

ЧИТАЛЬНИЙ ЗАЛ
НТБ ДонНТУ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
Государственное высшее учебное заведение
«Донецкий национальный технический университет»

К 36

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

(конспект лекций)

Донецк 2007

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ

Государственное высшее учебное заведение

«Донецкий национальный технический университет»

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

(КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ)

(для студентов дневной и заочной форм обучения
по специальности 090603 – электротехнические системы электропотребления)

ПЕРЕВІРЕНО
20 12 рік

Утверждено
на заседании учебно-издательского
совета ДонНТУ
протокол № 5 от 28.02.2007 г

Составитель: Муха В.П.

Рассмотрено
на заседании методической
комиссии специальности
090603 – электротехнические
системы электропотребления
протокол № 3/07 от 23.01.2007.

ПЕРЕВІРЕНО
20 13 рік

Науково-технічна
бібліотека ДонНТУ

Донецк 2007

Электроснабжение электротехнологических установок (конспект лекций)
/Состав.: В.П. Муха. – Донецк; Изд-во ДонНТУ, 2007. - 152 с.

Рассмотрены вопросы расчета электрических нагрузок сетей, питающих электротехнологические установки, а также влияния их работы на показатели качества электроэнергии. Дана методика расчета ущербов при отклонении этих показателей от нормируемых. Рассмотрены принципы построения систем электроснабжения и питания электротехнологических установок. Приведены методики расчета отклонений и колебаний напряжения, несинусоидальности и несимметрии в сетях, питающих электротехнологические установки, а также по их снижению.

Для студентов всех форм обучения специальности 090603 - электротехнические системы электропотребления: может быть полезна для специалистов в области проектирования и эксплуатации систем электроснабжения и питания электротехнологических установок.

Составитель: Муха В.П., проф. каф. ЭПП

Рецензент: Заболотный И.П., д.т.н., проф., зав. каф. ЭСиС

Компьютерный набор: Ткаченко Е.В., Топчий В.А.

Художественное оформление: Топчий В.А.

Корректор: Федоров Н.Д.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 5 |
| 1 ГРАФИКИ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, ИХ ПОКАЗАТЕЛИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ | 6 |
| 1.1 Общая характеристика электротехнологических установок как потребителей электроэнергии | 6 |
| 1.2 Графики нагрузки электротехнологических установок | 10 |
| 1.3 Показатели и характеристики индивидуальных и групповых графиков нагрузки | 18 |
| 2 РАСЧЕТНАЯ НАГРУЗКА И МЕТОДЫ ЕЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ | 24 |
| 2.1 Понятие расчетной нагрузки | 24 |
| 2.2 Определение расчетной нагрузки по нагреву от трехфазных ЭТУ длительного режима работы | 25 |
| 2.3 Определение расчетной нагрузки по нагреву от трехфазных ЭТУ повторно-кратковременного режима работы | 28 |
| 2.4 Определение расчетных нагрузок по нагреву от однофазных ЭТУ длительного режима работы | 30 |
| 2.5 Определение расчетной нагрузки дугowych сталеплавильных печей | 37 |
| 2.6 Определение расчетной нагрузки по нагреву группы ЭТУ импульсного режима работы | 42 |
| 2.7 Определение расчетных пиковых нагрузок | 44 |
| 3 ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ | 53 |
| 3.1 Отклонения напряжения | 53 |
| 3.2 Колебания напряжения | 54 |
| 3.3 Несинусоидальность токов и напряжений | 57 |
| 3.4 Несимметрия токов и напряжений | 60 |
| 4 ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК | 63 |
| 4.1 Влияние отклонений напряжения на работу печей сопротивления | 65 |
| 4.2 Влияние отклонений напряжения на работу ДСП | 66 |
| 5 РАСЧЕТ УЩЕРБА ОТ НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОГО КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ | 69 |
| 5.1 Составляющие экономического ущерба | 69 |
| 5.2 Расчет ущерба для печей сопротивления | 69 |
| 5.3 Расчет ущерба для дугowych печей | 70 |
| 5.4 Расчет ущерба для электросварочных машин | 71 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 6 | СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭТУ | 73 |
| 6.1 | Требования предъявляемые к схемам электроснабжения электро- технологических установок | 73 |
| 6.2 | Схемы электроснабжения печей сопротивления | 74 |
| 6.3 | Схемы электроснабжения индукционных печей | 77 |
| 6.4 | Схемы электроснабжения ДСП | 80 |
| 6.5 | Схемы электроснабжения руднотермических печей | 85 |
| 7 | РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СЕТЯХ С ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ | 89 |
| 7.1 | Расчет уровней напряжения | 89 |
| 7.2 | Расчет колебаний напряжения | 95 |
| 7.3 | Расчет несинусоидальности напряжения | 100 |
| 7.4 | Расчет несимметрии напряжения | 111 |
| 8 | КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ, ПИТАЮЩИХ ЭТУ | 125 |
| 8.1 | Характеристика ЭТУ как потребителей реактивной мощности | 125 |
| 8.2 | Поперечная компенсация реактивной мощности | 126 |
| 8.3 | Продольная компенсация реактивной мощности | 130 |
| 8.4 | Компенсация реактивной мощности в электрических сетях со специфическими нагрузками | 134 |
| | Приложение А. Технические данные трансформаторов, шинопрово- дов и кабелей | 149 |

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие любого производства неразрывно связано с применением электротехнологических процессов и установок, обеспечивающих повышение качества материалов и изделий, снижение их себестоимости, появление новых прогрессивных технологий, рост производительности труда, улучшение экологии окружающей среды и т. д. С другой стороны широкое внедрение мощных вентильных преобразователей, электродуговых печей, сварочных установок и других устройств, которые при всей своей технологической эффективности оказывают отрицательное влияние на качество электроэнергии в электрических сетях (создают отклонения и колебания напряжения, несинусоидальность и несимметрию), что приводит к значительному экономическому ущербу.

Несмотря на широкое внедрение электротехнологических установок (ЭТУ) в народном хозяйстве вопросы их электроснабжения не нашли достаточного отражения в курсе “Электроснабжение промышленных предприятий”, посвященном, в основном, электроснабжению общепромышленных установок. В связи с этим, решением ученого совета Донецкого национального технического университета в учебный план специальности 7.090603 – электротехнические системы электропотребления была введена дисциплина “Электроснабжение электротехнологических установок и устройств”.

Настоящее учебное пособие является конспектом курса лекций по “Электроснабжению электротехнологических установок и устройств” и предназначено оказать помощь студентам всех форм обучения в изучении этой дисциплины.

В пособии отражены основные вопросы проектирования электроснабжения ЭТУ: расчета электрических нагрузок, выбора схемы электроснабжения, компенсации реактивной мощности, электромагнитной совместимости, снижения вредного влияния работы ЭТУ на питающую электрическую сеть и др.

В подготовке к изданию учебного пособия принимали участие студенты: Ткаченко Е. В., Топчий В. А.

1 ГРАФИКИ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, ИХ ПОКАЗАТЕЛИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

1.1 Общая характеристика электротехнологических установок как потребителей электроэнергии

Согласно "Правилам устройства электроустановок" (ПУЭ) *электроприемником* называется аппарат, агрегат, механизм, предназначенный для преобразования электрической энергии в другой вид энергии. *Потребителем* электрической энергии является электроприемник или группа электроприемников, объединенных технологическими процессами и размещенных на определенной территории [10].

Отдельные технологические установки – потребители электроэнергии – могут иметь несколько электроприемников. Это относится и к электротехнологическим установкам. Например, дуговая сталеплавильная печь, как потребитель электроэнергии, имеет несколько электроприемников: сам плавильный агрегат, приводы механизмов печи (наклона, поворота ванны, подъема и отворота свода и др.), преобразователь устройства электромагнитного перемешивания металла, источник оперативного тока для питания цепей управления, защиты и блокировки и т.д. [9].

Таким образом, ЭТУ, как потребитель электроэнергии, в общем случае, представляет собой совокупность электроприемников, для характеристики которых используются общепринятые показатели: номинальная мощность, род тока и его частота, номинальное напряжение, режим работы, категория обеспечения надежности электроснабжения, производительность.

Номинальная мощность электроприемников всегда относится к *длительному режиму* их работы. За номинальную мощность ЭТУ, оборудованных индивидуальными трансформаторами (дуговые сталеплавильные печи, руднотермические печи, печи электрошлакового переплава, отдельные виды индукционных печей и печей сопротивления), принимается номинальная мощность этих трансформаторов $S_{ном}$, кВА или МВА (для мощных установок). За номинальную мощность печей сопротивления, индукционных печей, оснащенных конденсаторными устройствами, электронных и плазменных плавильных печей принимается активная мощность $P_{ном}$, кВт, которую может выделить нагревательная установка. Номинальная мощность преобразователей (электромашинных и полупроводниковых) нормируется на выходе преобразователя, кВт или кВА. При совместном питании электроприемников основного (электротермического) оборудования и вспомогательных механизмов от одного источника за номинальную мощность ЭТУ берется сумма номинальных мощностей всех её электроприемников. В остальных случаях номинальные мощности основного оборудования и вспомогательных механизмов рассматриваются отдельно [8].

Для ЭТУ, работающих в повторно-кратковременном и импульсном режимах работы (машины контактной сварки, некоторые установки прямого нагрева, индукционные нагревательные установки), номинальная мощность определяется по выражениям:

$$\begin{aligned} P_{ном} &= P_{наст} \sqrt{PB_{наст}}; \\ Q_{ном} &= S_{наст} \sqrt{PB_{наст}} \cdot \sin \varphi; \\ S_{ном} &= S_{наст} \sqrt{PB_{наст}}, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где $P_{наст}$, $S_{наст}$, $PB_{наст}$, $\sin \varphi$ – соответственно паспортные активная и полная мощности, относительная продолжительность включения и синус угла между полной и активной номинальной мощностями.

Основным *родом тока* в электротехнологических установках является трехфазный или однофазный ток промышленной частоты 50 Гц. При этом дуговые сталеплавильные печи (ДСП), руднотермические печи (РТП) относятся, как правило, к установкам трехфазного тока, а дуговые печи косвенного нагрева – к установкам однофазного тока. Индукционные печи (ИП), печи сопротивления (ПС) и печи электрошлакового переплава (ЭШП) выполняются как трехфазными, так и однофазными.

Потребителями постоянного тока являются электролизные установки (ЭУ), вакуумные дуговые печи (ВДП), электронно-лучевые установки (ЭЛУ), плазменные дуговые печи (ПДП) и плазменные-дуговые установки (ПДУ), а также сварочные установки и установки анодно-механической обработки, питающиеся от специальных преобразователей.

Стандартной частотой для энергосистем и промышленных предприятий Украины и СНГ является 50 Гц, принятая также в европейских и развивающихся странах Азии и Африки, имеющих экономические связи с Европой. В США и странах Западного полушария принята частота 60 Гц. Международная электротехническая комиссия (МЭК) признала стандартными частоты 50 и 60 Гц. Широкое распространение получил переменный ток других частот (пониженных, средних и высоких).

Переменный ток пониженной частоты применяется для питания установок:

- электромагнитного перемешивания стали в ДСП (0,5-1,5) Гц;
- некоторых видов контактной электросварки (2-5) Гц;
- мощных печей ЭШП и в перспективе РТП (2-10) Гц;
- индукционных установок для нагрева крупных деталей из цветных металлов (5-20) Гц.

Такие установки обычно имеют индивидуальные полупроводниковые преобразователи.

В установках индукционного и диэлектрического нагрева используют частоты от сотен герц и до сотен мегагерц. Для установок средней частоты применяется индивидуальное или централизованное питание от электромашинных или полупроводниковых преобразователей, а для установок высокой частоты применяются индивидуальные ламповые генераторы.

Необходимо отметить, что для систем электроснабжения все ЭТУ с преобразователями являются потребителями трехфазного переменного тока промышленной частоты.

Номинальным напряжением электроприемника $U_{ном}$ называют напряжение, обеспечивающее его нормальную работу. Номинальные напряжения установок ДСП и РТП - 6, 10, 35, 110 и 150 кВ; установок ЭШП - 6, 10, 35 кВ; индукционных установок и печей сопротивления, оснащенных печными трансформаторами, - 0,38, 6 и 10 кВ. При непосредственном присоединении к цеховым сетям установки ПС проектируются на напряжения 220, 380, 660 В.

Рабочее напряжение ЭТУ во многих случаях не согласуется с номинальным напряжением питающих сетей. Для согласования этих напряжений, а также для возможности регулирования мощности нагрева, ЭТУ оборудуются специальными трансформаторами или автотрансформаторами. В соответствии с ПУЭ [10] печными трансформаторами (автотрансформаторами) должны быть оборудованы дуговые печи промышленной частоты прямого, косвенного и смешанного действия (вне зависимости от напряжения и мощности), а также индукционные и печи сопротивления, работающие на напряжении, отличающемся от напряжения электрической сети общего назначения, или при единичной мощности печей: однофазных - 400 кВт и более, трехфазных - 1600 кВт и более.

Выпрямительные и преобразовательные установки, комплектуемые с ЭТУ, проектируются с учетом подключения их к цеховым или внутризаводским высоковольтным сетям.

По режиму работы основное оборудование ЭТУ согласно действующей классификации в большинстве случаев можно разделить на две группы: установки с *продолжительным* (длительным) режимом работы и установки с *повторно-кратковременным* режимом работы. К первой группе относятся электроплавильные и нагревательные установки непрерывного и непрерывно-циклического действия с длительностью цикла, превышающей 10 мин; ко второй - нагревательные установки периодического действия (нагрев перед обработкой, отжиг, закалка и т.п.) и установки дуговой сварки. Длительность цикла у этих ЭТУ не превышает 10 минут.

Для характеристики ДСП, режим работы которых сопровождается значительными толчками мощности, соизмеримыми с мощностью короткого замыкания, и вызывающими повышенные колебания напряжения, вводится понятие *резкопеременный* режим работы. Этот режим характеризуется частотой появления пиков нагрузки, скоростью их нарастания и снижения.

Машины контактной сварки (МКС) и некоторые установки прямого нагрева (УПН) характеризуются потреблением большого по величине тока при малой его длительности (до нескольких секунд). Такой режим работы принято называть *импульсным*.

С точки зрения *бесперебойности* (надежности) электроснабжения по ПУЭ различают три категории электроприемников.

Первая категория - нарушение электроснабжения электроприемников может повлечь за собой опасность для жизни людей или значительный ущерб народному хозяйству, связанный с повреждением оборудования, массовым браком продукции или длительным расстройством сложного технологического процесса.

К потребителям первой категории относятся некоторые печи сопротивления, главным образом непрерывного действия, которые при внезапных перерывах дают массовый брак, а у ряда печей при этом возникают и серьезные повреждения, например прогиб роликов в рольганговых печах. В печах ЭШП и ВДП, электронно-лучевых и плазменных установках даже кратковременное отключение питания приводит к браку выплавляемого слитка, что вызывает значительный экономический ущерб. С возможностью предотвращения серьезных аварий связано питание по первой категории вспомогательных потребителей электрических печей: приводов механизма наклона плавильных печей, откачивающих систем ВДП и т.д. [9].

Потребители первой категории должны получать питание как минимум от двух независимых источников и иметь устройство автоматического включения резерва (АВР).

Вторая категория - перерыв в электроснабжении этих электроприемников связан с массовым недоотпуском продукции, простоем механизмов, транспорта, рабочих и т.д. К таким потребителям относятся ДСП, все виды РТП, большинство печей сопротивления, индукционные плавильные печи, нагревательные установки промышленной и средней частоты, электропечи и установки высокой частоты и установки диэлектрического нагрева (УДН).

Электроприемники второй категории рекомендуется обеспечивать электроэнергией от двух независимых взаиморезервирующих источников питания. Переключения могут производиться действием дежурного персонала через тот или иной промежуток времени, в зависимости от наличия постоянного дежурства или работы выездной группы.

Количество источников питания для потребителей второй категории выбирается на основании технико-экономических расчетов с учетом значения, какое имеет данное промышленное предприятие в народном хозяйстве страны, и местных условий [9].

Третья категория - все электроприемники, не подходящие под первую и вторую категории.

К третьей категории обычно относят электроприемники ЭТУ цехов и участков несерийного производства - кузнечных, штамповочных, прессовых, сварочных и т.д.

Приемники третьей категории могут иметь один источник питания, но при условии, что перерыв в электроснабжении не превысит одних суток.

Важнейшим показателем работы ЭТУ является её *производительность*. Она определяется количеством продукции, производимой ЭТУ в единицу времени (час, сутки). При сравнительном анализе работы различных ЭТУ удобно рассматривать часовую производительность:

$$P_v = G/t, \quad (1.2)$$

где G - количество материалов, изделий, полученное или обработанное ЭТУ, т, кг или единиц изделий (штук);

t - время, необходимое для получения или обработки данного количества материалов, изделий.

ЭТУ относятся к числу технологических потребителей, как правило, с большим удельным потреблением электроэнергии. Удельный расход электроэнергии ЭТУ измеряется чаще всего в киловатт-часах на тонну выпускаемой продукции и определяется из соотношения:

$$a_T = A_a / G, \quad (1.3)$$

где a_T - удельный технологический расход электроэнергии ЭТУ, кВт ч/т;

A_a - потребление активной электроэнергии установкой за рассматриваемый период (смена, сутки, месяц, год), кВт ч;

G - объем выпуска продукции за рассматриваемый период, т, (шт).

Фактический расход электроэнергии на производство единицы продукции принято называть *удельным расходом*, а плановый расход - *нормой расхода*.

1.2 Графики нагрузки электротехнологических установок

Важнейшими характеристиками для выбора всех элементов систем электроснабжения (трансформаторов, преобразователей, электрических сетей и др.) являются графики нагрузки и показатели режимов работы ЭТУ. При проектировании и эксплуатации систем электроснабжения ЭТУ обычно оперируют следующими видами нагрузок по активной P , реактивной Q , полной S мощностями и по току I . Зависимости изменения нагрузки во времени $P(t)$, $Q(t)$, $S(t)$ или $I(t)$ называются *графиками нагрузки*.

Различают *индивидуальные* и *групповые* графики нагрузки. Графики нагрузки $p(t)$, $q(t)$, $s(t)$ и $i(t)$ отдельных ЭТУ называются индивидуальными, а графики нагрузки $P(t)$, $Q(t)$, $S(t)$ и $I(t)$ группы ЭТУ - групповыми или суммарными. Для групповых графиков нагрузки справедливо следующее соотношение:

$$P(t) = \sum_{i=1}^n p_i(t);$$

$$Q(t) = \sum_{i=1}^n q_i(t), \quad (1.4)$$

где n - число ЭТУ в рассматриваемой группе.

Индивидуальные и групповые графики нагрузки представляют в виде непрерывных или дискретных (ступенчатых) кривых. Запись графика нагрузки в виде непрерывной кривой - регистрограммы наиболее близко соответствует действительной нагрузке ЭТУ и получается обычным самопишущим прибором. Ступенчатый график нагрузки строится или по показаниям счетчика или путем осреднения на заданном интервале исходного графика $P(t)$ или $Q(t)$.

Для большинства ЭТУ характерна цикличность их работы, обусловленная многократным повторением операций комплексного технологического процесса. Поэтому индивидуальным и групповым графикам присуща большая или меньшая *регулярность*, которую необходимо учитывать при исследовании и расчете нагрузок. Любой график изучается на основе базисного времени, позволяющего учесть все возможные его вариации. Для периодических индивидуальных графиков таким базисным временем является время цикла, а для непериодических индивидуальных и групповых графиков это время принимается равным целому кратному от длительности комплексного технологического цикла данной группы ЭТУ. Обычно берется длительность одной или нескольких смен [1].

1.2.1 Индивидуальные графики нагрузки

Индивидуальные графики нагрузки необходимы для выбора элементов сетей, питающих отдельные ЭТУ, а также для выяснения физической картины формирования групповых графиков нагрузок.

Рассмотрим индивидуальные графики нагрузок некоторых ЭТУ.

Графики нагрузок печей сопротивления косвенного нагрева зависят от технологического режима работы печи.

