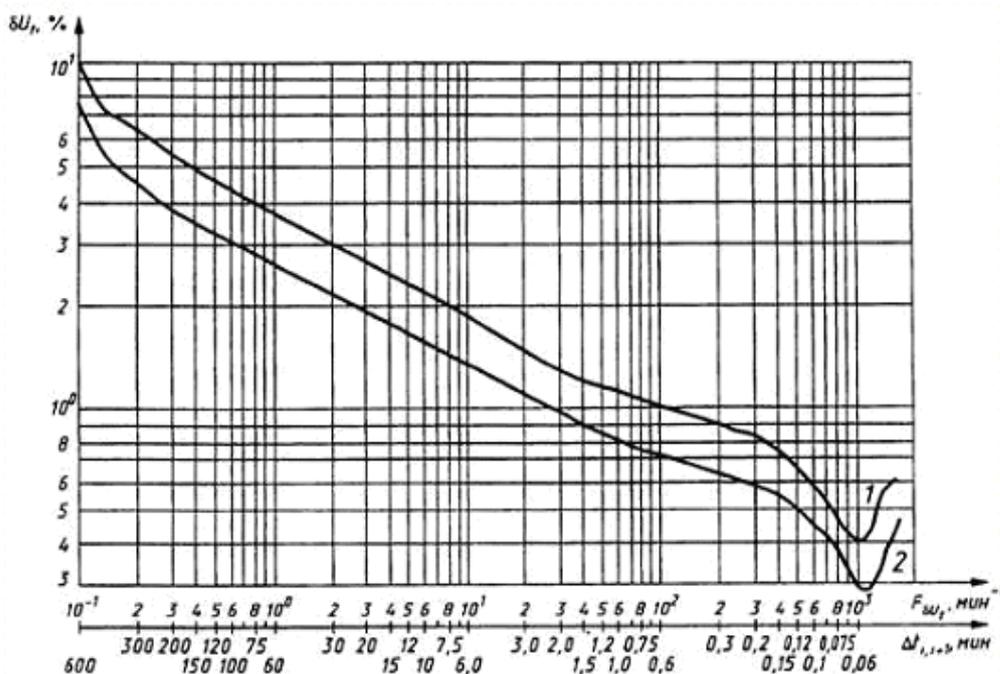


Рисунок 2.2 Предельно допустимые размахи изменений напряжения в зависимости от частоты повторения изменений напряжения за минуту

$$F_{\delta U_t} = \frac{m}{T}, \quad (2.3)$$

$$\Delta t_{i,i+1} = t_{i+1} + t_i, \quad (2.4)$$

где m – число изменений напряжения за время измерения T ;

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

Предельно допустимое значение размаха изменения напряжения δU_t в точках присоединения к электрическим сетям напряжением 0,38 кВ равно $\pm 10\%$ от номинального напряжения.

Качество электроэнергии в точках общего присоединения при периодических колебаниях соответствует стандарту, если все измеренные или рассчитанные значения размахов $\delta U_{i,\%}$ меньше или равны допустимому размаху изменения напряжения $\delta U_{t\text{доп}}$, определенного по рисунку 2.2, т.е.

$$\delta U_{t\text{доп}} \geq \delta U_t. \quad (2.5)$$

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

$$\delta U_t = \frac{\Delta P \cdot r + \Delta Q \cdot x}{U}, \quad (2.6)$$

где ΔP , ΔQ – 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 $\frac{\Delta P \cdot r}{U} \ll \frac{\Delta Q \cdot r}{U}$, 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

$$\delta U_t = \frac{\Delta Q}{S_{\text{КЗ}}} \cdot 100 \quad \%, \quad (2.7)$$

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

Для дуговых сталеплавильных печей размахи изменения напряжения определяются по соотношению

– для одной печи

$$\delta U_t = \frac{S_{\text{П.Т.}}}{S_{\text{КЗ}}} \cdot 100 \quad \%, \quad (2.8)$$

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

– для нескольких печей одинаковой мощности

$$\delta U_t = \frac{S_{\text{П.Т.}}}{S_{\text{КЗ}}} \cdot \sqrt[4]{N} \cdot 100 \quad \%, \quad (2.9)$$

где N – количество печей одинаковой мощности;

– для нескольких печей разной мощности

$$\delta U_t = \frac{S_{\text{П.Т.МАКС}}}{S_{\text{К}}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\sum_{i=1}^N S_{\text{П.Т.}i}}{S_{\text{П.Т.МАКС}}}} \cdot 100 \quad \%, \quad (2.10)$$

При схеме включения печи (Рисунок 2.3) размах изменения напряжения на шинах ВН определяется по выражению (2.10).

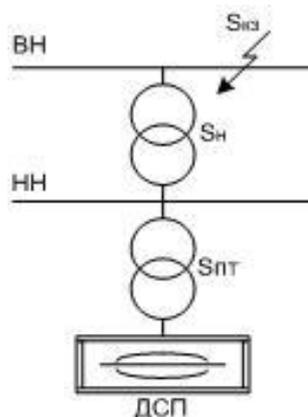


Рисунок 2.3 Схема включения печи

$$\delta U_t = \frac{S_{\text{П.Т.}}}{S_{\text{К}}} \cdot \left(1 + \frac{S_{\text{КЗ}}}{S_{\text{ТНОМ}}} \cdot \frac{U_{\text{К}}}{100} \right) \cdot 100 \quad \%, \quad (2.11)$$

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

$$\sum_{i=1}^n \Delta t_{\text{Ди}} \leq T, \quad (2.12)$$

где T – общее время наблюдения размаха; $\Delta t_{\text{Ди}}$ – 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 рисунке 2.4).