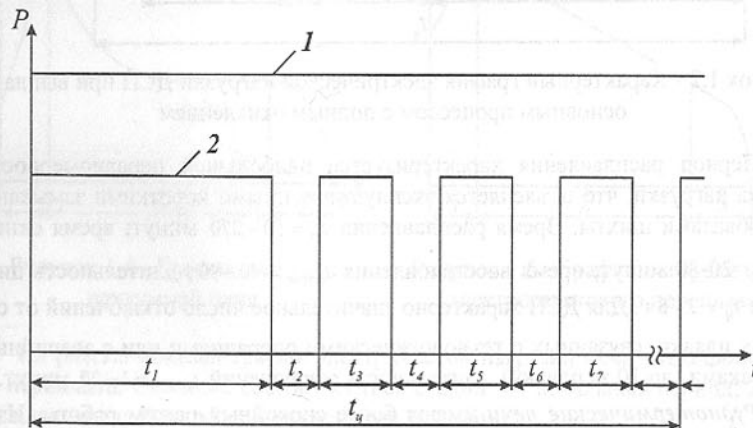


Рисунок 1.1 - Графики электрической нагрузки ПС непрерывного действия (1) и периодического действия (2)

Для ПС непрерывного действия они носят непрерывный характер (рис.1.1, зависимость 1), а для печей периодического действия - циклический. Зависимостью 2 (рис.1.1) показан график нагрузки ПС периодического действия для заковки изделий из чугуна при двухпозиционном регулировании температуры печи (время цикла работы печи $t_{\text{ц}} = 28 - 31$ ч, время подогрева печи до заданной температуры $t_1 = 9 - 11$ ч, время отключения нагревателей t_2, t_4, t_6, \dots равно 10-15 минут,

время включения нагревателей для поддержания заданной температуры t_3, t_5, t_7, \dots тоже равно 10-15 минут).

Графики нагрузки дуговой сталеплавильной печи при твердой завалке шихты характеризуются тремя периодами работы: 1 - расплавление; 2 - окисление, 3 - восстановление (рис 1.2).

В период расплавления для быстрого перевода шихты в жидкое состояние в печь вводится максимальная мощность P_{\max} , в период окисления мощность понижается до $(0,7-0,8)P_{\max}$, а в период восстановления (рафинирования) - до $(0,4-0,5)P_{\max}$.

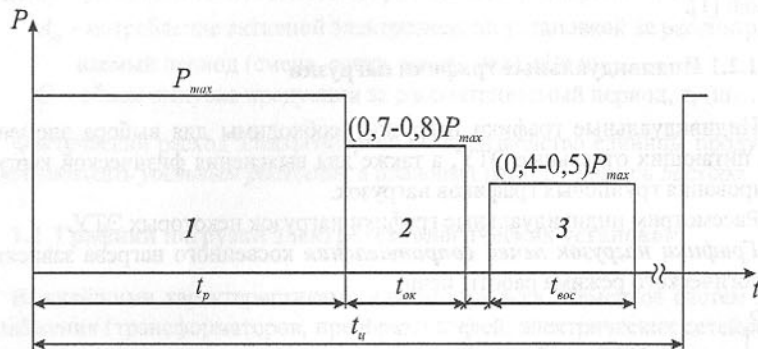


Рисунок 1.2 - Характерный график электрической нагрузки ДСП при выплавке основным процессом с полным окислением

Период расплавления характеризуется наибольшей неравномерностью графика нагрузки, что объясняется эксплуатационными короткими замыканиями и обвалами шихты. Время расплавления $t_p = 50-270$ минут; время окисления $t_{ок} = 20-80$ минут; время восстановления $t_{вос} = 40-90$; длительность цикла плавки $t_{ц} = 2-8$ ч. Для ДСП характерно значительное число отключений от сети по ходу плавки, связанных с технологическими операциями или с аварийными остановками (до 10 за плавку), длительность отключений $t_{откл} = 1-20$ минут.

Руднотермические печи имеют более спокойный режим работы. Изменение электрического режима на мощных ферросплавных печах, как правило, может происходить только периодически в связи с изменением количества шихтовых материалов или с необходимостью изменения её мощности, что вызывает стремлением регулировать мощность печи в соответствии с оптимальным графиком нагрузки энергосистемы. На рис.1.3 приведены графики электрической нагрузки ферросплавных печей типа РПЗ - 48, $S=63$ МВА (1) и РКЗ - 16,5, $S=16,5$ МВА (2) [5].

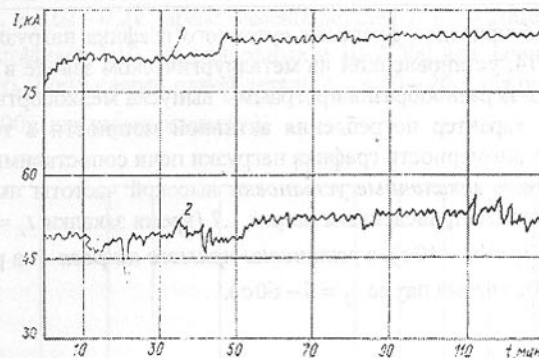


Рисунок 1.3 - Графики нагрузки руднотермических печей

Вакуумные дуговые печи имеют график нагрузки, показанный на рис.1.4. Он включает три периода: 1 - прогрев электрода; 2 - переплав металла; 3 - вывод усадочной раковины.

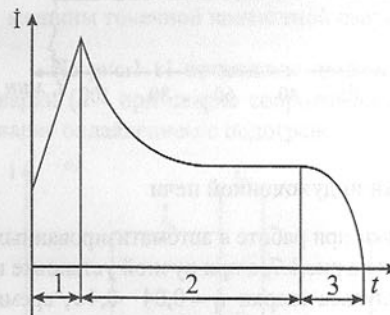


Рисунок 1.4 - График нагрузки вакуумной печи

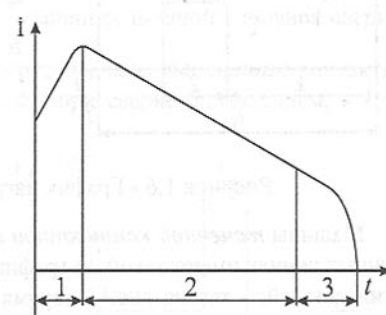


Рисунок 1.5 - График нагрузки печи электрошлакового переплава

На рис.1.5 показан график электрической нагрузки печи электрошлакового переплава. Он также состоит из трех стадий: 1 - начальный период; 2 - период плавания; 3 - выведение усадочной раковины.

Как видно из рис.1.4 и 1.5 во время плавки нагрузка ВДП и ЭШП является неравномерной. Это связано с тремя основными факторами - нестационарностью теплового режима в начальный период плавки, изменением геометрических размеров слитка и уменьшением сопротивления подводящей сети при сплавлении электрода, что приводит к уменьшению нагрузки. Особенно сильно снижается нагрузка в период выведения усадочной раковины.

График нагрузки тигельной индукционной печи (рис.1.6, а) состоит из двух рабочих периодов - периода расплавления (1) длительностью 2-10 ч и периода технологической паузы (2) длительностью 0-2 ч.

На рис.1.6,б приведен фрагмент суточного графика нагрузки *канальной печи* типа ИЦК-14, установленной на металлургическом заводе в цехе оцинкования посуды. Из-за разнообразия программы выпуска мелкосортной и крупно-сортной посуды характер потребления активной мощности в течении суток меняется. По неравномерности графика нагрузки печи сопоставимы с ДСП.

Индукционные *закалочные установки* высокой частоты имеют графики нагрузок, аналогичные приведенным на рис.1.7 (время закалки $t_1 = 5 - 20$ с; время смены детали $t_2 = 10 - 40$ с), а *установки прямого нагрева* - на рис.1.8 (время нагрева $t_1 = 5 - 40$ с; время паузы $t_2 = 5 - 60$ с).

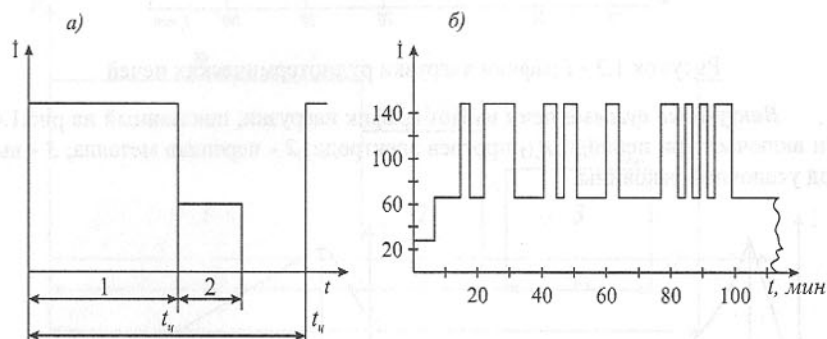


Рисунок 1.6 - График нагрузки индукционной печи

Машины *точечной контактной сварки* при работе в автоматизированных поточных линиях имеют такой же график как на рис.1.7, а при ручной установке и снятии деталей, - как на рис.1.9 (время импульса сварки $t_1 = 0,04 - 0,4$ с; время паузы между точками $t_2 = 0,1 - 100$ с).

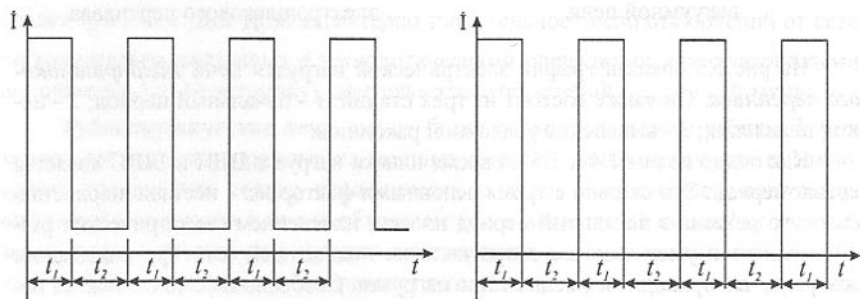


Рисунок 1.7 - График нагрузки индукционной закалочной установки

Рисунок 1.8 - График нагрузки установки прямого нагрева

Рельефные и шовные машины контактной сварки имеют графики нагрузки, приведенные на рис.1.10 (время сварки $t_1 = 0,04 - 0,12$ с; время паузы между

импульсами $t_2 = 0,02 - 0,2$ с; время замены деталей $t_0 = 5 - 200$ с, число импульсов сварки составляет 2-10 для рельефных и 10-20000 для шовных машин; продолжительность цикла сварки одной детали $t_{ц.д.} = 10 - 20$ с для рельефных машин и $t_{ц.д.} = 10 - 1500$ с для шовных машин).

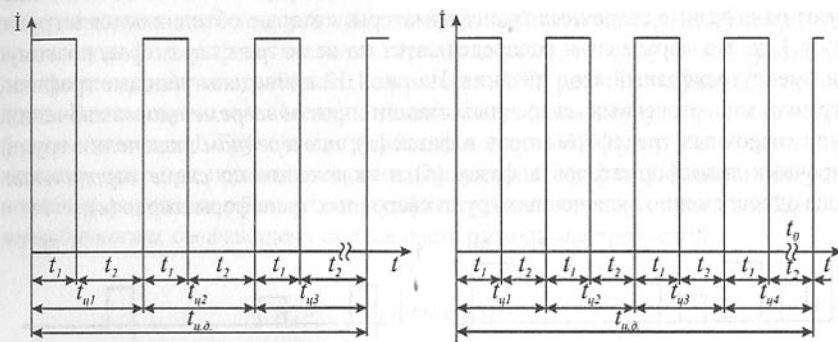


Рисунок 1.9 - График нагрузки машины точечной контактной сварки

Рисунок 1.10 - График нагрузки машин рельефной и шовной сварки

На рис.1.11 приведены графики нагрузки *стыковых машин* контактной сварки (а - при сварке сопротивлением; б - при сварке оплавлением; в - при сварке оплавлением с подогревом).

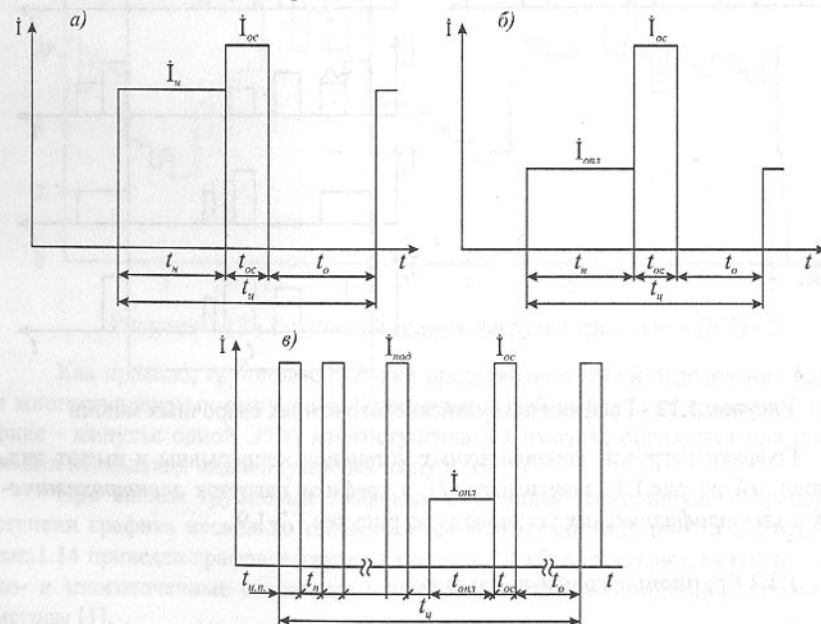


Рисунок 1.11 - Графики нагрузки стыковых сварочных машин

Время нагрева $t_n = 0,5-10$ с; время оплавления $t_{опл} = 1-40$ с; время импульса подогрева $t_{н.п.} = 0,1-0,3$ с; время паузы между импульсами подогрева $t_n = 0,1-0,5$ с; время осадки $t_{ос} = 0,1-1$ с; число импульсов подогрева 1 - 100.

Многоточечные сварочные машины и сварочные автоматические линии имеют однофазные сварочные трансформаторы, которые объединяются в группы от 1 до 5 в параллель и распределяются по всем трем парам фаз, поэтому они имеют трехфазный ввод питания. На рис.1.12 приведены типовые графики нагрузки многоточечных сварочных машин при *одновременном* включении групп сварочных трансформаторов в фазах (а), *поочередном* включении групп сварочных трансформаторов в фазах (б) и включении по *схеме ограничения* числа одновременно включенных групп сварочных трансформаторов (в).

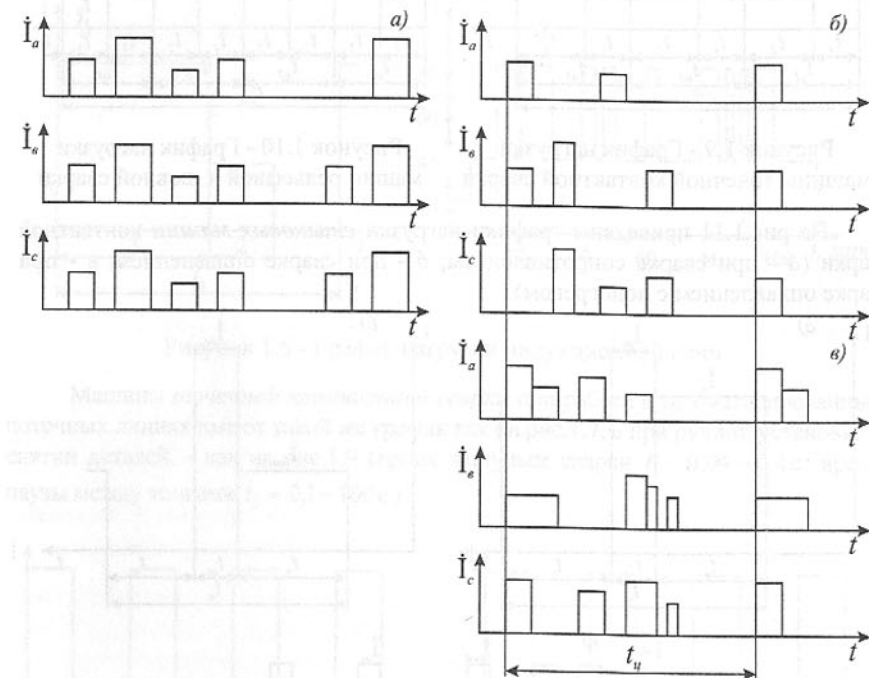


Рисунок 1.12 - Графики нагрузки многоточечных сварочных машин

Графики нагрузок **электролизных** установок непрерывны и имеют вид, показанный на рис.1.1 (зависимость I), а графики нагрузок **электрохимических** и **электрофизических** установок - на рисунке 1.7-1.9.

1.2.2 Групповые графики нагрузки

Групповые графики ЭТУ используются для проектирования систем электроснабжения промышленных предприятий. Они не являются стабильными, а претерпевают изменения в связи с изменением технологии производства, вне-

дрения прогрессивных производственных процессов, уплотнения рабочего времени и т.д.

На формирование групповых графиков нагрузки оказывают влияние взаимосвязи между индивидуальными графиками ЭТУ. Взаимосвязи между нагрузками отдельных ЭТУ будут *жесткими*, если все ЭТУ связаны единым технологическим потоком, работающим в автоматическом режиме. Если при этом индивидуальные графики являются периодическими, то и групповой график будет также *периодическим*. Однако большинство ЭТУ работают *независимо* друг от друга. В этом случае связи между отдельными графиками будут *вероятностными* (*корреляционными*). Групповые графики для таких ЭТУ будут иметь случайный характер даже при периодических индивидуальных графиках. Однако при установившемся режиме работы такие графики удовлетворяют условию *обобщенной периодичности*, означающему стабильность расхода электроэнергии:

$$A_a = \int_t^{t+nt_q} P(t) dt \approx const, \quad (1.5)$$

Групповые графики, удовлетворяющие этому условию, по определению профессора Каялова Г.М., называются *почти периодическими*.

На рис.1.13 приведен групповой график нагрузки трех печей ДСП - 5 [1].

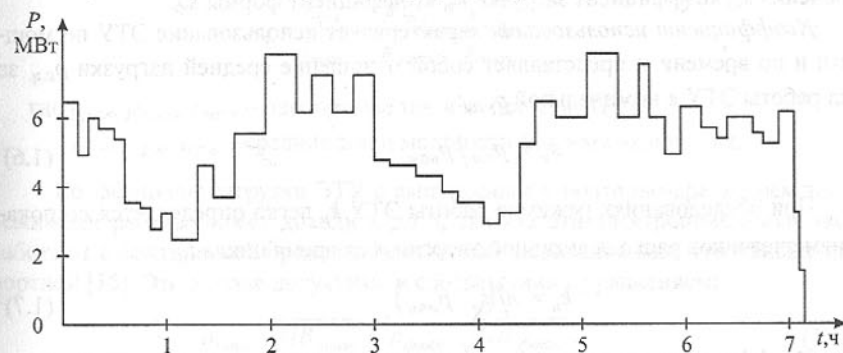


Рисунок 1.13 - Групповой график нагрузки трех печей ДСП - 5

Как правило, групповые графики представляют собой чередование одно- и многоступенчатых импульсов. Одноступенчатый импульс на групповом графике - импульс одной ЭТУ, многоступенчатый импульс образуется при наложении нескольких индивидуальных импульсов.

При записи групповых графиков с помощью самопишущих приборов ступени графика несколько сглаживаются вследствие инерции последних. На рис.1.14 приведен график нагрузки на шинах 0,4 кВ подстанции, питающей одно- и многоточечные сварочные машины, записанный самопишущим амперметром [1].

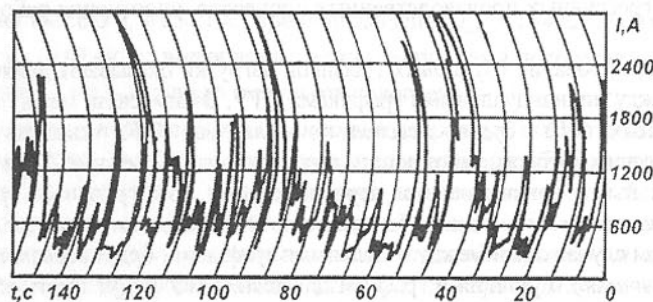


Рисунок 1.14 - Групповой график нагрузки на шинах 0,4 кВ подстанции.