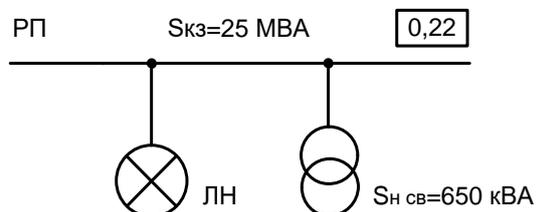


Рисунок 2.4 схема РП

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

Расчетный размах изменения напряжения

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

Частота колебаний напряжения равна

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

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

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

2.3 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

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_n U_n^2}}{U_1} \cdot 100 \quad \%, \quad (2.13)$$

где $U_1 = \frac{U_H}{\sqrt{3}}$ – фазное номинальное напряжение сети (напряжение первой

гармоники при $f = 50 \text{ Гц}$); 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

$$n = k \cdot m \pm 1, \quad (2.14)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$ - 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 2.1

Значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения

Нормально допустимое				Предельное допустимое			
0,38	6-20	35	110-	0,38	6-20	35	110-
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 ток 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 –

$$X_{T(n)} = n \cdot \frac{U_{K\%}}{100} \cdot \frac{U_{\text{H}}^2}{S_{\text{HT}}}, \quad (2.15)$$

- сопротивление двигателя –

$$X_{\text{ДВ}(n)} = n \cdot X_{\text{ДВ}}, \quad (2.16)$$

- сопротивление системы –

$$X_{C(n)} = n \cdot \frac{U_{\text{H}}^2}{S_{\text{К}}}, \quad (2.17)$$

- сопротивление реактора –

$$X_{P(n)} = n \cdot X_P, \quad (2.18)$$

- сопротивление батареи конденсаторов –

$$X_{БК(n)} = -\frac{U_H^2}{n \cdot Q_{НББ}}, \quad (2.19)$$

- сопротивление нагрузки –

$$Z_{H(n)}^* = (0,18 + j0,24 \cdot n) \cdot \frac{U_H^2}{S_H}, \quad (2.20)$$

- сопротивление ЛЭП –

$$Z_{H(n)}^* = (r_0 + jn \cdot x_0) \cdot l. \quad (2.21)$$

Напряжение n - й гармоники

$$U_n = I_{(n)} \cdot X_{(n)}, \quad (2.22)$$

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

$$I_{(n)} = \frac{I_{П.Т.}}{n}, \quad (2.23)$$

где $I_{П.Т.}$ – номинальный ток печного трансформатора; n – номер гармоники;
– для группы печей одинаковой мощности

$$I_{(n)гр} = I_{(n)} \cdot \sqrt[n]{N}, \quad (2.24)$$

где N – количество печей одинаковой мощности;
– для группы печей разной мощности

$$I_{(n)гр} = I_{(n)МАКС} \cdot \sqrt[4]{\frac{\sum_{i=1}^N S_{П.Т.i}}{S_{П.Т.МАКС}}}, \quad (2.25)$$

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

– для одной сварочной установки

$$I_{(n)} = \frac{S_T \cdot K_3 \cdot \sqrt{ПВ*}}{n^2 \cdot U_{НОМ}}, \quad (2.26)$$

где S_T – мощность сварочного трансформатора; K_3 – коэффициент загрузки трансформатора; n – номер гармоники.

– для группы сварочных установок

$$I_{(n)гр} = \sqrt{\sum_{i=1}^N I_{(n)i}^2}, \quad (2.27)$$

где N – число сварочных установок; $I_{(n)i}$ – 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

$$I_{(n)} = \frac{I_{СВ}}{n^2}, \quad (2.28)$$

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

Для группы сварочных установок

$$I_{(n)гр} = \sqrt{\sum_{i=1}^N I_{(n)i}^2}, \quad (2.29)$$

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:

$$I_{(\text{ЭКВ})\text{БК}} \leq I_{\text{ДОП.БК}}, \quad (2.30)$$

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

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

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

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

$$nX_{\Sigma(L)} = \frac{X_{\Sigma(C)}}{n}, \quad (2.31)$$

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

Пример 3.

Оценить возможность совместной работы шестифазного вентильного преобразователя и нагрузки (Рисунок 2.5).

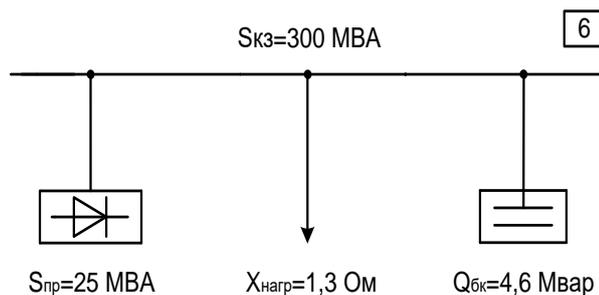


Рисунок 2.5 Схема соединения шестифазного вентильного преобразователя и нагрузки

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 рисунке 2.6.