1.3 Показатели и характеристики индивидуальных и групповых графиков нагрузки

1.3.1 Показатели индивидуальных и групповых графиков

Индивидуальные графики. Основными показателями индивидуальных графиков нагрузки являются: коэффициент использования k_u , коэффициент включения k_v , коэффициент загрузки k_z , коэффициент формы k_f .

Коэффициент использования характеризует использование ЭТУ по мощности и по времени и представляет собой отношение средней нагрузки $p_{с.н.}$ за цикл работы ЭТУ к номинальной $p_{ном.}$:

$$k_u = p_{с.н.} / p_{ном.} \quad (1.6)$$

При обследовании режимов работы ЭТУ k_u легко определяется по показаниям счетчиков расхода активной энергии A за время цикла $t_{ц.}$

$$k_u = A / (t_{ц.} \cdot p_{ном.}) \quad (1.7)$$

Коэффициент включения k_v и *продолжительность включения (ПВ)* характеризуют использование ЭТУ по времени и определяются по выражениям:

$$k_v = t_v / (t_v + t_n) = t_v / t_{ц.} \quad (1.8)$$

$$ПВ = 100 t_v / (t_v + t_n) = 100 \cdot t_v / t_{ц.}, \% \quad (1.9)$$

где t_v , t_n , $t_{ц.}$ — соответственно время включения, паузы и цикла.

В паспортах на электрооборудование ЭТУ (машины контактной сварки, дуговые автоматы, аппараты дуговой сварки) указывается паспортная продолжительность включения $ПВ_{пасп.}$, соответствующая паспортной мощности $p_{пасп.}$ и $s_{пасп.}$. Многие ЭТУ работают с $ПВ$, меньшей $ПВ_{пасп.}$, поэтому при расчете электрических нагрузок оперируют фактической продолжительностью включения.

Для электросварочных установок $ПВ_{факт.}$ можно определить по технологическим данным согласно следующему выражению, %:

$$ПВ_{факт.} = 100 \cdot t_{св.} \cdot n \cdot N_d / 3600, \quad (1.10)$$

где $t_{св.}$ — время сварки одной точки, с;

n — число свариваемых точек на одной детали;

N_d — число деталей, свариваемых за час.

Коэффициент загрузки отдельной ЭТУ с длительным режимом работы определяется по выражению:

$$k_z = p_{ср.в.} / p_{ном.}; \quad k_z = k_u \cdot p_{ном.} \cdot t_{ц.} / p_{ном.} \cdot t_v = k_u / k_v, \quad (1.11)$$

где $p_{ср.в.}$ — средняя нагрузка ЭТУ за время её включения в течение цикла работы $t_{ц.}$.

Для ЭТУ, работающих в повторно-кратковременном и импульсном режимах, k_z правильнее определять по выражению:

$$k_z = \frac{i_{ср.в.}}{i_{пасп.}} = \frac{p_{ср.в.}}{p_{пасп.}} = \frac{s_{ср.в.}}{s_{пасп.}}, \quad (1.12)$$

где $i_{пасп.}$, $p_{пасп.}$, $s_{пасп.}$ — паспортные ток и мощности ЭТУ;

$i_{ср.в.}$, $p_{ср.в.}$, $s_{ср.в.}$ — средние ток и мощности за время включения.

Коэффициент загрузки ЭТУ с импульсным и повторно-кратковременным режимами работы может достигать до 3, так как эти электроприемники часто работают с фактической продолжительностью включения намного меньше паспортной [15]. Это вполне допустимо в соответствии с уравнением:

$$p_{пасп.} \sqrt{ПВ_{пасп.}} = p_{факт.} \sqrt{ПВ_{факт.}} \quad (1.13)$$

Коэффициент загрузки является важным показателем режима работы ЭТУ, который влияет на КПД, на потери мощности и энергии.

Коэффициент формы характеризует неравномерность графика нагрузки во времени и определяется как отношение эффективной нагрузки $p_{эф.}$ к средней нагрузке $p_{ср.}$ за цикл

$$k_f = p_{эф.} / p_{ср.} \quad (1.14)$$

Наименьшее, равное единице, значение k_f принимает при неизменной во времени нагрузке.

Групповые графики. Для групповых графиков нагрузки основными показателями являются: коэффициент использования K_u , коэффициент максимума K_m , коэффициент спроса K_c и коэффициент формы K_ϕ .

В действующих электроустановках *групповой коэффициент использования* определяется по показателям активного счетчика за смену:

$$K_u = A_{см} / \left(t_{см} \cdot \sum_{i=1}^n P_{ном,i} \right). \quad (1.15)$$

При проектировании групповой коэффициент использования можно определить через индивидуальные k_u :

$$K_u = P_{см} / P_{ном} = \sum_{i=1}^n k_{u,i} \cdot P_{ном,i} / \sum_{i=1}^n P_{ном,i}. \quad (1.16)$$

Коэффициент максимума K_m есть отношение расчетной нагрузки P_p к средней нагрузке за наиболее загруженную смену $P_{см}$:

$$K_m = P_p / P_{см} = P_p / \sum_{i=1}^n k_{m,i} \cdot P_{ном,i}. \quad (1.17)$$

В [14] вместо K_m предложен аналогичный по смыслу коэффициент расчетной нагрузки K_p .

Коэффициент спроса K_c есть отношение расчетной нагрузки P_p к суммарной номинальной мощности всех ЭТУ:

$$K_c = P_p / \sum_{i=1}^n P_{ном,i}. \quad (1.18)$$

Групповой коэффициент формы K_ϕ графика нагрузки определяется по выражению:

$$K_\phi = P_{эф} / P_{см}, \quad (1.19)$$

где $P_{эф}$ – эффективная нагрузка группы ЭТУ (см. п.1.3.2).

В дальнейшем среднюю нагрузку $P_{см}$ за наиболее загруженную смену будем обозначать P_c .

1.3.2 Характеристики индивидуальных и групповых графиков нагрузки

Индивидуальные и групповые графики характеризуются средней и эффективной нагрузками, дисперсией и среднеквадратичным отклонением.

Величина *средней нагрузки* для индивидуального графика определяется за время цикла t_y по выражению:

$$p_c = \frac{1}{t_y} \int_0^{t_y} p(t) dt. \quad (1.20)$$

Для ЭТУ длительного и ПКР режимов работы при известном потреблении активной электроэнергии $A_{a,y}$ за время t_y или известных индивидуальных показателей, среднюю нагрузку можно определить по формулам:

$$\begin{aligned} p_c &= A_{a,y} / t_y, \\ p_c &= k_u \cdot P_{ном}. \end{aligned} \quad (1.21)$$

Для ЭТУ импульсного режима работы (машины контактной и дуговой сварки):

$$p_c = k_s \cdot k_z \cdot p_{нач} \quad (1.22)$$

Средняя нагрузка группового графика ЭТУ длительного и ПКР режимов работы определяется по формулам:

$$P_c = \frac{1}{T_y} \int_0^{T_y} P(t) dt, \quad (1.23)$$

где $P(t)$ – текущее значение группового графика нагрузки, или

$$P_c = \sum_{i=1}^n p_{c,i} = \sum_{i=1}^n k_{u,i} \cdot P_{ном,i}. \quad (1.24)$$

Для группы ЭТУ импульсного режима работы:

$$P_c = \sum_{i=1}^n p_{c,i} = \sum_{i=1}^n k_{s,i} \cdot k_{z,i} \cdot p_{нач,i} \quad (1.25)$$

Эффективная (среднеквадратичная) нагрузка индивидуального графика нагрузки определяется по формуле:

$$P_{эф} = \sqrt{\frac{1}{t_y} \int_0^{t_y} p^2(t) dt}, \quad (1.26)$$

группового графика нагрузки:

$$P_{эф} = \sqrt{\frac{1}{T_{\eta}} \int_0^{T_{\eta}} P^2(t) dt}. \quad (1.27)$$

Для ЭТУ, работающей в импульсном режиме:

$$\begin{aligned} p_{эф} &= k_z \cdot p_{наен} \sqrt{k_g}; \\ i_{эф} &= k_z \cdot i_{наен} \sqrt{k_g}. \end{aligned} \quad (1.28)$$

Эффективная нагрузка вызывает в проводнике тот же максимальный перегрев, что и реальная переменная нагрузка $p(t)$, $P(t)$ или $i(t)$, $I(t)$.

Если графики нагрузки отдельных ЭТУ $p(t)$ заданы, то p_c и $p_{эф}$ определяются по следующим выражениям:

$$p_c = \frac{p_1 \Delta t_1 + p_2 \Delta t_2 + \dots + p_n \Delta t_n}{t_{\eta}}; \quad (1.29)$$

$$p_{эф} = \sqrt{\frac{p_1^2 \Delta t_1 + p_2^2 \Delta t_2 + \dots + p_n^2 \Delta t_n}{t_{\eta}}}, \quad (1.30)$$

где p_1, p_2, \dots, p_n — значения нагрузки отдельных ступеней графика;

$\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n$ — продолжительность этих ступеней;

t_{η} — длительность записи графика, $t_{\eta} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$.

При наличии групповых графиков $P(t)$ их средняя и эффективная нагрузки также определяются по (1.29) и (1.30):

Дисперсия DP и среднее квадратичное отклонение (стандарт) σP характеризуют неравномерность графика нагрузки.

Для индивидуального графика ЭТУ:

$$\begin{aligned} DP &= p_{эф}^2 - p_c^2; \\ \sigma P &= \sqrt{DP}. \end{aligned} \quad (1.31)$$

Для ЭТУ с импульсным режимом работы:

$$\begin{aligned} DP &= p_{эф}^2 - p_c^2 = k_g \cdot (k_z \cdot p_{наен})^2 - k_g^2 \cdot (k_z \cdot p_{наен})^2 = \\ &= k_g (1 - k_g) (k_z p_{наен})^2. \end{aligned} \quad (1.32)$$

Для независимо работающих ЭТУ дисперсия и среднее квадратичное отклонение группового графика нагрузки определяются по выражениям:

$$\begin{aligned} DP &= \sum_{i=1}^n DP_i; \\ \sigma P &= \sqrt{DP}. \end{aligned} \quad (1.33)$$

Для зависимых ЭТУ дисперсия групповой нагрузки:

$$DP = \sum_{i=1}^n DP_i + 2 \sum_{r \neq s} k_{rs} \quad (1.34)$$

вычисляется с учетом взаимнокорреляционных моментов k_{rs} между попарно взятыми индивидуальными графиками нагрузки в количестве C_n^2 [3].

Зная коэффициент мощности для отдельных ЭТУ и используя приведенные выше формулы, можно определить $q_c(Q_c)$, $q_{эф}(Q_{эф})$, $Dq(DQ)$, $\sigma q(\sigma Q)$, $s_c(S_c)$, $s_{эф}(S_{эф})$, $Ds(DS)$, $\sigma s(\sigma S)$ для реактивной и полной нагрузок индивидуальных и групповых графиков.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется электроприемником и потребителем электроэнергии?
2. Назовите и объясните показатели, характеризующие ЭТУ как потребителя электроэнергии.
3. Назначение индивидуальных и групповых графиков электрической нагрузки.
4. Показать и дать объяснение характерным индивидуальным графикам ЭТУ.
5. Что влияет на формирование групповых графиков нагрузки?
6. Какими показателями характеризуются индивидуальные графики нагрузки?
7. Какими показателями характеризуются групповые графики нагрузки?
8. Как определяются средняя и эффективная нагрузки, а также дисперсия и среднее квадратичное отклонение для индивидуальных и групповых графиков?

2 РАСЧЕТНАЯ НАГРУЗКА И МЕТОДЫ ЕЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

2.1 Понятие расчетной нагрузки

Электрические нагрузки характеризуют потребление электроэнергии отдельными ЭТУ или группой ЭТУ.

Правильное определение ожидаемых электрических нагрузок при проектировании является основой для рационального электроснабжения ЭТУ и промышленного предприятия в целом. От их значения зависит выбор всех токоведущих элементов и аппаратов, а также технико-экономические показатели проектируемой системы электроснабжения (СЭС).

Определяют два вида расчетной нагрузки: по нагреву и кратковременную (пиковую).

Расчетной нагрузкой по допустимому нагреву (P_p , Q_p , S_p , I_p) называется такая длительная, неизменная во времени нагрузка, которая вызывает такой же перегрев проводников над окружающей температурой или тепловой износ изоляции, как и реальная переменная во времени нагрузка. Она служит для выбора сечения токоведущих частей по нагреву и экономической плотности тока, определения потерь и отклонений напряжения, потерь мощности в сетях, выбора мощности трансформаторов, преобразовательных установок и компенсирующих устройств, расчета защиты.

Для групп ЭТУ, работающих в длительном режиме работы (ПС, ДСП, ЭШП и др.), за расчетную нагрузку принимают *получасовой максимум средней нагрузки* за наиболее загруженную смену [2].

Для ЭТУ, длительность цикла которой не превосходит трех постоянных времени нагрева элемента сети, расчетная нагрузка может быть принята равной *эффективной (среднеквадратичной)* нагрузке.

Пиковой кратковременной нагрузкой называют максимальную нагрузку за некоторый малый интервал времени.

Выбор интервала времени, к которому относится понятие пика, определяется конкретными условиями поставленной задачи. Например, для оценки влияния работы ЭТУ на колебания освещенности ламп накаливания необходимо определить пиковую нагрузку за интервал 1-2 с. Для оценки уровня напряжения на выводах машин точечной контактной сварки может потребоваться значение пика за интервал менее 1 с [11].

Пиковая нагрузка характеризуется частотой появления, что связано с требованиями качества электроэнергии.

Величина расчетной пиковой нагрузки используется для расчета потерь и колебаний напряжения, выбора плавких вставок предохранителей, расчета тока срабатывания устройств релейной защиты.

2.2 Определение расчетной нагрузки по нагреву от трехфазных ЭТУ длительного режима работы

В общем случае для одиночных ЭТУ длительного режима работы, расчетная нагрузка по нагреву принимается равной их номинальной мощности.

$$P_p = P_{ном};$$

$$Q_p = Q_{ном} = P_{ном} \cdot \operatorname{tg} \varphi; \quad (2.1)$$

$$S_p = P_{ном} / \cos \varphi.$$

При известных коэффициентах загрузки k_z , расчетная нагрузка отдельных ЭТУ определяется по следующим выражениям:

$$P_p = k_z \cdot P_{ном};$$

$$Q_p = k_z \cdot Q_{ном} = k_z \cdot P_{ном} \cdot \operatorname{tg} \varphi; \quad (2.2)$$

$$S_p = P_p / \cos \varphi = k_z \cdot P_{ном} / \cos \varphi.$$

В соответствии с [14] расчетная нагрузка по нагреву для группы ЭТУ длительного режима работы определяется по формуле

$$P_p = K_p \cdot P_c, \quad (2.3)$$

где K_p – групповой коэффициент расчетной мощности;

P_c – средняя активная мощность группы ЭТУ за наиболее загруженную смену;

$$P_c = \sum_{i=1}^n P_{c,i} = \sum_{i=1}^n k_{u,i} P_{ном,i}, \quad (2.4)$$

где n – число ЭТУ в рассматриваемой группе;

$P_{c,i}$ – средняя нагрузка i -ой ЭТУ за наиболее загруженную смену;

$k_{u,i}$, $P_{ном,i}$ – коэффициент использования и номинальная мощность i -ой ЭТУ, причем для ЭТУ, работающих в режиме ПКР, паспортная мощность $P_{пасп}$ приводится к номинальной по формуле (1.1).

Величина K_p определяется по табл. 2.1, в зависимости от значения группового коэффициента использования K_u за наиболее загруженную смену и эффективного числа $n_{эф}$ ЭТУ в группе:

$$K_u = P_c / \sum_{i=1}^n P_{ном,i}, \quad (2.5)$$

$$n_{эф} = \left(\sum_{i=1}^n P_{ном,i} \right)^2 / \left(\sum_{i=1}^n P_{ном,i}^2 \right). \quad (2.6)$$

Таблица 2.1 – Значения коэффициентов расчетной нагрузки K_p для питающих сетей напряжением до 1000 В

| n_{Σ} | Коэффициент использования K_{Σ} | | | | | | | | |
|--------------|--|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 |
| 1 | 8,00 | 5,33 | 4,00 | 2,67 | 2,00 | 1,60 | 1,33 | 1,14 | 1,0 |
| 2 | 6,22 | 4,33 | 3,39 | 2,45 | 1,98 | 1,60 | 1,33 | 1,14 | 1,0 |
| 3 | 4,05 | 2,89 | 2,31 | 1,74 | 1,45 | 1,34 | 1,22 | 1,14 | 1,0 |
| 4 | 3,24 | 2,35 | 1,91 | 1,47 | 1,25 | 1,21 | 1,12 | 1,06 | 1,0 |
| 5 | 2,84 | 2,09 | 1,72 | 1,35 | 1,16 | 1,16 | 1,08 | 1,03 | 1,0 |
| 6 | 2,64 | 1,96 | 1,62 | 1,28 | 1,14 | 1,13 | 1,06 | 1,01 | 1,0 |
| 7 | 2,49 | 1,86 | 1,54 | 1,23 | 1,12 | 1,10 | 1,04 | 1,0 | 1,0 |
| 8 | 2,37 | 1,78 | 1,48 | 1,19 | 1,10 | 1,08 | 1,02 | 1,0 | 1,0 |
| 9 | 2,27 | 1,71 | 1,43 | 1,16 | 1,09 | 1,07 | 1,01 | 1,0 | 1,0 |
| 10 | 2,18 | 1,65 | 1,39 | 1,13 | 1,07 | 1,05 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 11 | 2,11 | 1,61 | 1,35 | 1,1 | 1,06 | 1,04 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 12 | 2,04 | 1,56 | 1,32 | 1,08 | 1,05 | 1,03 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 13 | 1,99 | 1,52 | 1,29 | 1,06 | 1,04 | 1,01 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 14 | 1,94 | 1,49 | 1,27 | 1,05 | 1,02 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 15 | 1,89 | 1,46 | 1,25 | 1,03 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 16 | 1,85 | 1,43 | 1,23 | 1,02 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 17 | 1,81 | 1,41 | 1,21 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 18 | 1,78 | 1,39 | 1,19 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 19 | 1,75 | 1,36 | 1,17 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 20 | 1,72 | 1,35 | 1,16 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 21 | 1,69 | 1,33 | 1,15 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 22 | 1,67 | 1,31 | 1,13 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 23 | 1,64 | 1,30 | 1,12 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 24 | 1,62 | 1,28 | 1,11 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 25 | 1,60 | 1,27 | 1,1 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 30 | 1,51 | 1,21 | 1,05 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 35 | 1,44 | 1,16 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 40 | 1,40 | 1,13 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 45 | 1,35 | 1,1 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 50 | 1,30 | 1,07 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 60 | 1,25 | 1,03 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 70 | 1,20 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 80 | 1,16 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 90 | 1,13 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 100 | 1,10 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |

При числе ЭТУ в группе четыре и более, допускается $n_{эф}$ считать равным фактическому n при отношении [2]:

$$m = P_{ном, max} / P_{ном, min} \leq 3, \quad (2.7)$$

где $P_{ном, max}$, $P_{ном, min}$ – номинальные мощности наибольшей и наименьшей по мощности ЭТУ.

При $m > 3$ и $K_u > 0,2$, $n_{эф}$ можно определить по более простой формуле [2]:

$$n_{эф} = 2 \sum_{i=1}^n P_{ном,i} / P_{ном, max}. \quad (2.8)$$

Когда найденное по этой формуле $n_{эф}$ окажется большим, чем фактическое, следует принять $n_{эф} = n$.

Расчетная реактивная нагрузка группы ЭТУ определяется из выражений [2]:

$$\begin{aligned} Q_p &= 1,1 Q_c \text{ при } n_{эф} \leq 10, \\ Q_p &= Q_c \text{ при } n_{эф} > 10, \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\text{где } Q_c = \sum_{i=1}^n k_{\cos \varphi} \cdot P_{ном,i} \cdot \operatorname{tg} \varphi_i.$$

Здесь $\operatorname{tg} \varphi_i$ – тангенс угла φ i -ой ЭТУ.