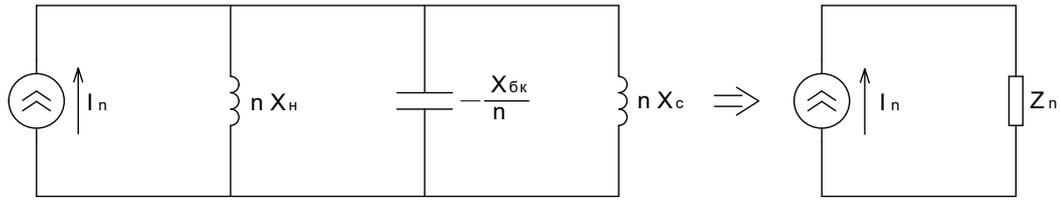


Рисунок 2.6 Схема замещения сети

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

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

$$X_C = U_H^2 / S_{КЗ} = 6^2 / 300 = 0,12 \text{ Ом}.$$

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

$$I_n = \frac{S_{пр}}{\sqrt{3}U_H n}, \quad (2.32)$$

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

Суммарное сопротивление сети для 5-й гармоники

$$Z_5 = \frac{5X_H \cdot \left(-\frac{X_{БК}}{5} \cdot 5X_C \right) / \left(-\frac{X_{БК}}{5} + 5X_C \right)}{5X_H + \left(-\frac{X_{БК}}{5} \cdot 5X_C \right) / \left(-\frac{X_{БК}}{5} + 5X_C \right)};$$

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

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

Значения n -й гармонической составляющей напряжения

$$U_5 = I_5 Z_5 = 0,481 \cdot 0,848 = 0,408 \text{ кВ}, \quad U_7 = 0,851 \text{ кВ}, \quad U_{11} = 0,374 \text{ кВ}.$$

Значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения

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

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

2.4 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

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100\% , \quad (2.33)$$

где U_2 – действующее значение обратной последовательности напряжения,

$$U_2 = I_{2\text{ЭКВ}} \cdot Z_{2\Sigma} . \quad (2.34)$$

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

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot \sqrt{3 \cdot I_{\text{AB}}^2 + (I_{\text{AB}} - 2I_{\text{BC}})^2} , \quad (2.35)$$

$$\Psi_2 = \arctg \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\text{AB}}}{I_{\text{AB}} - 2 \cdot I_{\text{BC}}} - \varphi_{\text{H}} \quad (2.36)$$

или через мощности

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{6U_{\text{H}}} \cdot \sqrt{3 \cdot S_{\text{AB}}^2 + (S_{\text{AB}} + -2 \cdot S_{\text{BC}})^2} , \quad (2.37)$$

$$\Psi_2 = \arctg \frac{\sqrt{3} \cdot S_{\text{AB}}}{S_{\text{AB}} - 2 \cdot S_{\text{BC}}} - \varphi_{\text{H}} , \quad (2.38)$$

где φ_{H} – фазный угол нагрузки.

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

$$Z_{2*} = \frac{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n S_{Hi} \cdot \cos \varphi_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n S_{Hi} \cdot \sin \varphi_i\right)^2}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n S_{Hi} \cdot y_i \cdot \cos \varphi_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n S_{Hi} \cdot y_i \cdot \sin \varphi_i\right)^2}}, \quad (2.39)$$

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.

$$\arg Z_{2*} = \arctg \frac{\sum_{i=1}^n S_{Hi} \cdot y_i \sin \varphi_i}{\sum_{i=1}^n S_{Hi} \cdot y_i \cos \varphi_i}. \quad (2.40)$$

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

$$y_2 = \frac{1}{Z_2}, \quad (2.41)$$

При этом сопротивления обратной последовательности элементов схем замещения определяются по выражениям

- сопротивление системы –

$$X_{2C} = \frac{U_H^2}{S_{КЗ}}, \quad (2.42)$$

- сопротивление батареи конденсаторов –

$$X_{2БК} = \frac{U_H^2}{Q_{НББ}}, \quad (2.43)$$

- сопротивление симметричной нагрузки –

$$Z_{2Н}^* = Z_{2Н}^* \cdot \frac{U_{Н}^2}{S_{СИМ}}, \quad (2.44)$$

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

• сопротивление двигателя –

$$X_{2ДВ} = X_{ДВ}^* \cdot \frac{U_{Н}^2}{S_{ДВ}}, \quad (2.45)$$

где $X_{ДВ}^* \cong \frac{1}{K_{П}}$;

$K_{П}$ – кратность пускового тока,
сопротивление преобразователей –

$$X_{2ПР} = 2,5 \cdot \frac{U_{Н}^2}{S_{ПР}}, \quad (2.46)$$

где $S_{ПР}$ – потребляемая мощность преобразователя.

Пример 4.

К шинам распределительного устройства подключены следующие нагрузки (рисунок 2.7): трехфазная симметричная мощностью $S_{СИМ} = 25 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, две однофазные мощностью $S_{АВ} = 11 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ и $S_{ВС} = 9 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, включенные на разные междуфазные напряжения, и батарея статических конденсаторов мощностью $Q_{БСК} = 10 \text{ Мвар}$. Мощность короткого замыкания на шинах распределительного устройства $S_{КЗ} = 500 \text{ МВ} \cdot \text{А}$. Требуется определить коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности и оценить его допустимость.

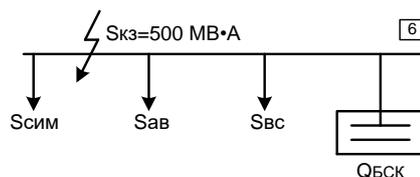


Рисунок 2.7 Схема распределительного устройства

Расчет несимметрии напряжения производится по схеме замещения сети обратной последовательности (рисунок 2.8), 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 рисунке 2.8.