Расчетная полная нагрузка:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} \quad (2.10)$$

а расчетный ток:

$$I_p = S_p / (\sqrt{3} \cdot U_{ном}). \quad (2.11)$$

При наличии данных об удельных расходах электрической энергии $a_{уд}$ среднюю нагрузку i -ой ЭТУ можно определить по формуле:

$$P_{c,i} = a_{уд,i} \cdot P_{см,i} / T_{см}, \quad (2.12)$$

где $P_{см}$ – выпуск продукции i -ой ЭТУ за смену;

$T_{см}$ – продолжительность смены.

Пример 2.1 Определить расчетную нагрузку по нагреву для группы ЭТУ цеха сушки изоляции электрических машин. Исходные данные и расчет приведены в табл.2.2

Таблица 2.2- Пример определения расчетной нагрузки

| Группа ЭТУ | n , шт | $P_{ном}$ кВт | $P_{ном \Sigma}$ кВт | K_u | $\frac{\cos \varphi}{\operatorname{tg} \varphi}$ | $P_{см}$ кВт | $Q_{см}$ квар | $n_{эф}$ шт | K_p |
|---------------------|----------|---------------|----------------------|-------|--|--------------|---------------|-------------|-------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Печи сопротивления: | | | | | | | | | |
| камерные: | | | | | | | | | |
| СН0-6.12.4/10-И2 | 2 | 71 | 142 | 0,68 | 1/0 | 97 | 0 | - | - |
| СН3-6.12.4/10-М1 | 3 | 58 | 174 | 0,66 | 1/0 | 115 | 0 | - | - |

Продолжение таблицы 2.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------------------------|----|-----|-------|------|-----------|-----|----|---|----|
| конвейерные: | | | | | | | | | |
| СКЗ-4.30.1/9И4 | 1 | 102 | 102 | 0,71 | 1/0 | 72 | 0 | - | - |
| СКЗ-8.40.1/7И2 | 1 | 157 | 157 | 0,76 | 1/0 | 119 | 0 | - | - |
| Двигатель вытяжного вентилатора: | 7 | 5,5 | 38,5 | 0,8 | 0,8/0,75 | 31 | 23 | - | - |
| Двигатель конвейера | 2 | 10 | 20 | 0,8 | 0,85/0,62 | 16 | 10 | - | - |
| Итого: | 16 | - | 633,5 | 0,71 | - | 450 | 33 | 8 | 1 |

Используя формулу (2.5) и (2.6), находим $K_u=0,71$ и $n_{эф}=8$.

Для $n_{эф}=8$ и $K_u=0,71$ $K_p=1$. (табл. 2.1)

По формулам (2.2), (2.7) и (2.9), определяем расчетную нагрузку:

$$P_p = 1 \cdot 450 = 450 \text{ кВт}; Q_p = 1,1 \cdot 33 = 36 \text{ квар}; S_p = \sqrt{450^2 + 36^2} = 451 \text{ кВА}.$$

2.3 Определение расчетных нагрузок по нагреву от трехфазных ЭТУ повторно-кратковременного режима работы

За расчетную нагрузку по нагреву одиночных ЭТУ повторно-кратковременного режима работы принимается эффективная нагрузка, определяемая по (1.28):

$$\begin{aligned} P_p &= P_{эф} = k_z \cdot P_{нач} \cdot \sqrt{k_g}; \\ q_p &= q_{эф} = k_z \cdot P_{нач} \cdot \sqrt{k_g} \cdot \lg \varphi; \\ s_p &= P_p / \cos \varphi = k_z \cdot P_{нач} \cdot \sqrt{k_g} / \cos \varphi. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Здесь k_g (аналогично $ПВ$), $P_{нач}$, $\cos \varphi$ - коэффициент включения, паспортная активная мощность и коэффициент мощности ЭТУ, соответственно.

Расчет по эффективной нагрузке допустим при небольшой дисперсии, в противном случае, для повышения значения расчетной нагрузки, вводится поправочный коэффициент. Согласно [10] расчетная нагрузка определяется по формуле:

$$P_p = P_{эф} / 0,875 \quad (2.14)$$

при этом погрешность в определении P_p во всех случаях не будет превышать 10%.

Расчетная нагрузка по нагреву группы независимых трехфазных ЭТУ повторно-кратковременного режима работы равна эффективной нагрузке.

$$\begin{aligned} P_p &= P_{эф} = \sqrt{P_c^2 + DP}; \\ Q_p &= Q_{эф} = \sqrt{Q_c^2 + DQ}; \\ S_p &= S_{эф} = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}, \end{aligned} \quad (2.15)$$

где $P_c(Q_c)$ - суммарная средняя активная (реактивная) нагрузка за наиболее нагруженную смену;

$DP(DQ)$ - дисперсия суммарной активной (реактивной) нагрузки.

Величины P_c , Q_c , DP и DQ определяют по формулам аналогичным (1.25), (1.32), (1.33):

$$\begin{aligned} P_c &= \sum_{i=1}^n P_{c,i} = \sum_{i=1}^n k_{g,i} \cdot k_{z,i} \cdot P_{нач,i}; \\ Q_c &= \sum_{i=1}^n q_{c,i} = \sum_{i=1}^n k_{g,i} \cdot k_{z,i} \cdot P_{нач,i} \cdot \lg \varphi_i; \\ DP &= \sum_{i=1}^n DP_i = \sum_{i=1}^n k_{g,i} (1 - k_{g,i}) \cdot (k_{z,i} \cdot P_{нач,i})^2; \\ DQ &= \sum_{i=1}^n DQ_i = \sum_{i=1}^n k_{g,i} (1 - k_{g,i}) \cdot (k_{z,i} \cdot P_{нач,i} \cdot \lg \varphi_i)^2, \end{aligned} \quad (2.16)$$

где n - количество ЭТУ в рассматриваемой группе.

Если режим работы ЭТУ задан относительной продолжительностью включения ($ПВ$), то в формулы (2.13) и (2.16) вместо k_g подставляют $ПВ$.

Пример 2.2. Определить расчетную нагрузку по нагреву аппарата для дуговой сварки, имеющего следующие данные: $P_{нач}=12$ кВт; $k_z=0,95$, $ПВ_{нач}=60\%$, $\cos \varphi=0,65$.

По формулам (2.14) с учетом (2.13), находим:

$$P_p = 0,95 \cdot 12 \cdot \sqrt{0,6 / 0,875} = 10,1 \text{ кВт}, Q_p = 10,1 \cdot 1,17 = 11,8 \text{ квар}, S_p = 10,1 / 0,65 = 15,5 \text{ кВА}.$$

Пример 2.3. Определить расчетную нагрузку по нагреву для пяти трехфазных печей сопротивления, работающих с $k_z=1$.

Исходные для расчета данные:

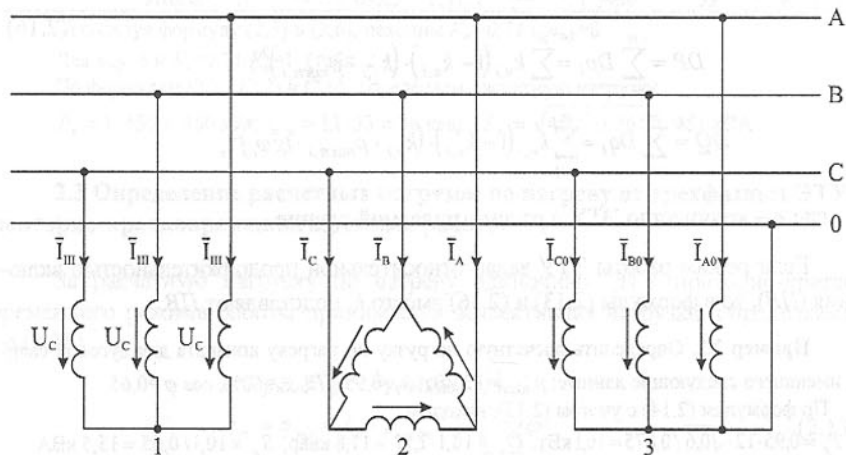
$$\begin{aligned} P_{ном1} &= 100 \text{ кВт}, & k_g &= 0,35, & \cos \varphi &= 0,9, & (\lg \varphi &= 0,48), \\ P_{ном2} &= 200 \text{ кВт}, & k_g &= 0,30, & \cos \varphi &= 0,85, & (\lg \varphi &= 0,62), \\ S_{ном3} &= 500 \text{ кВА}, & k_g &= 0,50, & \cos \varphi &= 0,95, & (\lg \varphi &= 0,33), \\ S_{ном4} &= 160 \text{ кВА}, & k_g &= 0,45, & \cos \varphi &= 0,9, & (\lg \varphi &= 0,48), \\ S_{ном5} &= 160 \text{ кВА}, & k_g &= 0,45, & \cos \varphi &= 0,9, & (\lg \varphi &= 0,48). \end{aligned}$$

По формулам (2.15-2.16), находим:

$$\begin{aligned} P_c &= 100 \cdot 0,35 + 200 \cdot 0,3 + 500 \cdot 0,95 \cdot 0,5 + 2 \cdot (160 \cdot 0,9 \cdot 0,45) = 462 \text{ кВт}, \\ Q_c &= 100 \cdot 0,48 \cdot 0,35 + 200 \cdot 0,62 \cdot 0,3 + 500 \cdot 0,95 \cdot 0,33 \cdot 0,5 + 2 \cdot (160 \cdot 0,9 \cdot 0,48 \cdot 0,45) = 195 \text{ квар}, \\ DP &= 100^2 \cdot 0,35(1-0,35) + 200^2 \cdot 0,3(1-0,3) + (500 \cdot 0,95)^2 \cdot 0,5(1-0,5) + \\ &+ 2 \cdot [(160 \cdot 0,9)^2 \cdot 0,45(1-0,45)] = 77345 \text{ кВт}^2, \\ DQ &= (100 \cdot 0,48)^2 \cdot 0,35(1-0,35) + (200 \cdot 0,62)^2 \cdot 0,3(1-0,3) + (500 \cdot 0,95 \cdot 0,33)^2 \cdot 0,5(1-0,5) + \\ &+ 2 \cdot [(160 \cdot 0,9 \cdot 0,48)^2 \cdot 0,45(1-0,45)] = 12261 \text{ квар}^2, \\ P_p &= P_{эф} = \sqrt{462^2 + 77345} = 539 \text{ кВт}, Q_p = Q_{эф} = \sqrt{195^2 + 12261} = 224 \text{ квар}, \\ S_p &= \sqrt{539^2 + 224^2} = 584 \text{ кВА}. \end{aligned}$$

2.4 Определение расчетных нагрузок по нагреву от однофазных ЭТУ длительного режима работы

В современном производстве все более широкое применение находят как трехфазные, так и однофазные ЭТУ, включаемые на линейное или фазное напряжение (установки дуговой сварки, однофазные ДСП косвенного нагрева, печи сопротивления, установки ЭСП и др.) рис.2.1.



1-трехфазные ЭТУ; 2-однофазные ЭТУ, включаемые на линейное напряжения сети; 3- однофазные ЭТУ, включаемые на фазное напряжения сети

Рисунок 2.1 – Схемы включения трехфазных и однофазных ЭТУ

Однофазные ЭТУ, включенные на фазные и линейные напряжения и распределенные по фазам с неравномерностью не выше 15% по отношению к общей мощности трехфазных и однофазных ЭТУ в группе, учитываются как трехфазные ЭТУ той же суммарной мощности.

На практике равномерное распределение нагрузки однофазных ЭТУ по фазам трехфазной сети часто оказывается невозможным, например при включении одной или двух ЭТУ на фазное или линейное напряжение, а также при наличии мощных однофазных ЭТУ, создающих неравномерность нагрузки, превышающую 15%. В этих случаях вводится понятие *условной*, или *эквивалентной*, трехфазной мощности.

При числе однофазных ЭТУ до трех включительно условная трехфазная номинальная мощность $P_{ном.у}$ определяется упрощенным способом:

а) при включении ЭТУ на фазное напряжение 220 В при трехфазной системе 380/220 В

$$P_{ном.у} = 3P_{ном.м.ф}; \quad (2.17)$$

б) при включении ЭТУ на линейное напряжение

- при одной ЭТУ

$$P_{ном.у} = \sqrt{3}P_{ном.л}; \quad (2.18)$$

- при двух и трех ЭТУ

$$P_{ном.у} = 3P_{ном.м.ф}; \quad (2.19)$$

где $P_{ном.м.ф}$ – номинальная мощность ЭТУ наиболее загруженной фазы, кВт;
 $P_{ном.л}$ – номинальная мощность ЭТУ, включенной на линейное напряжение, кВт.

Условная трехфазная номинальная мощность $P_{ном.у}$ может быть определена и по мощности двух плеч $P_{ном1}$ и $P_{ном2}$ прилегающих к наиболее нагруженной фазе, по формуле, предложенной Ю. Л. Мукосеевым [2]:

$$P_{ном.у} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{P_{ном1}^2 + P_{ном2}^2 + P_{ном1} \cdot P_{ном2}}. \quad (2.20)$$

Нагрузки отдельных фаз при включении однофазных ЭТУ на линейное напряжение определяются как полусуммы двух плеч, прилегающих к данной фазе:

$$\begin{aligned} P_a &= (P_{ав} + P_{са})/2; \\ P_b &= (P_{ав} + P_{вс})/2; \\ P_c &= (P_{са} + P_{вс})/2. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Неравномерность нагрузки по фазам, по расчетному узлу, определяется по формуле:

$$\Delta P_{ном.р} = 100(P_{ном.макс.ф} - P_{ном.мин.ф}) / P_{ном.мин.ф}, \quad (2.22)$$

где $P_{ном.макс.ф}$ – активная нагрузка наиболее нагруженной фазы, кВт;

$P_{ном.мин.ф}$ – активная нагрузка наименее нагруженной фазы, кВт.

Пример 2.4. Один сварочный трансформатор включен на фазное напряжение: $S_{насп}=75$ кВА; $PB_{насп}=0,6$; $\cos \varphi_{насп}=0,5$. Определить значение $P_{ном.у}$.

$P_{ном.м.ф} = S_{насп} \cdot \sqrt{PB_{насп}} \cdot \cos \varphi_{насп} = 75 \cdot \sqrt{0,6} \cdot 0,5 = 29$ кВт
 по формуле (2.17):

$$P_{ном.у} = 3 \cdot 29 = 87 \text{ кВт}$$

При включении двух или трех таких же трансформаторов, но в разные фазы, $P_{ном.у}=87$ кВт.

Пример 2.5. Три однофазные печи сопротивления мощностью 20,30 и 80 кВА включены соответственно в фазы А, В и С. Определить значение $P_{ном.у}$.

Наиболее загруженной фазой является фаза С. Для нее $p_{ном.м.ф}=80$ кВт, следовательно, по формуле (2.17) $p_{ном.у} = 3 \cdot 80 = 240$ кВт.

Пример 2.6. Сварочный трансформатор для дуговой сварки мощностью $S_{насп}=100$ кВА; $ПВ_{насп}=50\%$; $\cos\phi_{насп}=0,6$ включен в одно плечо трехфазной сети 380/220 В. Определить значение $p_{ном.у}$.

$p_{ном.л} = S_{насп} \cdot \sqrt{ПВ_{насп}} \cdot \cos\phi_{насп} = 100 \cdot \sqrt{0,5} \cdot 0,6 = 42,4$ кВт
по формуле (2.18)

$$p_{ном.у} = \sqrt{3} \cdot p_{ном.л} = \sqrt{3} \cdot 42,4 = 73,5 \text{ кВт.}$$

Пример 2.7. Два сварочных трансформатора мощностью соответственно $S_{насп1}=100$ кВА; $ПВ_{насп1}=50\%$; $\cos\phi_{насп1}=0,6$; второй $S_{насп2}=80$ кВА; $ПВ_{насп2}=60\%$; $\cos\phi_{насп2}=0,53$ включены на линейное напряжение $U_{ав}$ и $U_{са}$. Определить значение $p_{ном.у}$.

Приводим номинальные мощности трансформаторов к $ПВ=100\%$

$$p_{ном.ав} = 100 \sqrt{0,5} \cdot 0,6 = 42,4 \text{ кВт;}$$

$$p_{ном.са} = 80 \sqrt{0,6} \cdot 0,53 = 32,8 \text{ кВт.}$$

По формулам (2.21), определяем нагрузки в фазах А, В и С.

$p_a = (42,4 + 32,8)/2 = 37,6$ кВт; $p_b = 42,4/2 = 21,2$ кВт; $p_c = 32,8/2 = 16,4$ кВт. Наиболее нагруженной фазой является фаза А: $p_a = 37,6$ кВт, следовательно по формуле (2.19)

$$p_{ном.у} = 3 \cdot 37,6 = 112,8 \text{ кВт.}$$

Пример 2.8. В ту же сеть, что в примере 2.7, но в третье плечо между фазами ВС включен дополнительно третий трансформатор с паспортной мощностью $S_{насп3}=30$ кВА; $ПВ_{насп3}=65\%$; $\cos\phi_{насп3}=0,66$.

Определить значение $p_{ном.у}$.

Определим $p_{ном.вс}$.

$$p_{ном.вс} = 30 \sqrt{0,65} \cdot 0,66 = 16 \text{ кВт;}$$

определяем нагрузку наиболее загруженной фазы:

$$p_a = 37,6 \text{ кВт; } p_b = (42,4 + 16)/2 = 29,2 \text{ кВт; } p_c = (16 + 32,8)/2 = 24,4 \text{ кВт.}$$

$$p_{ном.у} = 3 \cdot 37,6 = 112,8 \text{ кВт.}$$

Используя формулу (2.20), определим $p_{ном.у}$ в наиболее нагруженной фазе А:

$$p_{ном.у} = \sqrt{3 \sqrt{42,4^2 + 32,8^2 + 42,4 \cdot 32,8}} = 113,1 \text{ кВт.}$$

Результаты расчета по (2.19) и (2.20) практически совпадают. Однако формула (2.20) не дает возможности найти наиболее загруженную фазу, что бывает необходимым при определении степени неравномерности нагрузки фаз.

Расчетная нагрузка по нагреву группы однофазных ЭТУ при числе их более трех определяется в соответствии с методикой, изложенной в п.2.2 с использованием формул (2.3) - (2.11). Однако в формулах (2.6) и (2.8) эффективное число однофазных ЭТУ следует принимать вдвое меньшим, чем трехфазных:

при точном расчете

$$n_{эф} = (\sum p_{ном.о})^2 / (3 \sum p_{ном.о}^2); \quad (2.23)$$

по приближенной формуле (2.8)

$$n_{эф} = 2 \sum p_{ном.о} / (3 \cdot p_{ном.о.макс}), \quad (2.24)$$

где $p_{ном.о.макс}$ - наибольшая мощность однофазной ЭТУ в рассматриваемой группе.

Групповой коэффициент использования K_u для наиболее нагруженной фазы определяется соотношением:

$$K_u = \frac{K_{u1} p_{ном1} + K_{u2} p_{ном2}}{p_{ном1} + p_{ном2}}, \quad (2.25)$$

в котором индексы 1 и 2 относятся к плечам, прилегающим к наиболее нагруженной фазе.

Пример 2.9. В трехфазную сеть 380 В включены восемь однофазных печей сопротивления. Две ПС мощностью по 20 кВт и $k_{u1}=0,7$ подключены на напряжение фаз АВ; в плечо ВС - две печи по 40 кВт, $k_{u2}=0,8$; в плечо СА - три печи мощностью по 10 кВт и одна печь 30 кВт при $k_{u3}=0,9$. Коэффициент мощности всех печей равен единице. Определить расчетную нагрузку по нагреву.

Применяя формулы (2.21), получим номинальные мощности по отдельным фазам:

$$p_a = \frac{2 \cdot 20 + (3 \cdot 10 + 30)}{2} = 50 \text{ кВт;}$$

$$p_b = \frac{2 \cdot 20 + 2 \cdot 40}{2} = 60 \text{ кВт;}$$

$$p_c = \frac{2 \cdot 40 + (3 \cdot 10 + 30)}{2} = 70 \text{ кВт.}$$

Условная номинальная мощность:

$$p_{ном.у} = 3 \cdot 70 = 210 \text{ кВт.}$$

Коэффициент использования для наиболее загруженной фазы С находится по формуле (2.25):

$$K_u = \frac{2 \cdot 40 \cdot 0,8 + (3 \cdot 10 + 30) \cdot 0,9}{2 \cdot 40 + (3 \cdot 10 + 30)} = 0,84.$$

Среднесменная условная (трехфазная) мощность по формуле (2.4):

$$p_{с.у} = K_u \cdot p_{ном.у} = 0,84 \cdot 210 = 176,4 \text{ кВт.}$$

Общее число однофазных ЭТУ, включенных в сеть, восемь, общая их мощность 180 кВт, а мощность наибольшей из них 40 кВт.

По формуле (2.24):

$$n_3 = 2 \cdot 180 / (3 \cdot 40) = 3.$$

По табл. 2.1 для $K_u=0,84$ и $n_{эф}=3$ $k_p=1$, тогда:

$$P_p = k_p \cdot P_{c,y} = 1 \cdot 176,4 = 176,4 \text{ кВт.}$$

$$I_p = P_p / (\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot \cos \varphi) = 176,4 / (1,73 \cdot 0,38 \cdot 1) = 268,3 \text{ А.}$$

При числе однофазных ЭТУ более трех при различных k_u и $\cos \varphi$, а также при включении их на фазные и линейные напряжения определение расчетной нагрузки по нагреву производится следующим образом: все однофазные ЭТУ, включенные на фазное напряжение (фаза-нуль) и на линейное напряжение, распределяются по возможности равномерно по фазам. Общая средняя нагрузка по отдельным фазам определяется суммированием средних однофазных нагрузок одной фазы (фаза-нуль) и средних однофазных нагрузок ЭТУ, включенных на линейное напряжение с соответствующим приведением этих нагрузок по табл.2.3 к нагрузкам одной фазы и фазному напряжению.

Таблица 2.3 – Коэффициенты приведения однофазной нагрузки, включенной на линейное напряжение, к нагрузке, отнесенной к одной фазе трехфазного тока и фазному напряжению

| Коэффициенты приведения | $\cos \varphi$ | | | | | | |
|-----------------------------------|----------------|------|------|------|------|-------|-------|
| | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 |
| $P_{(ав)A}, P_{(ав)B}, P_{(ав)C}$ | 1,17 | 1 | 0,89 | 0,8 | 0,72 | 0,64 | 0,5 |
| $P_{(ав)B}, P_{(ав)C}, P_{(ав)A}$ | -0,17 | 0 | 0,11 | 0,2 | 0,28 | 0,36 | 0,5 |
| $q_{(ав)A}, q_{(ав)B}, q_{(ав)C}$ | 0,86 | 0,58 | 0,38 | 0,22 | 0,09 | -0,05 | -0,29 |
| $q_{(ав)B}, q_{(ав)C}, q_{(ав)A}$ | 1,44 | 1,16 | 0,96 | 0,8 | 0,67 | 0,53 | 0,29 |

Например среднюю нагрузку P_c и Q_c для фазы А можно определить по формулам:

$$P_{c,A} = \sum_{i=1}^{n_{AB}} k_{ui} P_{AB,i} P_{(ав)A,i} + \sum_{r=1}^{n_{CA}} k_{ur} P_{CA,r} P_{(ca)A,r} + \sum_{s=1}^{n_A} k_{us} P_{A0,s}; \quad (2.26)$$

$$Q_{c,A} = \sum_{i=1}^{n_{AB}} k_{ui} P_{AB,i} q_{(ав)A,i} + \sum_{r=1}^{n_{CA}} k_{ur} P_{CA,r} q_{(ca)A,r} + \sum_{s=1}^{n_A} k_{us} P_{A0,s} \cdot \lg \varphi_{A0,s}; \quad (2.27)$$

где k_u – соответствующие коэффициенты использования;

P_{AB}, P_{CA} – нагрузка, присоединенная на линейное напряжение между фазами А и В, В и С, соответственно;

P_{A0} – нагрузка, присоединенная на напряжение А (между фазным и нулевым проводом);

$\lg \varphi_{A0,s}$ – соответствует $\cos \varphi$ нагрузки фаза-нуль;

$P_{(ав)A}, P_{(ca)A}, q_{(ав)A}, q_{(ca)A}$ – коэффициенты приведения нагрузок, включенных на линейное напряжение АВ и СА к фазе А (табл.2.3).

Средние нагрузки P_c и Q_c для фаз В и С определяются аналогично (2.26) и (2.27).

Расчет заканчивается определением условных расчетных активной, реактивной и полной нагрузок и тока в наиболее нагруженной фазе. По величине расчетного тока выбираются сечения питающих линий и оборудование.

Пример 2.10. Определить расчетную активную и реактивную нагрузки по нагреву группы однофазных сварочных трансформаторов, включенных на фазное и линейное напряжение сети 380/220 В.

Исходные данные, порядок расчета и результаты приведены в табл.2.4.

В результате расчетов наиболее загруженной фазой оказалось фаза В, общая нагрузка которой составила:

$$P_{c,B} = 34 \text{ кВт; } Q_{c,B} = 51 \text{ квар; } \lg \varphi = Q_{c,B} / P_{c,B} = 51/34 = 1,5 \text{ и } \cos \varphi = 0,55.$$

Средневзвешенное значение K_u для фазы В, равно (формула 2.25):

$$K_u = \frac{P_{c,B}}{\frac{P_{AB} + P_{BC}}{2} + P_{B0}} = \frac{34}{\frac{70 + 62}{2} + 13} = 0,5.$$

Условная средняя трехфазная мощность от однофазных ЭТУ для наиболее загруженной фазы В равна:

$$P_c = 3 \cdot P_{c,B} = 3 \cdot 34 = 102 \text{ кВт;}$$

$$Q_c = P_{c,B} \cdot \lg \varphi = 102 \cdot 1,5 = 153 \text{ квар;}$$

$$n_{\varphi} = \frac{2 \cdot 225}{3 \cdot 35} \approx 4.$$

По таблице 2.1 для $n_{\varphi} = 4$ и $K_u = 0,5$, находим $k_p = 1,21$.

По формулам (2.3), (2.9), (2.10) определяем расчетную активную, реактивную и полную нагрузки:

$$P_p = 1,21 \cdot 102 = 126 \text{ кВт;}$$

$$Q_p = 1,1 \cdot 153 = 168 \text{ квар;}$$

$$S_p = \sqrt{126^2 + 168^2} = 210 \text{ кВА.}$$

Величина расчетного тока будет равна:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{208}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 319 \text{ А.}$$

При большом количестве совместно работающих однофазных и трехфазных ЭТУ или других электроприемников, расчетная активная и реактивная нагрузки будут определяться по формуле:

$$\begin{aligned} P_p &= P_{p,T} + P_{p,o}; \\ Q_p &= Q_{p,T} + Q_{p,o}; \end{aligned} \quad (2.28)$$

где $P_{p,T}$ ($Q_{p,T}$), $P_{p,o}$ ($Q_{p,o}$) – расчетная активная и реактивная нагрузка трехфазных и однофазных ЭТУ;

Таблица 2.4 – Определение однофазных нагрузок, включенных на фазное и линейное напряжение сети 380/220 В

| Сварочные трансформаторы с мощностью и ПВ | Установленная мощность, приведенная к ПВ=100% | Число приемников n | Установленная мощность однофазных приемников, включенных на линейное напряжение, кВт | | | Коэффициент приведения | | | | Установленная мощность однофазных приемников, включенных на фазное напряжение, кВт | | | Коэффициент использования | Коэффициент мощности $\cos \varphi$ | Средние нагрузки | | | | | | | | | | | | |
|--|---|--------------------|--|----|----|------------------------|------|------|----|--|----|-----|---------------------------|-------------------------------------|------------------|----|----|----|----|---|---|---|--|--|--|--|--|
| | | | AB | BC | CA | κ фазы | P | Q | A | B | C | A | | | B | C | A | B | C | A | B | C | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1. $S_{\text{мощ}}=76 \text{ кВА}$, $\text{ПВ}=60\%$, $U_H=380 \text{ В}$ $P_{\text{ном}} = 76 \cdot \sqrt{0,6 \cdot 0,6} = 35 \text{ кВт}$ | 140 | 4 | 70 | 35 | 35 | A | 0,89 | 0,38 | | | | 0,5 | $\frac{0,6}{1,33}$ | 31 | 4 | 2 | 13 | 34 | 17 | | | | | | | | |
| | | | | | | B | 0,11 | 0,96 | | | | | | 2 | 16 | 16 | 7 | 7 | | | | | | | | | |
| | | | | | | C | 0,11 | 0,96 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | A | 0,11 | 0,96 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2. $S_{\text{мощ}}=42 \text{ кВА}$, $\text{ПВ}=60\%$, $U_H=380 \text{ В}$ $P_{\text{ном}} = 42 \cdot \sqrt{0,6 \cdot 0,6} = 19 \text{ кВт}$ | 38 | 2 | | 19 | 19 | B | 0,89 | 0,38 | | | | 0,4 | $\frac{0,6}{1,33}$ | - | 7 | 1 | - | 3 | 7 | | | | | | | | |
| | | | | | | C | 0,11 | 0,96 | | | | | | 1 | - | 7 | - | 3 | | | | | | | | | |
| | | | | | | C | 0,89 | 0,38 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | A | 0,11 | 0,96 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3. $S_{\text{мощ}}=20 \text{ кВА}$, $\text{ПВ}=65\%$, $U_H=380 \text{ В}$ $P_{\text{ном}} = 20 \cdot \sqrt{0,65 \cdot 0,5} = 8 \text{ кВт}$ | 8 | 1 | | 8 | 8 | B | 1 | 0,58 | | | | 0,5 | $\frac{0,5}{1,73}$ | - | 4 | 0 | - | 2 | 4 | | | | | | | | |
| | | | | | | C | 0 | 1,16 | | | | | | - | - | - | - | - | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4. $S_{\text{мощ}}=32 \text{ кВА}$, $\text{ПВ}=65\%$, $U_H=220 \text{ В}$ $P_{\text{ном}} = 32 \cdot \sqrt{0,65 \cdot 0,5} = 13 \text{ кВт}$ | 39 | 3 | | | | | | | 13 | 13 | 13 | 0,2 | $\frac{0,5}{1,73}$ | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Итого: | 225 | 10 | 70 | 62 | 54 | - | - | - | 13 | 13 | 13 | - | - | 37 | 34 | 29 | 42 | 51 | 43 | | | | | | | | |

2.5 Определение расчетной нагрузки дуговых сталеплавильных печей

Дуговые сталеплавильные печи условно делятся на печи малой емкости 0,5-12 т. с трансформаторами мощностью 0,4-8 МВА; средней емкости 15-50 т с трансформаторами мощностью 6-32 МВА; большой емкости 100-200 т (крупнотоннажные) с трансформаторами мощностью 25-125 МВА.

Дуговые сталеплавильные печи металлургических заводов работают круглые сутки непрерывно на протяжении большого числа плавов. Нагрузка ДСП непрерывно-циклическая. Цикличность характеризуется чередованием плавов с остановками печи на слив жидкого металла, заправку печи, заварку ее шихтой.

Из-за переменного характера нагрузки ДСП, создаваемого колебаниями токов электрических дуг, мощность фактически потребляемая печью, колеблется около среднего значения, которое определяется уставкой тока регулирования. Наиболее сильно нагрузка изменяется в период расплавления и в начале периода окисления. Поэтому с точностью, достаточной для практических целей, за расчетную по нагреву нагрузку можно принять наибольшее среднее значение мощности за трехкратную постоянную времени T_0 нагрева элементов сети ($3T_0=30$ мин).

Расчетная нагрузка отдельной ДСП определяется по формуле:

$$\begin{aligned}
 P_{pr} &= K_{\text{макс}}(30) P \cdot P_{cp}; \\
 Q_{pr} &= K_{\text{макс}}(30) Q \cdot q_{cp}; \\
 S_p &= \sqrt{P_p^2 + Q_p^2},
 \end{aligned} \quad (2.28)$$

где $K_{\text{макс}}(30)P$, $K_{\text{макс}}(30)Q$ – значения коэффициентов 30-минутного максимума активной и реактивной нагрузки соответственно [8], находятся по табл. 2.5;

P_c , q_c – средняя активная и реактивная нагрузки печи за цикл плавки.

Таблица 2.5 – Средние значения коэффициентов пикового и 30-минутного максимума активной и реактивной нагрузки

| Число печей в группе | $K_{\text{макс}}P$ | $K_{\text{макс}}Q$ | $K_{\text{макс}}(30)P$ | $K_{\text{макс}}(30)Q$ |
|----------------------|--------------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| 1 | 1,98 | 2,17 | 1,98 | 2,17 |
| 2 | 1,85 | 1,99 | 1,61 | 1,70 |
| 3 | 1,82 | 1,94 | 1,51 | 1,58 |
| 4 | 1,74 | 1,84 | 1,42 | 1,47 |
| 5 | 1,67 | 1,73 | 1,37 | 1,42 |
| 6 | 1,60 | 1,65 | 1,36 | 1,41 |
| 7 | 1,57 | 1,62 | 1,30 | 1,36 |
| 8 | 1,58 | 1,58 | 1,26 | 1,29 |

При наличии графика нагрузки ДСП за один цикл плавки t_H величину средней активной и реактивной нагрузки можно определить из соотношений

$$P_c = P_{pc} \cdot \varepsilon_{pc} + P_{ок} \cdot \varepsilon_{ок} + P_{вос} \cdot \varepsilon_{вос}; \quad (2.29)$$

$$q_c = P_{pc} \cdot \varepsilon_{pc} \cdot \lg \varphi_{pc} + P_{ок} \cdot \varepsilon_{ок} \cdot \lg \varphi_{ок} + P_{вос} \cdot \varepsilon_{вос} \cdot \lg \varphi_{вос},$$

где $P_{pc}, \lg \varphi_{pc}; P_{ок}, \lg \varphi_{ок}; P_{вос}, \lg \varphi_{вос}$ – потребляемая мощность и тангенс φ в период расплавления, окисления и восстановления, соответственно;

$\varepsilon_{pc}, \varepsilon_{ок}, \varepsilon_{вос}$ – относительная продолжительность этих периодов.

$$\varepsilon_{pc} = \frac{t_{pc}}{t_{\Sigma}}; \varepsilon_{ок} = \frac{t_{ок}}{t_{\Sigma}}; \varepsilon_{вос} = \frac{t_{вос}}{t_{\Sigma}}. \quad (2.30)$$

Здесь $t_{pc}, t_{ок}, t_{вос}$ – продолжительность периодов расплавления, окисления и восстановления.

Среднюю активную и реактивную нагрузки можно определить, используя модель графика ДСП (рис. 1.2), формулы (2.29) и данные табл. 2.6.

Таблица 2.6 – Средние показатели электрических режимов ДСП различной мощности [8]

| Тип печи | $S_{ном.тр.}$ МВА | за цикл плавки | | Периоды плавки печи | | | | | |
|------------------------|----------------------|----------------|----------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| | | K_{η} | $\cos \varphi$ | расплавление | | окисление | | восстановление | |
| | | | | ε_{pc} | $\cos \varphi_{pc}$ | $\varepsilon_{ок}$ | $\cos \varphi_{ок}$ | $\varepsilon_{вос}$ | $\cos \varphi_{вос}$ |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| ДСП-5 | 2,0 | 0,65 | 0,86 | 0,36 | 0,82 | 0,10 | 0,92 | 0,34 | 0,95 |
| ДСП-10 | 5,0 | 0,74 | 0,89 | 0,29 | 0,88 | 0,21 | 0,91 | 0,22 | 0,91 |
| ДСП-20 | 9,0 | 0,52 | 0,87 | 0,29 | 0,83 | 0,13 | 0,93 | 0,26 | 0,94 |
| ДСП-25 | 15,0 | 0,43 | 0,83 | 0,22 | 0,83 | 0,13 | 0,85 | 0,29 | 0,85 |
| ДСП-100 | 25,0 | 0,71 | 0,75 | 0,36 | 0,74 | 0,14 | 0,76 | 0,22 | 0,79 |
| ДСП-100 ^{*)} | 50,0 | 1,0 | 0,70 | 0,47 | 0,68 | 0,12 | 0,73 | 0,12 | 0,80 |
| ДСП-100 ^{**)} | 50,0 | 1,0 | 0,69 | 0,53 | 0,68 | 0,14 | 0,73 | 0,06 | 0,80 |

*) При плавке углеродистой стали

**) При плавке коррозионностойкой стали

В некоторых случаях, при отсутствии данных о режиме плавки, расчетная нагрузка по нагреву принимается равной номинальной мощности печного трансформатора.

Для группы ДСП расчетная нагрузка по нагреву определяется по формулам:

$$\begin{aligned} P_p &= k_{\max(30)P} \cdot P_c; \\ Q_p &= k_{\max(30)Q} \cdot Q_c; \\ S_p &= \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}, \end{aligned} \quad (2.31)$$

где P_c, Q_c – средняя групповая активная и реактивная нагрузки за наиболее загруженную смену;

$k_{\max(30)P}, k_{\max(30)Q}$ – коэффициенты получасового максимума активной и реактивной нагрузки (табл. 2.5).

$$\begin{aligned} P_c &= \sum_{i=1}^n P_{c,i} = \sum_{i=1}^n k_{\eta i} \cdot P_{\max,i}; \\ Q_c &= \sum_{i=1}^n q_{c,i} = \sum_{i=1}^n k_{\eta i} \cdot P_{\max,i} \cdot \lg \varphi_i, \end{aligned} \quad (2.32)$$

где P_{\max} – максимальная активная мощность, потребляемая i -й ДСП в период расплавления;

$k_{\eta i}, \lg \varphi_i$ – коэффициент использования печного трансформатора i -й ДСП за цикл плавки и тангенс φ , соответственно, (табл. 2.6).

Величины $P_{c,i}$ и $q_{c,i}$ можно определить также по формуле (2.29).

При совместной работе группы ДСП максимальные значения мощностей возникают при наложении режимов расплавления всех входящих в группу печей. Однако, при увеличении числа печей в группе вероятность совпадения периодов расплавления всех печей уменьшается. Это приводит к тому, что с ростом печей в группе пик нагрузки растет медленнее, чем средняя нагрузка, и коэффициент максимума снижается. Еще в большей степени это относится к 30-минутному максимуму нагрузки и коэффициенту 30-минутного максимума (табл. 2.5).

Пример 2.11. Определить расчетную нагрузку по нагреву для ДСП-25 с $S_{н.тр}=15$ МВА.