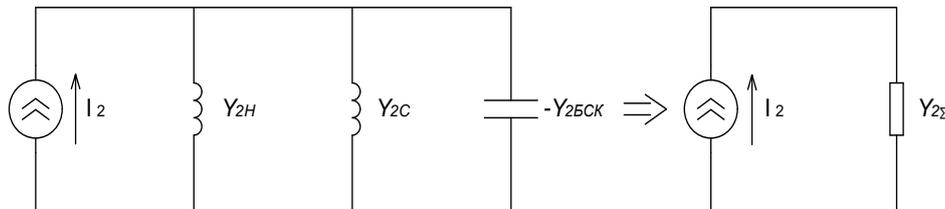


Рисунок 2.8 Схема замещения сети обратной последовательности

Параметры схемы замещения:

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

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

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

Суммарная проводимость обратной последовательности

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

$$|y_{2\Sigma}| = 15,038 \text{ См}$$

Мощность однофазной (эквивалентной) нагрузки, включенной на линейные напряжения (U_{AB} и U_{BC}):

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

Ток обратной последовательности однофазной нагрузки определяется по выражению

$$I_2 = \frac{\sqrt{3} \cdot S_{\text{ОДН}}}{6U_{\text{H}}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 20,3}{6 \cdot 6} = 0,976 \text{ кА} ,$$

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.

3. Задачи для самостоятельного решения

Задача 1

К шинам 10 кВ подстанции подключены следующие нагрузки: трехфазная $S_H=55 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; однофазная $S_{AB}=14,5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; однофазная $S_{AC}= 8,5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$. Определить коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности (мощность КЗ на шинах 10 кВ $S_{K3} = 320 \text{ МВ} \cdot \text{А}$). Оценить допустимость подключения к этим шинам батареи конденсаторов мощностью $Q_{КУ} = 20 \text{ Мвар}$.

Задача 2

Для схемы, представленной на рисунке 3.1, определить коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности на шинах 10 кВ и сопоставить его с допустимым значением.

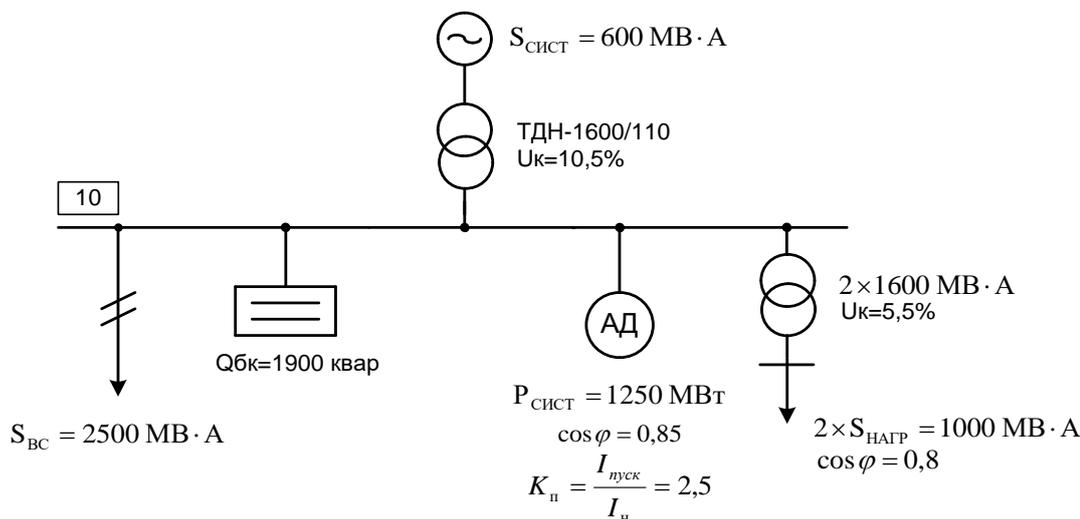


Рисунок 3.1 Расчетная схема

Задача 3

Для схемы на рисунке 3.2 оценить допустимость несимметрии.

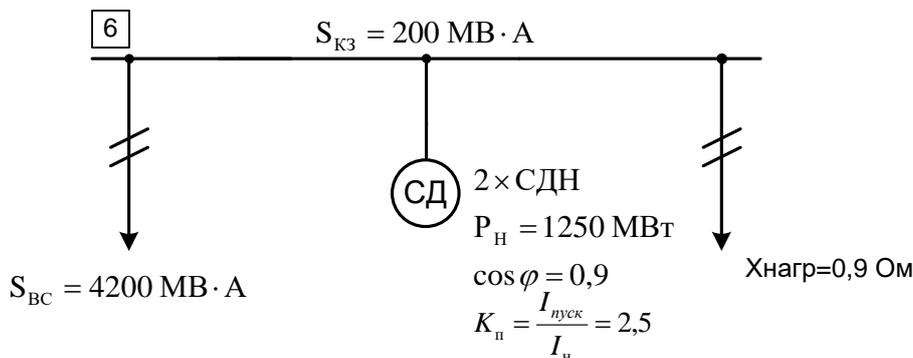


Рисунок 3.2 Расчетная схема

Задача 4

Оценить допустимость колебаний напряжения на шинах 6 кВ подстанции (рисунок 2.11), к которой подключена резнопеременная нагрузка (рисунок 3.3). Количество циклов колебаний за 10 мин составляет $n=50$.