По формуле (1.21) и данным табл. 2.5 и 2.6, находим

$$P_c = 15 \cdot 0,83 \cdot 0,43 = 5,35 \text{ МВт};$$

$$q_c = 15 \cdot 0,43 \cdot 0,672 = 3,59 \text{ Мвар}.$$

По формуле (2.28) рассчитаем:

$$P_p = 1,98 \cdot 5,35 = 10,6 \text{ МВт}; q_p = 2,17 \cdot 3,59 = 7,8 \text{ Мвар}; s_p = \sqrt{10,6^2 + 7,8^2} = 13,2 \text{ МВА}.$$

Пример 2.12. Определить расчетную нагрузку по нагреву для ДСП-25 с $S_{н.тр}=15$ МВА, если дано:

$$P_{pc} = 9,64 \text{ МВт}, t_{pc} = 58 \text{ мин}, \cos \varphi_{pc} = 0,824; P_{ок} = 4,45 \text{ МВт}, t_{ок} = 34 \text{ мин}, \cos \varphi_{ок} = 0,848;$$

$$P_{вос} = 2,54 \text{ МВт}, t_{вос} = 77 \text{ мин}, \cos \varphi_{вос} = 0,846; t_{\Sigma} = 169 \text{ мин} [8].$$

По формулам (2.29) и (2.30), находим:

$$\varepsilon_{pc} = 58/169 = 0,34; \varepsilon_{ок} = 34/169 = 0,2; \varepsilon_{вос} = 77/169 = 0,46.$$

$$P_c = 9,64 \cdot 0,34 + 4,45 \cdot 0,2 + 2,54 \cdot 0,46 = 5,336 \text{ МВт};$$

$$q_c = 9,64 \cdot 0,34 \cdot 0,67 + 4,45 \cdot 0,2 \cdot 0,62 + 2,54 \cdot 0,46 \cdot 0,62 = 3,47 \text{ Мвар}.$$

$$P_p = 1,98 \cdot 5,336 = 10,6 \text{ МВт}; q_p = 2,17 \cdot 3,47 = 7,53 \text{ Мвар};$$

$$s_p = \sqrt{10,6^2 + 7,53^2} = 13 \text{ МВА}.$$

Пример 2.13. Используя данные табл. 2.5 и 2.6, формулы (2.29) и график нагрузки рис.1.2, найдем расчетную нагрузку по нагреву для ДСП-25 с $S_{н.тр}=15$ МВА.

$$P_{cp} = 1 \cdot 15 \cdot 0,83 \cdot 0,22 + 0,75 \cdot 15 \cdot 0,85 \cdot 0,13 + 0,45 \cdot 15 \cdot 0,85 \cdot 0,29 = 5,65 \text{ МВт};$$

$$q_c = 1 \cdot 15 \cdot 0,56 \cdot 0,22 + 0,75 \cdot 15 \cdot 0,53 \cdot 0,13 + 0,45 \cdot 15 \cdot 0,53 \cdot 0,29 = 3,66 \text{ Мвар};$$

$$P_p = 1,98 \cdot 5,65 = 11,2 \text{ МВт}; q_p = 2,17 \cdot 3,66 = 7,9 \text{ Мвар};$$

$$s_p = \sqrt{11,2^2 + 7,9^2} = 13,7 \text{ МВА}.$$

Результаты расчета в примерах 2.11, 2.12 и 2.13 практически одинаковы.

Пример 2.14. Определить расчетную нагрузку группы ДСП: ДСП-5 с $S_{н.тр}=2$ МВА; ДСП-10 с $S_{н.тр}=5$ МВА; ДСП-20 с $S_{н.тр}=9$ МВА и ДСП-25 с $S_{н.тр}=15$ МВА.

По формулам (2.31), (2.32) и данным таблиц 2.5 и 2.6, находим

$$P_c = \sum_{i=1}^4 P_{c,i} = 2 \cdot 0,65 \cdot 0,86 + 5 \cdot 0,74 \cdot 0,89 + 9 \cdot 0,52 \cdot 0,87 + 15 \cdot 0,43 \cdot 0,83 = 13,8 \text{ МВт};$$

$$Q_c = \sum_{i=1}^4 q_c = 2 \cdot 0,65 \cdot 0,51 + 5 \cdot 0,74 \cdot 0,46 + 9 \cdot 0,52 \cdot 0,49 + 15 \cdot 0,43 \cdot 0,56 = 8,3 \text{ Мвар};$$

$$P_p = 1,42 \cdot 13,8 = 19,6 \text{ МВт}; Q_p = 1,47 \cdot 8,3 = 12,2 \text{ Мвар};$$

$$S_p = \sqrt{19,6^2 + 12,2^2} = 23,1 \text{ МВА}.$$

Пример 2.15. Определить расчетную нагрузку группы ДСП (пример 2.14), если заданы их графики нагрузки:

ДСП-5: $P_{pc} = 1,78 \text{ МВт}; t_{pc} = 65 \text{ мин}; \cos \varphi_{pc} = 0,817; t_{\eta} = 162 \text{ мин}$

$P_{ок} = 0,79 \text{ МВт}; t_{ок} = 19 \text{ мин}; \cos \varphi_{ок} = 0,923;$

$P_{вос} = 0,53 \text{ МВт}; t_{вос} = 62 \text{ мин}; \cos \varphi_{вос} = 0,952;$

ДСП-10: $P_{pc} = 3,94 \text{ МВт}; t_{pc} = 76 \text{ мин}; \cos \varphi_{pc} = 0,875; t_{\eta} = 225 \text{ мин}$

$P_{ок} = 3,18 \text{ МВт}; t_{ок} = 54 \text{ мин}; \cos \varphi_{ок} = 0,908;$

$P_{вос} = 2,58 \text{ МВт}; t_{вос} = 56 \text{ мин}; \cos \varphi_{вос} = 0,905;$

ДСП-20: $P_{pc} = 6,44 \text{ МВт}; t_{pc} = 73 \text{ мин}; \cos \varphi_{pc} = 0,832; t_{\eta} = 205 \text{ мин}$

$P_{ок} = 3,41 \text{ МВт}; t_{ок} = 33 \text{ мин}; \cos \varphi_{ок} = 0,924;$

$P_{вос} = 1,77 \text{ МВт}; t_{вос} = 65 \text{ мин}; \cos \varphi_{вос} = 0,938;$

ДСП-25: $P_{pc} = 9,64 \text{ МВт}; t_{pc} = 58 \text{ мин}; \cos \varphi_{pc} = 0,824; t_{\eta} = 221 \text{ мин}$

$P_{ок} = 4,45 \text{ МВт}; t_{ок} = 34 \text{ мин}; \cos \varphi_{ок} = 0,848;$

$P_{вос} = 2,54 \text{ МВт}; t_{вос} = 77 \text{ мин}; \cos \varphi_{вос} = 0,832;$

По формулам (2.29)-(2.32), находим:

ДСП-5: $\varepsilon_{pc} = 65/162 = 0,40; \varepsilon_{ок} = 19/162 = 0,12; \varepsilon_{вос} = 62/162 = 0,38;$

$P_c = 1,78 \cdot 0,4 + 0,79 \cdot 0,12 + 0,53 \cdot 0,38 = 1,0 \text{ МВт};$

$q_c = 1,78 \cdot 0,4 + 0,79 \cdot 0,12 \cdot 0,42 + 0,53 \cdot 0,38 \cdot 0,32 = 0,6 \text{ Мвар};$

ДСП-10: $\varepsilon_{pc} = 76/225 = 0,34; \varepsilon_{ок} = 54/225 = 0,24; \varepsilon_{вос} = 56/225 = 0,25;$

$P_c = 3,94 \cdot 0,34 + 3,18 \cdot 0,24 + 2,58 \cdot 0,25 = 2,75 \text{ МВт};$

$q_c = 3,94 \cdot 0,34 \cdot 0,55 + 3,18 \cdot 0,24 \cdot 0,46 + 2,58 \cdot 0,25 \cdot 0,47 = 1,39 \text{ Мвар};$

ДСП-20: $\varepsilon_{pc} = 73/205 = 0,36; \varepsilon_{ок} = 33/205 = 0,16; \varepsilon_{вос} = 65/205 = 0,32;$

$P_c = 6,44 \cdot 0,36 + 3,41 \cdot 0,16 + 1,77 \cdot 0,32 = 3,43 \text{ МВт};$

$q_c = 6,44 \cdot 0,36 \cdot 0,67 + 3,41 \cdot 0,16 \cdot 0,41 + 1,77 \cdot 0,32 \cdot 0,37 = 1,98 \text{ Мвар};$

ДСП-25: $\varepsilon_{pc} = 58/221 = 0,26; \varepsilon_{ок} = 34/221 = 0,15; \varepsilon_{вос} = 77/221 = 0,35;$

$P_c = 9,64 \cdot 0,26 + 4,45 \cdot 0,15 + 2,54 \cdot 0,35 = 4,1 \text{ МВт};$

$q_c = 9,64 \cdot 0,26 \cdot 0,69 + 4,45 \cdot 0,15 \cdot 0,62 + 2,54 \cdot 0,35 \cdot 0,67 = 2,74 \text{ Мвар};$

$P_c = 1,0 + 2,75 + 3,43 + 4,1 = 11,28 \text{ МВт};$

$Q_c = 0,6 + 1,39 + 1,98 + 2,74 = 6,71 \text{ Мвар};$

$P_p = 1,42 \cdot 11,28 = 16 \text{ МВт}; Q_p = 1,47 \cdot 6,71 = 9,86 \text{ Мвар};$

$S_p = \sqrt{16^2 + 9,86^2} = 18,8 \text{ МВА}.$

Пример 2.16. Для условий примера 2.15 определить расчетную нагрузку, используя формулы (2.29), (2.31), (2.32), данные табл. 2.5 и 2.6 и график нагрузки ДСП (рис. 1.2).

ДСП-5: $P_c = 2 \cdot 0,82 \cdot 0,36 + 0,75 \cdot 2 \cdot 0,92 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,45 \cdot 0,95 \cdot 0,34 = 1 \text{ МВт};$

$q_c = 2 \cdot 0,57 \cdot 0,36 + 0,75 \cdot 2 \cdot 0,39 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,45 \cdot 0,31 \cdot 0,34 = 0,56 \text{ Мвар};$

ДСП-10: $P_c = 5 \cdot 0,88 \cdot 0,29 + 0,75 \cdot 5 \cdot 0,91 \cdot 0,21 + 0,45 \cdot 5 \cdot 0,91 \cdot 0,22 = 2,4 \text{ МВт};$

$q_c = 5 \cdot 0,47 \cdot 0,29 + 0,75 \cdot 5 \cdot 0,41 \cdot 0,21 + 0,45 \cdot 5 \cdot 0,41 \cdot 0,22 = 1,2 \text{ Мвар};$

ДСП-20: $P_c = 9 \cdot 0,83 \cdot 0,29 + 0,75 \cdot 9 \cdot 0,93 \cdot 0,13 + 0,45 \cdot 9 \cdot 0,94 \cdot 0,26 = 3,97 \text{ МВт};$

$q_c = 9 \cdot 0,56 \cdot 0,29 + 0,75 \cdot 9 \cdot 0,37 \cdot 0,13 + 0,45 \cdot 9 \cdot 0,34 \cdot 0,26 = 2,14 \text{ Мвар};$

ДСП-25: $P_c = 15 \cdot 0,83 \cdot 0,22 + 0,75 \cdot 15 \cdot 0,85 \cdot 0,13 + 0,45 \cdot 15 \cdot 0,85 \cdot 0,29 = 5,65 \text{ МВт};$

$q_c = 15 \cdot 0,56 \cdot 0,22 + 0,75 \cdot 15 \cdot 0,53 \cdot 0,13 + 0,45 \cdot 15 \cdot 0,53 \cdot 0,29 = 3,66 \text{ Мвар};$

$P_c = 1 + 2,4 + 3,97 + 5,65 = 13 \text{ МВт};$

$Q_c = 0,56 + 1,2 + 2,14 + 3,66 = 7,56 \text{ Мвар};$

$P_p = 1,42 \cdot 13 = 18,5 \text{ МВт}; Q_p = 1,47 \cdot 7,56 = 11,1 \text{ Мвар};$

$S_p = \sqrt{18,5^2 + 11,1^2} = 21,6 \text{ МВА}.$

Как показывают приведенные расчеты расчетную нагрузку по нагреву для дуговых сталеплавильных печей с достаточной точностью можно определить с использованием графика нагрузки (рис. 1.2), формул (2.29) – (2.32) и данных табл. 2.5 и 2.6.

Зная расчетную нагрузку P_p и продолжительность смены $T_{см}$ или удельный расход электроэнергии a и количество выплавленного металла, можно определить расход электроэнергии за смену.

$$\begin{aligned} A_a &= P_p \cdot T_{см}; \\ A_a &= a \cdot G_m. \end{aligned} \quad (2.33)$$

Рекомендуется (табл. 2.7) технологические a_m и цеховые $a_{ц}$ нормы удельного расхода электроэнергии для ДСП брать в пределах [8]:

Таблица 2.7 – Технологические и цеховые удельные нормы расхода электроэнергии

| Вид печи | a_m , кВт*ч/т | $a_{ц}$, кВт*ч/т |
|-----------------|-----------------|-------------------|
| Малой емкости | 500-550 | 512-562 |
| Средней емкости | 620-650 | 634-666 |
| Большой емкости | 700-750 | 718-770 |

2.6 Определение расчетной нагрузки по нагреву группы ЭТУ импульсного режима работы

К таким потребителям относятся машины контактной и дуговой сварки, некоторые установки прямого нагрева. Графики нагрузки этих ЭТУ имеют форму прямоугольных импульсов малой продолжительности. Так как все они создают однофазную нагрузку, то перед расчетом электрических нагрузок их следует равномерно распределить между тремя фазами.*

При резко отличных k_ϕ и k_3 отдельных ЭТУ распределение надо производить по принципу равенства эффективных мощностей:

$$\sum_{r=1}^{n_{AB}} S_{\phi,r}^2 \approx \sum_{j=1}^{n_{BC}} S_{\phi,j}^2 \approx \sum_{s=1}^{n_{CA}} S_{\phi,s}^2. \quad (2.34)$$

Если k_ϕ и k_3 незначительно отличаются друг от друга, то распределение проводят по принципу равенства паспортных (номинальных) мощностей:

$$\sum_{r=1}^{n_{AB}} S_{нагр,r} \approx \sum_{j=1}^{n_{BC}} S_{нагр,j} \approx \sum_{s=1}^{n_{CA}} S_{нагр,s}. \quad (2.35)$$

Расчет электрических нагрузок для ЭТУ с импульсным режимом работы удобнее вести по токам, для чего определяются токи отдельных ЭТУ. Например, для машин контактной сварки:

$$\begin{aligned} i_{св} &= \frac{k_3 \cdot S_{нагр}}{U_{ном}} - \text{для однофазных сварочных машин;} \\ i_{св} &= 0,865 \cdot \frac{k_3 \cdot S_{нагр}}{U_{ном}} - \text{для наиболее загруженной фазы двухфазной машины, например фазы А двухфазной машины «АВ.СА»;} \\ i_{св} &= \frac{k_3 \cdot S_{нагр}}{2 \cdot U_{ном}} - \text{для менее нагруженных фаз двухфазной машины;} \\ i_{св} &= \frac{k_3 \cdot S_{нагр}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} - \text{для трехфазных сварочных машин.} \end{aligned} \quad (2.36)$$

Для двухфазных машин $S_{нагр}$ принимается равной суммарной мощности двух фаз, например «АВ» и «СА».

Расчетная нагрузка по нагреву для ЭТУ с импульсным режимом работы равна эффективной нагрузке и определяется для каждой фазы:

$$\begin{aligned} I_{\phi,A} &= \sqrt{\bar{I}_A^2 + DI_A}; \\ I_{\phi,B} &= \sqrt{\bar{I}_B^2 + DI_B}; \end{aligned} \quad (2.37)$$

* Здесь приводится методика определения расчетной нагрузки по нагреву и пиковой нагрузки для одноконтурных машин контактной сварки, работающих независимо друг от друга

$$I_{\phi,C} = \sqrt{\bar{I}_C^2 + DI_C},$$

где $\bar{I}_A, \bar{I}_B, \bar{I}_C$ – суммарная средняя нагрузка однофазных потребителей, подключенных к фазе А ($n_{AB} + n_{AC}$), фазе В ($n_{AB} + n_{BC}$) и к фазе С ($n_{BC} + n_{CA}$);

DI_A, DI_B, DI_C – соответственно дисперсии суммарного тока в фазах А, В и С.

Средняя нагрузка в фазах А, В и С определяется по формулам:

$$\begin{aligned} \bar{I}_A &= \sqrt{\bar{I}_{AB}^2 + \bar{I}_{AB} \cdot \bar{I}_{CA} + \bar{I}_{CA}^2}; \\ \bar{I}_B &= \sqrt{\bar{I}_{AB}^2 + \bar{I}_{AB} \cdot \bar{I}_{BC} + \bar{I}_{BC}^2}; \\ \bar{I}_C &= \sqrt{\bar{I}_{BC}^2 + \bar{I}_{BC} \cdot \bar{I}_{CA} + \bar{I}_{CA}^2}, \end{aligned} \quad (2.38)$$

где $\bar{I}_{AB}, \bar{I}_{BC}, \bar{I}_{CA}$ – средние нагрузки ЭТУ, подключенных между фазами АВ, ВС и СА.

$$\begin{aligned} \bar{I}_{AB} &= \sum_{r=1}^{n_{AB}} k_{gr} \cdot i_r; \\ \bar{I}_{BC} &= \sum_{j=1}^{n_{BC}} k_{gj} \cdot i_j; \\ \bar{I}_{CA} &= \sum_{s=1}^{n_{CA}} k_{gs} \cdot i_s. \end{aligned} \quad (2.39)$$

Среднюю нагрузку в фазах А, В и С можно определить и по приближенным формулам, дающим несколько завышенный результат:

$$\begin{aligned} \bar{I}_A &= \bar{I}_{AB} + \bar{I}_{CA}; \\ \bar{I}_B &= \bar{I}_{AB} + \bar{I}_{BC}; \\ \bar{I}_C &= \bar{I}_{BC} + \bar{I}_{CA}, \end{aligned} \quad (2.40)$$

Дисперсия нагрузки DI_A, DI_B, DI_C определяется по формулам:

$$\begin{aligned} DI_A &= DI_{AB} + DI_{CA}; \\ DI_B &= DI_{AB} + DI_{BC}; \\ DI_C &= DI_{BC} + DI_{CA}, \end{aligned} \quad (2.41)$$

где $DI_{AB}, DI_{BC}, DI_{CA}$ – дисперсии нагрузок электроприемников, подключенных между фазами АВ, ВС и СА.

$$\begin{aligned} DI_{AB} &= \sum_{r=1}^{n_{AB}} k_{gr}^2 (1 - k_{gr}) i_r^2; \\ DI_{BC} &= \sum_{j=1}^{n_{BC}} k_{gj}^2 (1 - k_{gj}) i_j^2; \end{aligned} \quad (2.42)$$

$$DI_{CA} = \sum_{s=1}^{n_{CA}} k_{as}(1-k_{as})i_s^2.$$

Пример 2.17. Определить расчетную нагрузку по нагреву распределительного шинопровода, от которого получают питание 26 однофазных точечных машин контактной сварки, подключенных на линейное напряжение 380 В. Исходные и расчетные данные приведены в табл. А1.

Таблица А1 – Исходные данные к примеру 2.17

| Исходные данные | | | | | | Расчетные данные | | | | | | |
|-------------------|----------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| $S_{наст}$ кВА | k_{Σ} о.е. | k_{Θ} о.е. | n_{AB} шт | n_{BC} шт | n_{CA} шт | $i_{св}$ А | \bar{I}_{AB} А | \bar{I}_{BC} А | \bar{I}_{CA} А | DI_{AB} А ² | DI_{BC} А ² | DI_{CA} А ² |
| 450 | 0,85 | 0,05 | 1 | 1 | 1 | 1006 | 50 | 50 | 50 | 48072 | 48072 | 48072 |
| 300 | 0,80 | 0,04 | 1 | 1 | 2 | 632 | 25 | 25 | 50 | 15338 | 15338 | 30676 |
| 150 | 0,65 | 0,08 | 4 | 4 | 3 | 256 | 82 | 82 | 123 | 19294 | 19294 | 14470 |
| 75 | 0,70 | 0,06 | 3 | 3 | 2 | 138 | 24 | 24 | 16 | 3222 | 3222 | 2148 |
| Расчетные формулы | | | | | | (2.36) | (2.39) | (2.39) | (2.39) | (2.42) | (2.42) | (2.42) |
| Итого: | | | 9 | 9 | 8 | | 181 | 181 | 239 | 85926 | 85926 | 95366 |

Средняя нагрузка в фазах: $\bar{I}_A = 365 \text{ А}$; $\bar{I}_B = 313 \text{ А}$; $\bar{I}_C = 365 \text{ А}$ - формула (2.38).

Дисперсия: $DI_A = 181292 \text{ А}^2$; $DI_B = 171852 \text{ А}^2$; $DI_C = 181292 \text{ А}^2$ - формула (2.41).

Расчетная нагрузка в фазах: $I_{\Sigma ф. A} = 561 \text{ А}$; $I_{\Sigma ф. B} = 519 \text{ А}$; $I_{\Sigma ф. C} = 561 \text{ А}$ - формула (2.37).

2.7 Определение расчетных пиковых нагрузок

Пиковые нагрузки создаются как отдельными видами ЭТУ, так и при одновременной работе нескольких ЭТУ. Если ЭТУ работают в длительном режиме с равномерным графиком нагрузки, то пиковая нагрузка будет совпадать с расчетной нагрузкой по нагреву.

Для ЭТУ, работающих с перерывами, а также в повторно-кратковременном режиме, пиковая нагрузка может значительно превышать расчетную по нагреву. Например, для дуговых сталеплавильных печей большая величина пиков создается при совпадении периодов расплавления нескольких печей.

Величина пика длительностью Θ в общем случае определяется по формуле:

$$P_{n,\Theta} = \sqrt{\max \left\{ \frac{1}{\Theta} \int_0^{\Theta} \rho^2(t) dt \right\}}. \quad (2.43)$$

При $\Theta=0$ – пиковый максимум $P_{n,\Theta}$ совпадает с максимальной ординатой графика $P_{П.макс}$, в остальных случаях его величина находится в пределах

$$P_{П.макс} \geq P_{П,\Theta} \geq P_{\Sigma ф}. \quad (2.44)$$

2.7.1 Пиковые нагрузки одиночных ЭТУ

Основными ЭТУ, создающими пиковые нагрузки, являются ДСП и машины контактной электросварки (МКС).

ДСП создают максимальные пики при эксплуатационных КЗ, которые наиболее часты в период расплавления

$$i_{П} = k_{\Sigma.К.З} \cdot I_{ном.ПТ}, \quad (2.45)$$

где $k_{\Sigma.К.З}$ – кратность тока эксплуатационного КЗ по отношению к $i_{ном.ПТ}$ – номинальному току печного трансформатора, табл. 2.8.

Таблица 2.8 – Значения $k_{\Sigma.К.З}$ для отечественных ДСП

| Емкость печи, т | $k_{\Sigma.К.З}$ |
|-----------------|------------------|
| 0,5 – 6 | 3 – 3,5 |
| 10 – 50 | 2,5 – 3,2 |
| 80 – 200 | 1,5 – 2,3 |

В практике эксплуатации ДСП вероятность длительных эксплуатационных КЗ весьма мала, поэтому в качестве пиковой нагрузки рекомендуется принимать

$$i_{П} = (1,2 \dots 1,4) i_{ном.ПТ}. \quad (2.46)$$

Вероятность этих пиков $E(i_{П}) = 0,001 \dots 0,02$, а частота $f_n = 1 \dots 30$ за период расплавления.

Машины контактной сварки создают пиковые токи при своей нормальной работе вследствие импульсного характера их режимов работы. При расчете рекомендуется принимать

$$i_{П} = k_{\Sigma} \cdot i_{наст}. \quad (2.47)$$

Частота таких пиков λ_n равна числу точек свариваемых машиной за единицу времени (секунду, мин, час):

$$\lambda_n = \frac{m}{T} \cdot \frac{1}{\tau_c}; \left(\frac{1}{\tau_c} \right); \left(\frac{1}{\tau_{мин}} \right).$$

2.7.2 Расчет пиковых нагрузок для ЭТУ, имеющих $k_{\Sigma} \geq 0,5$

При расчете пиковых нагрузок от группы ЭТУ недостаточно определить только ее максимум $P_{ПМ}$, так как воздействие пиковой нагрузки на элементы системы электроснабжения и электроприемники зависит от величины пика, его продолжительности и частоты. Поэтому необходимо строить зависимость пиковой нагрузки $P_{П\Theta}$ от его продолжительности Θ $P_{П\Theta} = f(\Theta)$. Такая зависимость строится в диапазоне от $P_{ПМ}$ до $P_{\Sigma ф}$ (рис. 2.2).

Для ЭТУ с $k_{gi} \geq 0,5$ считается, что групповой график подчиняется нормальному закону распределения, поэтому для построения зависимости $P_{П\Theta} = f(\Theta)$ можно воспользоваться формулой нормального закона распределения:

$$P_{П\Theta} = P_c + \beta \sqrt{DP_{\Theta}}, \quad (2.48)$$

где β – статистический коэффициент (для нормального закона распределения $\beta=3$);

DP_{Θ} – дисперсия P_{Θ} графика нагрузки.

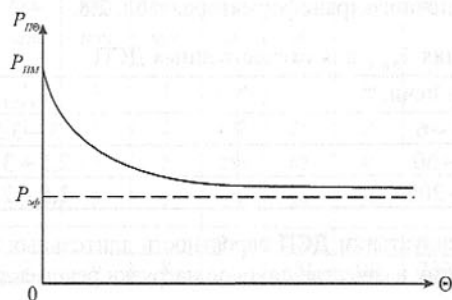


Рисунок 2.2 – График зависимости $P_{П\Theta} = f(\Theta)$.

$$DP_{\Theta} = \sum_{i=1}^n DP_{\Theta i} = \sum_{i=1}^n \frac{2}{\Theta^2} \int_0^{\Theta} dt \int_0^t k_i(\tau) d\tau, \quad (2.49)$$

где $DP_{\Theta i}$ и $k_i(\tau)$ – соответственно дисперсия и корреляционная функция индивидуального графика $p_i(t)$.

n – количество ЭТУ в рассматриваемой группе;

P_c – средняя нагрузка группового графика $P(t)$ определяется:

$$P_c = \sum_{i=1}^n p_{ci} = \sum_{i=1}^n k_{ii} p_{ni}. \quad (2.50)$$

Вычисление DP_{Θ} по формуле (2.49) трудоемко, так как связано с двойным графическим интегрированием корреляционных функций индивидуальных графиков, поэтому для группового графика при большом числе ЭТУ ($n > 4$) с разбросом мощностей не более в 2-3 раза $DP_{\Theta i}$ можно определить по формуле [2]:

$$DP_{\Theta i} = \frac{2DP_i}{\gamma_{li}^2} (e^{-\gamma_{li}} + \gamma_{li} - 1), \quad (2.51)$$

где DP_i – дисперсия i -го графика нагрузки; определяется по (1.32).

$\gamma_{li} = \frac{\Theta}{T_{ki}}$ – расчетная величина;

T_{ki} – постоянная затухания корреляционных связей i -го графика нагрузки за цикл $t_{\text{ци}}$

$$T_{ki} = k_{gi} \cdot (1 - k_{gi}) / \lambda_i. \quad (2.52)$$

Максимальный пик группового графика нагрузки определяется по формуле:

$$P_{nM} = P_c + \beta \sqrt{DP};$$

$$DP = \sum_{i=1}^n DP_i = \sum_{i=1}^n p_{\text{ср}i}^2 - p_{ci}^2, \quad (2.53)$$

P_c – определяем по формуле (2.50).

Средняя длительность максимального пика $t_{ПМ}$, равна:

$$\bar{t}_{ПМ} = \frac{\bar{k}_{\Theta} (1 - \bar{k}_{\Theta})}{[m_x (1 - \bar{k}_{\Theta}) + (n - m_x) \bar{k}_{\Theta}] \cdot \bar{\lambda}}. \quad (2.54)$$

Здесь m_x – число совпавших в одновременной работе ЭТУ;

$\bar{k}_{\Theta}, \bar{\lambda}$ – средний коэффициент включения и средняя частота соответственно; определяются по формулам (2.55)

$$\bar{k}_{\Theta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{gi};$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{t_{\text{ци}}}, \quad (2.55)$$

где k_{gi}, λ_i – частота и коэффициент включения i -ой ЭТУ;

$t_{\text{ци}}$ – длительность цикла нагрузки i -ой ЭТУ.

Величина m_x , совпавших в одновременной работе ЭТУ, определяется из условия:

$$\sum_{m=0}^{m_x-1} E(m) < 1 - e_x;$$

$$\sum_{m=0}^{m_x} E(m) \geq 1 - e_x, \quad (2.56)$$

где e_x – критическая вероятность зависит от условий задачи ($e_x = 0,01; 0,001; 0,0001$),

$E(m)$ – вероятность одновременной работы m электроприемников из n .

$$E(m) = C_n^m \bar{k}_{\Theta}^m (1 - \bar{k}_{\Theta})^{n-m}. \quad (2.57)$$



На рис. 2.3 показана графическая реализация условия (2.56) для нахождения величины m_x , а в табл. 2.9 приведены рассчитанные на ЭВМ значения m_x для различных k_g и n .

Пример 2.18. От щеткового трансформатора получают питание 5 трехфазных печей сопротивления. Определить величину пика длительностью $\Theta = 10 \text{ мин}$, величину максимального пика и его среднюю продолжительность; коэффициент загрузки печей $k_z = 1$.

Исходные и расчетные данные приведены в табл. А2.

Таблица А2

| Исходные данные: | | | | Расчетные данные: | | | | | | |
|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------------|
| ЭТУ | $P_{порт}$ кВт | K_{ϕ} о.е. | t_{η} мин | \bar{P}_i кВт | DP_i кВт ² | λ_i 1/мин | T_{λ} мин | γ_{li} о.е. | F_i о.е. | $DP_{\phi i}$ кВт ² |
| ПС1 | 100 | 0,6 | 50 | 60 | 2400 | 0,02 | 12 | 0,83 | 0,266 | 1853 |
| ПС2 | 100 | 0,6 | 50 | 60 | 2400 | 0,02 | 12 | 0,83 | 0,266 | 1853 |
| ПС3 | 50 | 0,8 | 75 | 40 | 400 | 0,013 | 12,3 | 0,81 | 0,255 | 311 |
| ПС4 | 20 | 0,7 | 100 | 14 | 84 | 0,01 | 21 | 0,47 | 0,095 | 72 |
| ПС5 | 25 | 0,7 | 100 | 17 | 131 | 0,01 | 21 | 0,47 | 0,095 | 113 |
| Расчетные формулы: | | | | (2.50) | (2.53) | (2.55) | (2.52) | | | (2.51) |
| ИТОГО: | | | | 191 | 5415 | | | | | 4202 |

Здесь $F_i = e^{-\gamma_{li}} + \gamma_{li} - 1$; $\gamma_{li} = \Theta/T_k$.

$$P_{\Pi\Theta=10, \text{min}} = 191 + 3\sqrt{4202} = 385 \text{ кВт} - \text{формула (2.48);}$$

$$P_{\text{ПМ}} = 191 + 3\sqrt{5415} = 412 \text{ кВт} - \text{формула (2.53)}.$$

По формуле (2.54), с учетом (2.55), найдем среднюю длительность максимального пика:

$$\overline{K}_6 = \frac{1}{5}(0,6 + 0,6 + 0,8 + 0,7 + 0,7) = 0,68 \text{ o.e.};$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{5}(0,02 + 0,02 + 0,013 + 0,01 + 0,01) = 0,0146 \text{ 1/мин.}$$

Таблица 2.9 – Значения совпавших в одновременной работе ЭТУ $m_x=f(N, k_B)$

| N | m_k | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| | k_B | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 0,005 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | |
| 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| 4 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 5 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | |
| 6 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | 6 | |
| 7 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 6 | 7 | 7 | 7 | 7 | |
| 8 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 6 | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 | |
| 9 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 9 | 9 | |
| 10 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 6 | 8 | 9 | 9 | 10 | 10 | |
| 11 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 11 | |
| 12 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 7 | 9 | 10 | 11 | 12 | 12 | |
| 13 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 6 | 8 | 9 | 11 | 12 | 13 | 13 | |
| 14 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 6 | 8 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | |
| 15 | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 6 | 6 | 8 | 10 | 12 | 13 | 14 | 15 | |
| 16 | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | 9 | 11 | 12 | 14 | 15 | 16 | |
| 17 | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 16 | 17 | |
| 18 | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | 7 | 9 | 12 | 14 | 15 | 17 | 18 | |
| 19 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 6 | 6 | 7 | 7 | 10 | 12 | 14 | 16 | 17 | 19 | |
| 20 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 6 | 6 | 7 | 7 | 10 | 13 | 15 | 17 | 18 | 19 | |
| 21 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 5 | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 | 10 | 13 | 15 | 17 | 19 | 20 | |
| 22 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 5 | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 | 11 | 14 | 16 | 18 | 20 | 21 | |
| 23 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 6 | 6 | 7 | 7 | 8 | 11 | 14 | 17 | 19 | 21 | 22 | |
| 24 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 6 | 6 | 7 | 7 | 8 | 11 | 14 | 17 | 19 | 21 | 23 | |
| 25 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 6 | 6 | 7 | 7 | 8 | 8 | 12 | 15 | 18 | 20 | 22 | 24 | |

Продолжение таблицы 2.9

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| 26 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 6 | 6 | 7 | 7 | 8 | 8 | 12 | 15 | 18 | 21 | 23 | 25 |
| 27 | 2 | 3 | 4 | 5 | 5 | 6 | 7 | 7 | 7 | 8 | 9 | 12 | 16 | 19 | 21 | 24 | 25 |
| 28 | 2 | 3 | 4 | 5 | 5 | 6 | 7 | 7 | 7 | 8 | 9 | 13 | 16 | 19 | 22 | 24 | 26 |
| 29 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 | 8 | 9 | 13 | 17 | 20 | 23 | 25 | 27 |
| 30 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 | 8 | 9 | 13 | 17 | 20 | 23 | 26 | 28 |
| 31 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 6 | 7 | 8 | 7 | 9 | 9 | 14 | 18 | 21 | 24 | 27 | 29 |
| 32 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 6 | 7 | 8 | 7 | 9 | 9 | 14 | 18 | 21 | 25 | 27 | 30 |
| 33 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 7 | 8 | 8 | 9 | 10 | 14 | 18 | 22 | 25 | 28 | 30 |
| 34 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 7 | 8 | 8 | 9 | 10 | 15 | 19 | 23 | 26 | 29 | 31 |
| 35 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 7 | 8 | 8 | 9 | 10 | 15 | 19 | 23 | 26 | 29 | 32 |
| 36 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 7 | 8 | 8 | 9 | 10 | 15 | 20 | 24 | 27 | 30 | 33 |
| 37 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 7 | 8 | 8 | 10 | 10 | 16 | 20 | 24 | 28 | 31 | 34 |
| 38 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 7 | 9 | 8 | 10 | 10 | 16 | 21 | 25 | 28 | 32 | 35 |
| 39 | 3 | 3 | 5 | 6 | 6 | 7 | 7 | 9 | 8 | 10 | 11 | 16 | 21 | 25 | 29 | 32 | 35 |
| 40 | 3 | 3 | 5 | 6 | 6 | 7 | 7 | 9 | 9 | 10 | 11 | 16 | 21 | 26 | 30 | 33 | 36 |
| 41 | 3 | 3 | 5 | 6 | 7 | 7 | 7 | 9 | 9 | 10 | 11 | 17 | 22 | 26 | 30 | 34 | 37 |
| 42 | 3 | 3 | 5 | 6 | 7 | 7 | 7 | 9 | 9 | 10 | 11 | 17 | 22 | 27 | 31 | 35 | 38 |
| 43 | 3 | 3 | 5 | 6 | 7 | 8 | 8 | 9 | 9 | 11 | 11 | 17 | 23 | 27 | 31 | 35 | 39 |
| 44 | 3 | 3 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 9 | 9 | 11 | 11 | 18 | 23 | 28 | 32 | 36 | 39 |
| 45 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 9 | 9 | 11 | 12 | 18 | 23 | 28 | 33 | 37 | 40 |
| 46 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 9 | 11 | 12 | 18 | 24 | 29 | 33 | 37 | 41 |
| 47 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 10 | 11 | 12 | 19 | 24 | 29 | 34 | 38 | 42 |
| 48 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 11 | 12 | 19 | 25 | 30 | 35 | 39 | 43 |
| 49 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 12 | 19 | 25 | 30 | 35 | 40 | 43 |
| 50 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 19 | 25 | 31 | 36 | 40 | 44 |

Примечание: значения m_x получены для критической вероятности $e_x=0,001$.По табл. 2.9, находим $m_x = 5$.

$$i_{\text{пм}} = \frac{0,68(1-0,68)}{[5(1-0,68) + (5-5) \cdot 0,68] \cdot 0,0146} = 9,3 \text{ мин.}$$

2.7.3 Определение расчетной пиковой нагрузки для однофазных ЭТУ, имеющих импульсный режим работы

Рассмотрим определение расчетного пика нагрузки на примере машин контактной сварки (МКС) с использованием двухступенчатой максимальной модели. Расчет ведут для наиболее нагруженной фазы. Для n МКС, подключенных к расчетной фазе строится упорядоченная диаграмма (УД) сварочных токов отдельных машин от максимального значения i_{max} до минимального i_{min} , которую заменяют двухступенчатой моделью, имеющей n_1 МКС с максимальным током и $n-n_1$ – с минимальным (рис. 2.4).

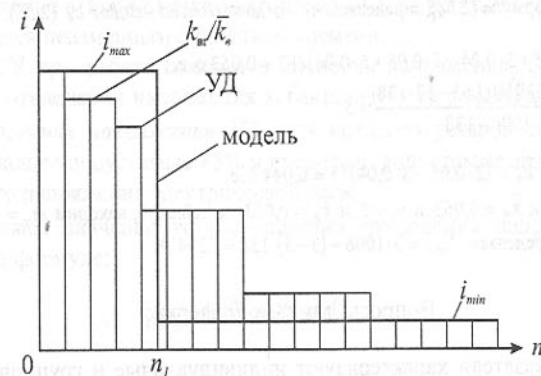


Рисунок 2.4 – Упорядоченная диаграмма токов нагрузки МКС и её двухступенчатая модель

Длительность каждой ступени УД в определенном масштабе принимается равной k_{gr}/\bar{k}_a . В процессе расчета построение УД и её модели не требуется.

Величина n_1 определяется исходя из равенства площадей УД и модели:

$$F_{\text{УД}} = F_{\text{модели}};$$

$$\frac{1}{k_a} \sum_{r=1}^n k_{gr} \cdot i_r = n_1 \cdot i_{\text{max}} + (n - n_1) \cdot i_{\text{min}}.$$

Откуда

$$n_1 = \frac{\frac{1}{k_a} \sum_{r=1}^n k_{gr} \cdot i_r - n \cdot i_{\text{min}}}{i_{\text{max}} - i_{\text{min}}}. \quad (2.58)$$

Величина расчетного пика определяется по формуле:

$$I_{nM} = m_{1x} \cdot i_{max} + (m_x - m_{1x}) i_{min}, \quad (2.59)$$

где m_{1x} - количество совпавших в одновременной работе МКС с i_{max} , находится по табл. 2.9 для n_I и \bar{k}_e ;

$\bar{k}_e = \frac{1}{n_I} \sum_{i=1}^{n_I} k_{ei}$ - средний коэффициент включения n_I наибольших по мощности ЭТУ;

m_x - находится по табл. 2.9 в зависимости от \bar{k}_e и n .

Пример 2.19. Определить расчетный пик загрузки I_{nM} в наиболее нагруженной фазе А (пример 2.17).

Расчетный пик в фазе А создают 17 сварочных машин: $n_{AB} = 9$ и $n_{CA} = 8$; $i_{max} = 1006$ А, $i_{min} = 138$ А. По формуле (2.58) определяем n_I , предварительно найдем \bar{k}_e (2.55).

$$\bar{k}_e = (2 \cdot 0,05 + 3 \cdot 0,04 + 7 \cdot 0,08 + 5 \cdot 0,06) / 17 = 0,063 \text{ о.е.};$$

$$n_I = \frac{(181 + 239) / 0,063 - 17 \cdot 138}{1006 - 138} = 5.$$

$$\text{Определим } \bar{k}_e' = (2 \cdot 0,05 + 3 \cdot 0,04) / 5 = 0,044 \text{ о.е.}$$

Для $n = 17$ и $\bar{k}_e = 0,063$ и $n_I = 5$ и $\bar{k}_e' = 0,063$ по табл. 2.9, находим $m_x = 5$; $m_{1x} = 3$. По формуле (2.59), определяем $I_{nM} = 3 \cdot 1006 + (5 - 3) \cdot 138 = 3294$ А.