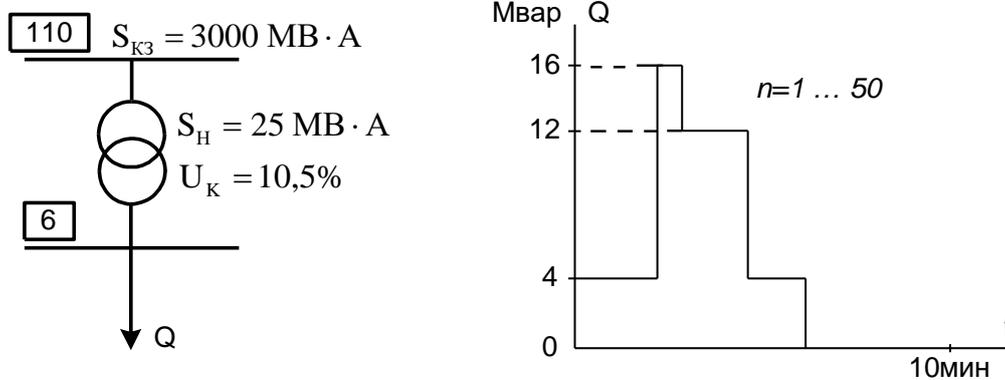


Рисунок 3.3 Схема подстанции Рисунок 2.12 Колебаний напряжения 6 кВ

Задача 5

К РП-10 кВ термического цеха подключается однофазная печь сопротивления с мощностью $P_{BC} = 2500$ кВт. К этим же шинам 10 кВ подключены: трехфазная нагрузка $P_{НАГР} = 5000$ кВт, $Q_{НАГР} = 4000$ квар и БСК с $Q_{БК} = 2700$ квар. Определить коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности, сравнить K_{2U} с допустимым по ГОСТ 13109 – 97 и если необходимо, то разработать мероприятия по снижению несимметрии в сети 10 кВ.

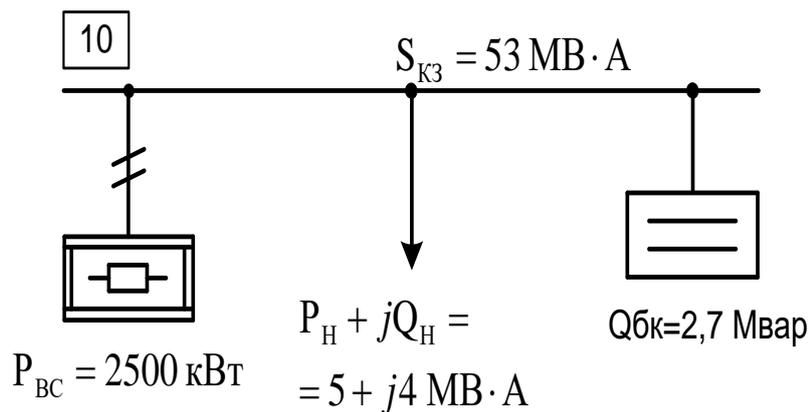


Рисунок 3.4 Расчетная схема

Задача 6

Оценить возможность подключения к РП-6 кВ вентильного преобразователя мощностью $S_{ПР}=6$ МВ·А (шестифазная схема)

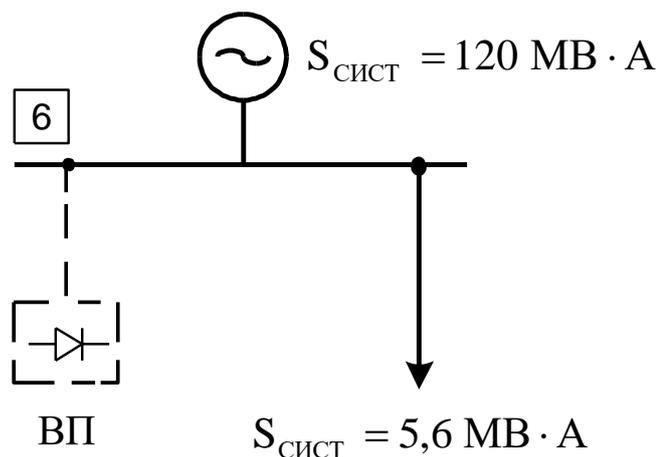


Рисунок 3.5 Расчетная схема

Задача 7

Определить допустимость колебаний напряжения на шинах 35 и 220 кВ при работе (рисунок 3.6): а) всех печей;

б) одной ДСП-200;

с) одной ДСП-100.

Длительность периода расплава 10 мин. Частота колебаний напряжения 0,4 раза в секунду.

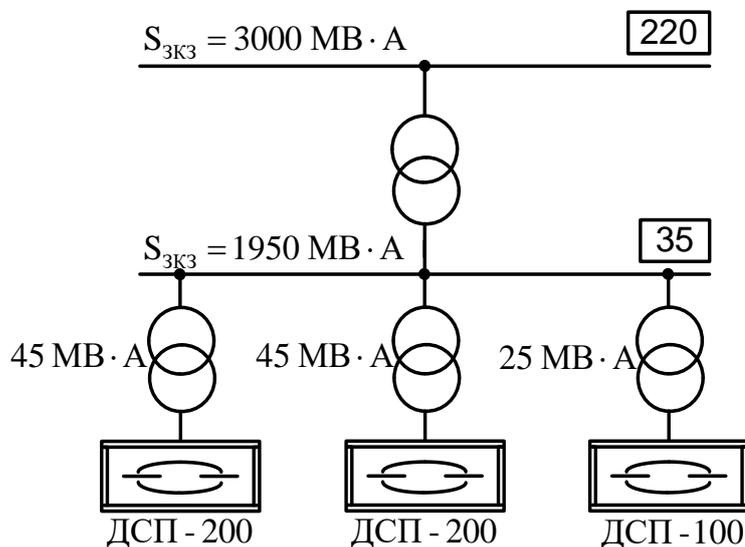


Рисунок 3.6 Расчетная схема

Задача 8

Для схемы (рисунок 3.7) определить номер гармоники, при которой возможен резонанс токов, определить коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения.

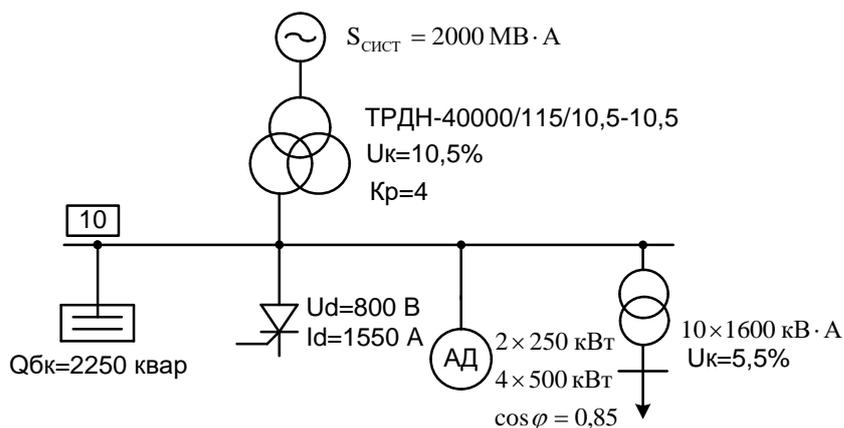


Рисунок 3.7 Схема соединения

Задача 9

Для схемы (рисунок 3.8) составить схему замещения сети для расчета уровней высших гармоник, определить K_U на шинах РП и сделать вывод о допустимости работы нагрузки S_H от шин РП при отключенной и подключенной БСК.

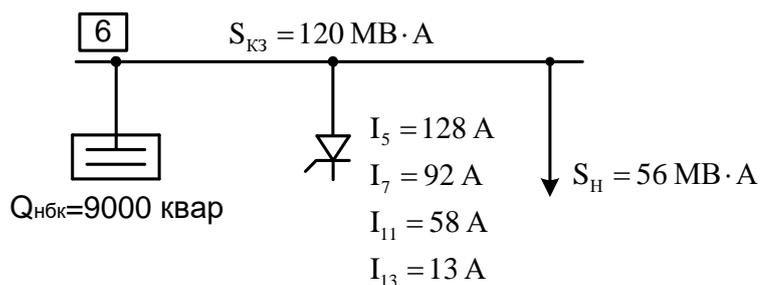


Рисунок 3.8 Расчетная схема

Задача 10

Определить допустимость колебаний напряжения на шинах 10 кВ (рисунок 3.9) при работе вентильного преобразователя, если $\delta U_{\text{доп}} = 2\%$, а наброс реактивной мощности составляет $\Delta Q_{\text{МАКС}} = 10 \text{ Мвар}$.

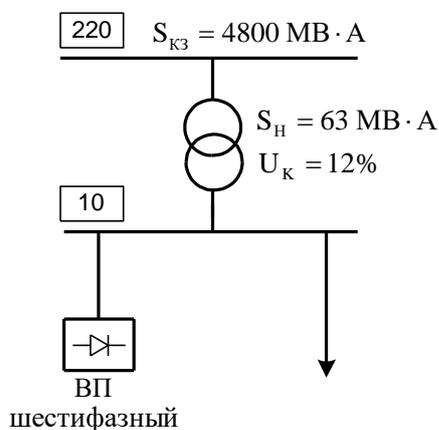


Рисунок 3.9 Расчетная схема

Задача 11

Для схемы (рисунок 3.10) произвести оценку искажения синусоидальности кривой напряжения и определить номер гармоники, при которой возможен резонанс токов. Проверить, не перегружаются ли по току подключенные к шинам РП-10 кВ БСК.

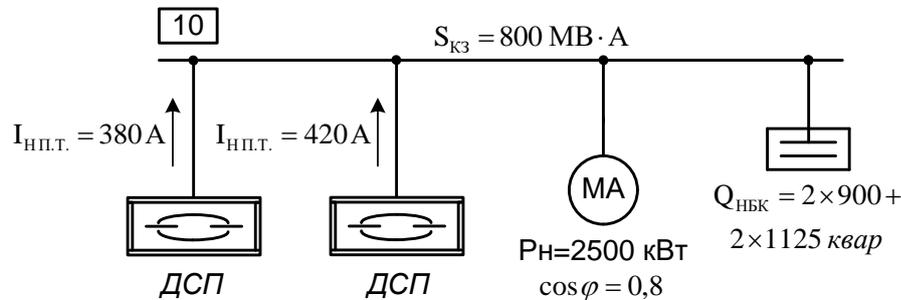


Рисунок 3.10 Расчетная схема

Задача 12

К шинам РП-10 кВ подключен прокатный стан. За цикл прокатки (30 с) имеют место 32 наброса реактивной мощности, из них: 8×14 Мвар, 14×8 Мвар, 10×6 Мвар. Мощность КЗ на шинах 10 кВ $S_{кз} = 250$ МВ·А. Оценить допустимость подключения стана к шинам 10 кВ.

Задача 13

Оценить влияние двух шестифазных вентильных преобразователей на работу нагрузки на шинах РП-10 кВ (рис 3.11). В состав гармоник тока, генерируемых преобразователями, входят гармоники 5, 7, 11, 13.

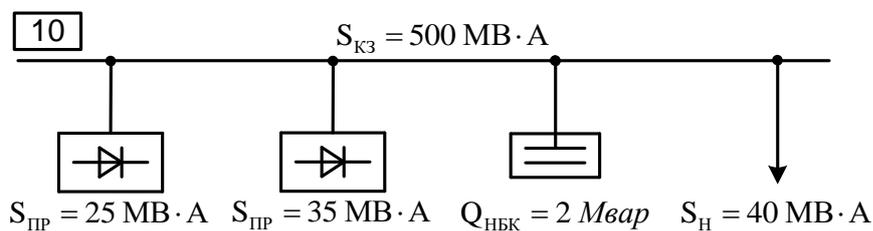


Рисунок 3.11 Расчетная схема

Задача 14

За 25 мин в сети зарегистрировано 25 размахов изменений напряжения амплитудой 3 %, 30 размахов амплитудой 2 % и 120 размахов амплитудой 2,5 %.

Оценить допустимость питания от этой сети ламп накаливания коммунально-бытовых потребителей и ЛЛ.

Задача 15

Оценить допустимость колебаний напряжения на шинах 6 кВ подстанции 110/6 кВ, питающую резкопеременную нагрузку (рисунок 3.12). Мощность КЗ на шинах 110 кВ - $S_{КЗ} = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$. Мощность трансформатора $S_T = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_K = 10 \%$.

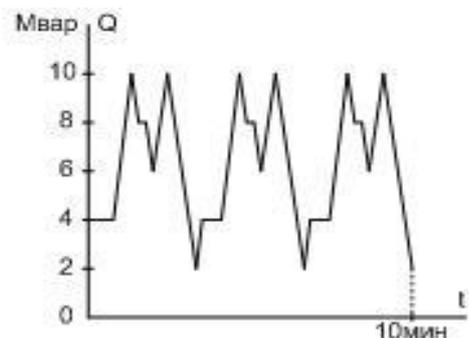


Рисунок 3.12 Резкопеременная нагрузка

Задача 16

Для схемы (рисунок 3.13) определить коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения на шинах 10 кВ РП и сделать вывод о возможности подключения к РП батареи конденсаторов с $Q_{БК} = 1900 \text{ квар}$, если токи гармоник, генерируемые ДСП составляют $I_3 = 70 \text{ А}$, $I_5 = 50 \text{ А}$, $I_7 = 30 \text{ А}$.

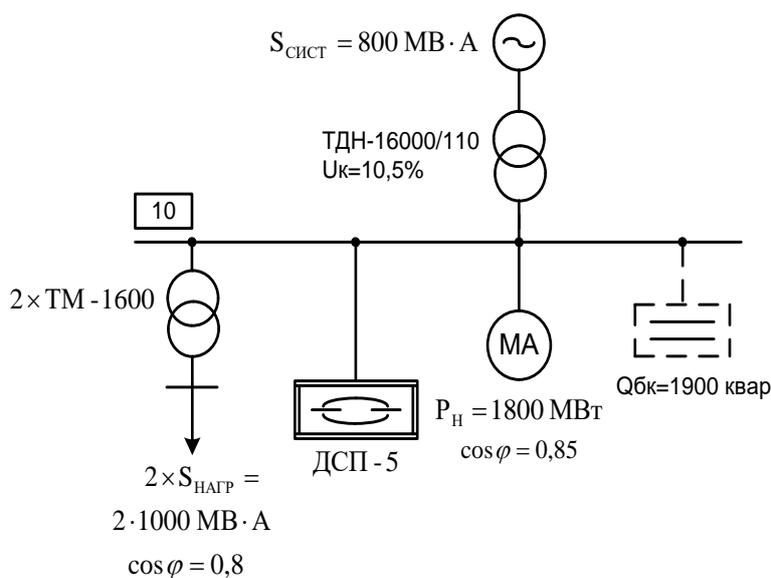


Рисунок 3.13 Расчетная схема

Задача 17

Оценить допустимость отклонения напряжения на зажимах электроприемников, подключенных к шинам 0,38 кВ ближайшей (ЦТП2) и наиболее удаленной (ЦТП1) подстанций (рисунок 3.14).

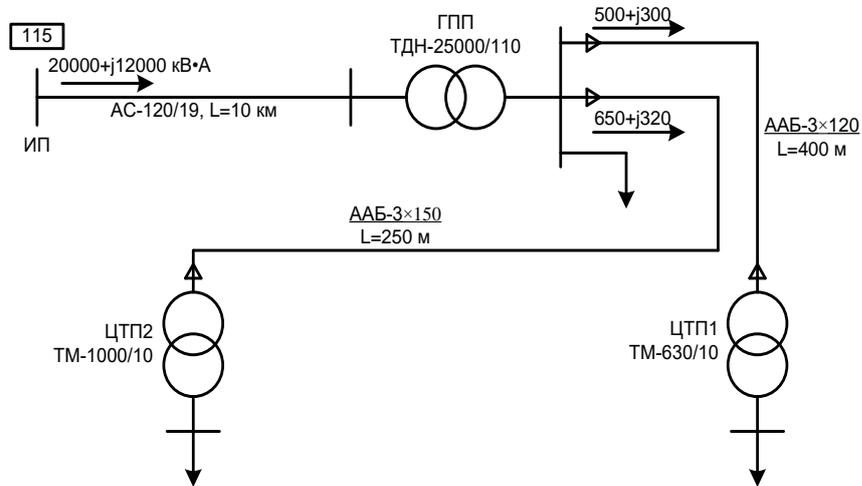


Рисунок 3.14 Расчетная схема

Задача 18

Оценить допустимость колебаний напряжения на шинах ВН и НН подстанции (рисунок 3.15):

- 1) при работе одной печи ДСП1;
- 2) при работе двух печей ДСП1 и ДСП2.

Длительность периода расплава металла (T_p) – 10 мин. Мощность печных трансформаторов $S_{ПТ1} = 25 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ и $S_{ПТ2} = 12 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ соответственно. Частота колебаний напряжения $N=0,8$ раз в секунду. Питающая сеть задана мощностью короткого замыкания $S_{КЗ} = 1500 \text{ МВ} \cdot \text{А}$.

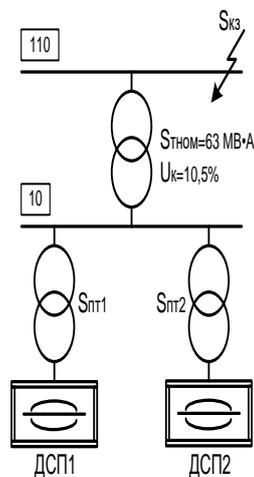


Рисунок 3.15 Расчетная схема

Задача 19

К шинам распределительного устройства подключены следующие нагрузки (рисунок 3.16): трехфазная симметричная мощностью $S_{\text{Сим}} = 30 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, две однофазные мощностью $S_{\text{АВ}} = 16 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ и $S_{\text{ВС}} = 25 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, включенные на разные междуфазные напряжения, и батарея статических конденсаторов мощностью $Q_{\text{БСК}} = 28 \text{ Мвар}$. Мощность короткого замыкания на шинах распределительного устройства $S_{\text{КЗ}} = 1500 \text{ МВ} \cdot \text{А}$. Требуется определить коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности и оценить его допустимость.

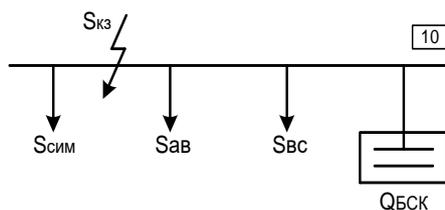


Рисунок 3.16 Расчетная схема

Задача 20

Оценить возможность совместной работы вентильного преобразователя (шестифазная схема выпрямления) и нагрузки (рисунок 3.17). Определить номер гармоники, на которой возможен резонанс токов. При расчете коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения учесть только гармоники 5 и 7.

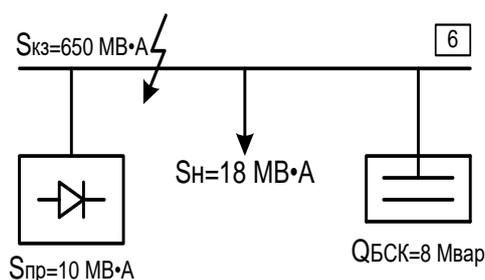


Рисунок 3.17 Расчетная схема

4. Контрольные вопросы

1. Что понимается под качеством электрической энергии?
2. Какие показатели качества электрической энергии нормируются ГОСТом?
3. Назовите причины нарушения ПКЭ.
4. В чем заключается оценка экономического ущерба от некачественного электроснабжения?
5. В течение какого расчетного периода проводится оценка соответствия показателей КЭ указанным нормам?
6. В каком случае качество электрической энергии по установившемуся отклонению напряжения в точке общего присоединения к электрической сети соответствует требованиям ГОСТа?
7. Какими показателями характеризуются несинусоидальность напряжения и несимметрия напряжения?
8. В чем проявляется влияние отклонения напряжения и частоты на работу электроприемников?
9. Какие требования предъявляются ГОСТом к отклонению частоты и к отклонению напряжения?
10. Назовите источники колебания напряжения. Как влияет колебание напряжения на работу различных электроприемников?
11. Какие требования предъявляются ГОСТом к колебаниям напряжения?
12. Какие требования предъявляются ГОСТом к несимметрии напряжения?
13. В чем проявляется влияние несимметрии напряжения на работу электроприемников?
14. Какие требования предъявляются ГОСТом к несинусоидальности напряжения?
15. В чем проявляется влияние несинусоидальности напряжения на работу электроприемников?
16. Как оценить перегрузку конденсаторных батарей токами высших гармоник?
17. Каким образом можно представить в схеме замещения нагрузки электрических сетей?
18. В каком случае в сети, содержащей индуктивность и емкость, возникает резонанс токов? Как определить номер гармоники, при которой возможен резонанс?
29. Какие мероприятия способствуют повышению качества электроэнергии?

Литература

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.elec.ru/viewer?url=/files/2014/05/06/GOST-32144-2013-Elektricheskaja-energija.pdf>.
2. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. 35 с.
3. Гаврилов Ф.А. Качество электрической энергии. Мариуполь: Приазовский ГТУ, 2007. 96 с.
4. Гуревич Ю.Е., Кабиков К.В. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя. М.: Торус Пресс, 2015. 408 с.
5. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. М.: Энергоатомиздат, 2000. 252 с.
6. Киреева Э.А. Современные средства контроля и измерения в электроснабжении: справочник. Ч. 1. М.: НТФ "Энергопрогресс", 2006. 52 с.
7. Куско А., Томпсон М. Сети электроснабжения. Методы и средства обеспечения качества энергии. М.: Додэка XXI, 2011. 336 с.
8. РД 34-20-501-95. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. 15-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. 296 с.
9. Суднова В.В. Качество электрической энергии. М.: ЗАО "Энергосервис", 2000. 80 с.
10. Титов А.Ф. Энергосбережение и качество электроэнергии. Хабаровск: ДВГУПС, 2007. 30 с.
11. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Энергия, 2012. 387 с.

Учебное издание

Безик Валерий Александрович

Никитин Антон Михайлович

Качество электрической энергии

Методические указания по выполнению практических работ
для студентов направлений подготовки

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника,

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Редактор Павлютина И.П.

Подписано к печати 7.11.2019 г. Формат 60x84. 1/16.
Бумага офсетная. Усл. п. 2,73. Тираж 25 экз. Изд. №6530.

Издательство Брянского государственного аграрного университета
243365, Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский ГАУ