Вопросы для самопроверки:

1. Какие показатели характеризуют индивидуальные и групповые графики нагрузки?
2. Для чего определяется нагрузка по нагреву и пиковая?
3. Как определяется расчетная нагрузка по нагреву для группы трехфазных независимых ЭТУ, которые имеют длительный режим работы?
4. Как определяется расчетная нагрузка по нагреву для трехфазных ЭТУ, имеющих повторно-кратковременный режим работы?
5. Как определяется расчетная нагрузка по нагреву для однофазных ЭТУ, имеющих длительный режим работы?
6. Как определяется расчетная нагрузка по нагреву для группы однофазных и трехфазных ЭТУ, которые имеют импульсный режим работы?
7. Как определяются пиковые нагрузки одиночных ЭТУ?
8. Как определяется расчетная пиковая нагрузка группы трехфазных ЭТУ, которые имеют длительный режим работы или повторно-кратковременный с $k_e \geq 0,5$?
9. Как определяется расчетная пиковая нагрузка для группы однофазных и трехфазных ЭТУ, которые имеют импульсный режим работы и $k_e < 0,5$?

3 ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Режимы работы ЭТУ весьма разнообразны. Имеется большое количество установок с резкопеременным, импульсным, несинусоидальным и несимметричным характером нагрузки. Это приводит к тому, что ЭТУ оказывают влияние на все показатели качества электроэнергии (ПКЭ) (кроме частоты). Поэтому при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения необходимо знать, как ЭТУ влияют на ПКЭ и предусмотреть мероприятия по устранению или снижению этого влияния на другие потребители электрической энергии.

При своей работе ЭТУ создают отклонения, колебания, несимметрию и несинусоидальность напряжения.

3.1 Отклонения напряжения

Напряжение в любой точке электрической сети промышленного предприятия не остается неизменным с течением времени.

Все ЭТУ при работе создают отклонения напряжения. Согласно ГОСТ 13109-97 [4] отклонения напряжения характеризуются показателем *установившегося отклонения напряжения* δU_y , для которого установлены следующие нормы: нормально допустимые $\pm 5\%$ и предельно допустимые значения $\pm 10\%$ от номинального напряжения электрической сети.

Вычисляют значение установившегося отклонения напряжения δU_y в процентах по формуле:

$$\delta U_y = \frac{100(U_y - U_{ном})}{U_{ном}}, \quad (3.1)$$

где U_y - значение усредненного напряжения в вольтах, киловольтах как результат усреднения N наблюдений $U_{(I)i}$ - действующего значения каждого междупазного (фазного) напряжения основной частоты или $U_{I(I)i}$ - действующее значение напряжения прямой последовательности основной частоты

$$U_y = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i^2}, \quad (3.2)$$

где U_i - значение напряжения $U_{(I)i}$ или $U_{I(I)i}$ за интервал времени 1 минута.

Продолжительность i -го наблюдения составляет 24 часа.

Величину $U_{I(I)i}$ можно вычислить по формуле [4]:

$$U_{I(1)i} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\sqrt{3} \cdot U_{AB(1)i} + \sqrt{4 \cdot U_{BC(1)i}^2 - \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} + U_{AB(1)i} \right)^2} \right]^2 + \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2} \quad (3.3)$$

где $U_{AB(1)i}$; $U_{BC(1)i}$; $U_{CA(1)i}$ – действующее значение междуфазных напряжений основной частоты в i -ом наблюдении, В, кВ.

Допускается определять $U_{I(1)i}$ методом симметричных составляющих, а также по приближенной формуле:

$$U_{I(1)i} = \frac{1}{3} (U_{AB(1)i} + U_{BC(1)i} + U_{CA(1)i}). \quad (3.4)$$

В дальнейшем отклонения напряжения будут обозначаться δU .

Отклонения напряжения в сетях, вызванные работой ЭТУ, приводят к ухудшению условий работы других электропотребителей. Например, при повышении напряжения возникает опасность перегрева статоров асинхронных двигателей, уменьшается срок службы ламп накаливания, увеличивается ток холостого хода трансформаторов.

При понижениях напряжения возможны перегревы роторов асинхронных двигателей, уменьшаются их пусковые и опрокидывающие моменты, это может привести к нарушению нормальной работы электроприводов.

При снижении напряжения на 10% световой поток ламп накаливания снижается примерно на 30%, а при повышении напряжения на 10% срок службы ламп сокращается почти в 5 раз.

Снижение напряжения на 10% вызывает уменьшение вращающего момента асинхронного двигателя примерно на 19%.

Как показали исследования, отклонения напряжения в сетях с ЭТУ на предприятиях, где отсутствует встречное регулирование напряжения, находятся в пределах – 10% до +5% $U_{ном}$ [1].

3.2 Колебания напряжения

Колебания напряжения δU_i в электрических сетях возникают главным образом при работе резкопеременных нагрузок: управляемых вентильных преобразователей (ВП) с широким диапазоном и большой скоростью регулирования напряжения, ДСП, мощных сварочных агрегатов и т.п.

Согласно ГОСТ 13109-97 колебания напряжения характеризуются следующими показателями:

- размахом изменения напряжения;
- дозой фликера.

Предельно допустимые значения размаха изменения напряжения δU_i в точках общего присоединения к электрическим сетям определяют по кривой (1), а при освещении лампами накаливания в помещениях, где требуется значительное зрительное напряжение, определяются по кривой (2) рис.3.1 в зависимости от частоты повторения изменений напряжения $F_{\delta U_i}$ или интервала между изменениями напряжения $\Delta t_{i,i+1}$.

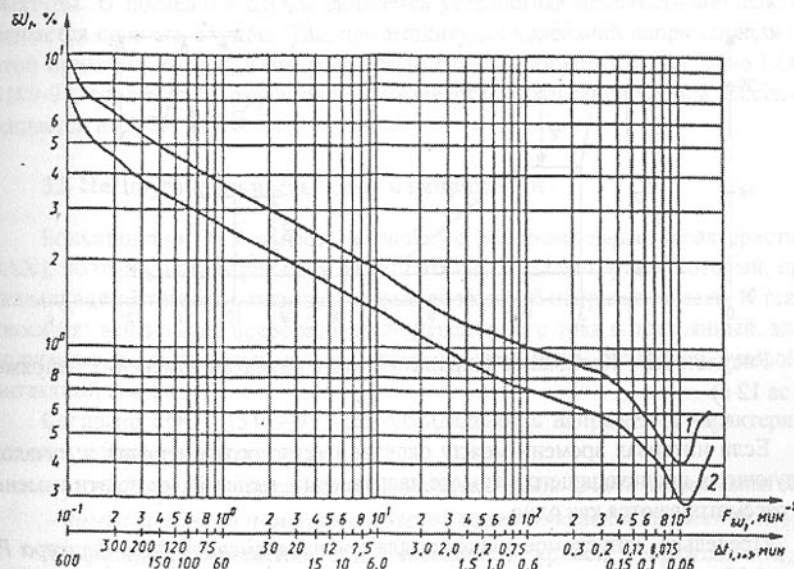


Рисунок 3.1. – Предельно допускаемые размахи изменений напряжения в зависимости от частоты повторения изменений напряжения за минуту для колебаний, имеющих форму меандра (колебания прямоугольной формы).

Размах изменения напряжения δU_i в процентах вычисляется по формуле:

$$\delta U_i = \frac{100|U_i - U_{i+1}|}{U_{ном}}, \quad (3.5)$$

где U_i , U_{i+1} – значения следующих один за другим экстремумов или экстремума и горизонтального участка огибающей среднеквадратичных значений напряжения основной частоты, определенных на каждом полупериоде основной частоты, В.

Частоту повторения изменений напряжения $F_{\delta U_i}$ с^{-1} , мин^{-1} , при периодических колебаниях напряжения вычисляют по формуле:

$$F_{\delta U_i} = \frac{m}{T}, \quad (3.6)$$

где m – число изменений за время T ,

T – интервал времени измерения, принимаемый равным 10 мин.

Интервал времени между изменениями напряжения $\Delta t_{i,i+1}$, в секундах или минутах вычисляется по формуле:

$$\Delta t_{i,i+1} = t_{i+1} - t_i, \quad (3.7)$$

где t_i , t_{i+1} – начальные моменты следующих один за другим изменений напряжения, с, мин (рис.3.2).

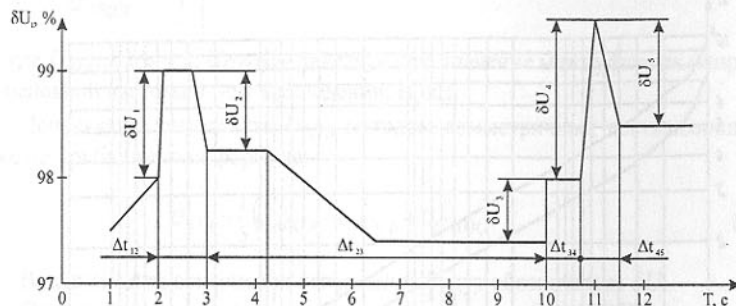


Рисунок 3.2 – Колебания напряжений (пять размахов изменения напряжения за 12 с)

Если интервал времени между окончанием одного изменения и началом следующего, происходящего в том же направлении, менее 30 мс, то эти изменения рассматриваются как одно.

Предельно допустимое значение для кратковременной дозы фликера P_{st} равно 1,38, а для длительной дозы фликера P_{Lt} – равно 1,0.

Кратковременную дозу фликера определяют на интервале времени наблюдения, равном 10 мин, а длительную дозу – на интервале равном 24 мин.

Предельно допустимая кратковременная доза фликера P_{st} в помещениях с лампами накаливания, где требуется большое зрительное напряжение, равна 1,0, а длительная доза фликера P_{Lt} – 0,74.

Существуют различные формулы для определения кратковременной и длительной дозы фликера [4].

Наибольшие колебания напряжения происходят в электрической сети, питающей ДСП и составляют 2-4% при напряжении 110 и 35 кВ и 3-12% при напряжении 6-10 кВ. Частота этих колебаний 0,5-1 Гц [1].

Колебания напряжения создают машины контактной сварки. Величина их зависит от мощности сварочных машин и источника питания. Наибольшие колебания напряжения 20-30% с $f=10$ Гц наблюдаются у многоточечных машин в автоматических сварочных линиях [1].

Колебания напряжения отрицательно сказываются на зрительном восприятии предметов, деталей, графических изображений, и, в конечном счете, на производительности труда и зрении работников. Воздействие миганий ламп зависит от типа светильника. Одинаковые δU_i оказывают значительно большее

влияние на лампы накаливания, чем на газоразрядные. При $\delta U_i > 10\%$ наблюдаются погасания газоразрядных ламп; при $\delta U_i > 15\%$ могут отпадать контакты магнитных пускателей. При таких колебаниях напряжения наблюдается выход из строя конденсаторов и вентилях преобразовательных агрегатов.

Колебания амплитуды и, в большей мере, фазы напряжения могут вызывать вибрацию электродвигателей, механических конструкций, трубопроводной арматуры. В последнем случае снижается усталостная прочность металла, сокращается срок его службы. Так, при амплитудах колебаний напряжения с частотой примерно в 1 Гц, в два раза превышающих допустимые согласно ГОСТ 13109-97, срок службы трубопроводов вследствие пульсаций напора насоса сокращается на 5-7% [6].

3.3 Несинусоидальность токов и напряжений

Большинство ЭТУ имеют нелинейные вольт-амперные характеристики (ВАХ), поэтому они потребляют из сети несинусоидальный ток, который, протекая по элементам сети, вызывает искажение кривой напряжения сети. К таким относятся: вентилях преобразователи переменного тока в постоянный, электродуговые сталеплавильные и руднотермические печи, установки дуговой и контактной сварки.

Согласно ГОСТ 13109-97 несинусоидальность напряжения характеризуется следующими показателями:

- коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения K_{U_i} ;
- коэффициентом n -ой гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_{U_i} в процентах как результат i -го наблюдения вычисляется по формуле:

$$K_{U_i} = 100 \sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)i}^2} / U_{(1)i}, \quad (3.8)$$

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

Коэффициент искажения можно определять и по приближенной формуле:

$$K_{U_i} = 100 \sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)i}^2} / U_{ном}. \quad (3.9)$$

Относительная погрешность определения K_{U_i} с использованием формулы (3.8) и (3.9) численно равна отклонению напряжения $U_{(1)i}$ от $U_{ном}$.

Значение K_U определяется как результат усреднения N наблюдений K_{U_i} на интервале времени $T_{вс}$, равном 3с, по формуле:

$$K_U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_{U_i}^2}. \quad (3.10)$$

Число наблюдений N должно быть не менее 9.

Качество электрической энергии по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения в точке общего присоединения считается удовлетворяющим ГОСТ 13109-97, если наибольшее из всех измеренных в течении 24 ч значений коэффициентов K_U не превышает предельно допустимого значения (табл.3.1).

Таблица 3.1 – Значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения K_{U_i} , % [4].

| Нормально допустимое значение K_U при $U_{ном}$, кВ | | | | Предельно допустимое значение K_U при $U_{ном}$, кВ | | | |
|---|------|-----|---------|---|------|-----|---------|
| 0,38 | 6-20 | 35 | 110-330 | 0,38 | 6-20 | 35 | 110-330 |
| 8,0 | 5,0 | 4,0 | 2,0 | 12,0 | 8,0 | 6,0 | 3,0 |

Коэффициент n -ой гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)i}$ в процентах при i -ом наблюдении вычисляются по формуле:

$$K_{U(n)i} = 100 \cdot U_{(n)i} / U_{(1)i}, \quad (3.11)$$

где $U_{(n)i}$ – действующее значение напряжения n -ой гармоники В, кВ,

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

Допускается вычислять данный ПКЭ по формуле:

$$K_{U(n)i} = 100 \cdot U_{(n)i} / U_{ном}. \quad (3.12)$$

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

$$K_{U(n)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{U(n)i}^2}{N}}. \quad (3.13)$$

Качество электрической энергии по этому показателю будет удовлетворять требованиям ГОСТ 13109-97, если максимальное значение, измеренное в течении 24 ч не будет превышать предельно допустимые (табл.3.2).

Таблица 3.2 – Предельно допустимые значения $K_{U(n)}$, %

| n | Нечетные гармоники не кратные 3, при $U_{ном}$, В | | | | n | Нечетные гармоники кратные 3*, при $U_{ном}$, В | | | | n | Четные гармоники, при $U_{ном}$, В | | | |
|-----|--|------|------|---------|-----|--|------|-----|---------|-----|-------------------------------------|------|-----|---------|
| | 0,38 | 6-20 | 35 | 110-330 | | 0,38 | 6-20 | 35 | 110-330 | | 0,38 | 6-20 | 35 | 110-330 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 5 | 6,0 | 4,0 | 3,0 | 1,5 | 3* | 5,0 | 3,0 | 3,0 | 1,5 | 2 | 2,0 | 1,5 | 1,0 | 0,5 |
| 7 | 5,0 | 3,0 | 2,5 | 1,0 | 9* | 1,5 | 1,0 | 1,0 | 0,4 | 4 | 1,0 | 0,7 | 0,5 | 0,3 |
| 11 | 3,5 | 2,0 | 2,0 | 1,0 | 15 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 6 | 0,5 | 0,3 | 0,3 | 0,2 |
| 13 | 3,0 | 2,0 | 1,5 | 0,7 | 21 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 8 | 0,5 | 0,3 | 0,3 | 0,2 |
| 17 | 2,0 | 1,5 | 1,0 | 0,5 | >21 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 10 | 0,5 | 0,3 | 0,3 | 0,2 |
| 19 | 1,5 | 1,0 | 1,0 | 0,4 | | | | | | 12 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| 23 | 1,5 | 1,0 | 1,0 | 0,4 | | | | | | >12 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| 25 | 1,5 | 1,0 | 1,0 | 0,4 | | | | | | | | | | |
| >25 | 0,2+ | 0,2+ | 0,2+ | 0,2+ | | | | | | | | | | |
| | 32,5/n | 20/n | 15/n | 5/n | | | | | | | | | | |

* – предельно допустимые величины для $n=3$ и 9 относятся к однофазным электрическим сетям. В трехфазных трехпроводных электрических сетях эти значения принимают вдвое меньшими приведенных в табл. 3.2.

Искажения кривой напряжения в электрических сетях, питающих ЭТУ, приводит к следующим отрицательным последствиям: появляются дополнительные потери мощности в питающих линиях, трансформаторах, батареях конденсаторов и т.д.; происходит ускорение старения изоляции электрических машин, аппаратов и кабелей, что приводит к уменьшению надежности и срока службы электрооборудования; ухудшается точность электрических измерений; появляются нарушения в работе автоматики, телемеханики и релейной защиты, затрудняется, а в ряде случаев становится невозможным использование силовых цепей в качестве каналов для передачи информации; ухудшается, а иногда и нарушается работа приемников электроэнергии, в том числе и тех, которые создают несинусоидальность в электрических сетях; ограничивается, а в ряде случаев становится невозможным применение батарей конденсаторов (БК) из-за перегрузки их токами высших гармоник и возникновения резонансных явлений. Например, БК могут длительно работать при перегрузке их токами высших гармоник не более чем на 30%; допустимое превышение напряжения составляет 10%. Однако в этих условиях срок их службы сокращается.

В тоже время на практике известны случаи полезного использования высших гармоник, например, в системах сигнализации однофазных замыканий на землю, основанных на использовании естественных или искусственных генерируемых высших гармоник тока замыкания на землю [6].

Исследования спектрального состава напряжения в сетях, питающих ЭТУ, показали, что в спектре напряжения присутствуют те же гармоники, что и в спектре тока. Поэтому для определения гармонического состава напряжения необходимо ток n -ой гармоники умножить на сопротивление n -ой гармоники.

Коэффициент искажения кривой напряжения в ряде случаев не превышает допустимых ГОСТом [1].

3.4 Несимметрия токов и напряжений

Большое количество ЭТУ создают несимметричную нагрузку вследствие однофазного характера или несимметричных режимов работы. К ним относятся некоторые типы печей сопротивления прямого и косвенного нагрева, машины контактной сварки, индукционные печи, печи электрошлакового переплава и др.

Несимметрия нагрузок может иметь место и при работе трехфазных нагрузок, таких как дуговые печи, что обусловлено неустойчивостью горения дуги в процессе горения.

Согласно ГОСТ 13109-97 несимметрия напряжений характеризуется следующими показателями:

- коэффициентом несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} , %;
- коэффициентом несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} , %.

$$K_{2U} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N K_{2Ui}^2 \right) / N}, \quad (3.14)$$

где K_{2Ui} – коэффициент несимметрии напряжений при i -ом наблюдении;

$$K_{2Ui} = 100 \cdot U_{2(1)i} / U_{ном.м.ф.}, \quad (3.15)$$

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

$U_{ном.м.ф.}$ – номинальное значение междуфазного напряжения, В, кВ;

N – число наблюдений, ($N \geq 9$).

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

Коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности в процентах в i -ом наблюдении определяется по формуле:

$$K_{0Ui} = 100 \cdot \sqrt{3} U_{0(1)i} / U_{1(1)i}, \quad (3.16)$$

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

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

Величину K_{0Ui} можно определить по формуле:

$$K_{0Ui} = 100 \cdot U_{0(1)i} / U_{ном.ф.}, \quad (3.17)$$

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

а также методом симметричных составляющих или по приближенной формуле:

$$U_{0(1)i} = 0,62 \cdot (U_{ид.ф(1)i} - U_{им.ф(1)i}), \quad (3.18)$$

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

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

$$K_{0U} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N K_{0Ui}^2 \right) / N}. \quad (3.19)$$

Число наблюдений N должно быть не менее 9.

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 напряжений по обратной последовательности в сетях, питающих ДСП напряжением 110 и 35 кВ может достигать 2-2,6%, а в сетях 6 и 10 кВ – 1-4%. В сварочных сетях он может достигать 1-5%, но очень кратковременно (до 1с) и с большими паузами между ними [1].

При несимметрии напряжений в трехфазных сетях появляются дополнительные потери в элементах электросетей, сокращается срок службы ламп и электрооборудования и снижаются экономические показатели его работы.

При несимметрии напряжений в электрических машинах переменного тока возникают магнитные поля, вращающиеся не только с синхронной скоростью в направлении вращения ротора, но и с двойной синхронной скоростью в противоположном. В результате возникает тормозной электромагнитный момент, а также дополнительный нагрев активных частей машины, главным образом ротора, за счет токов двойной частоты.

Дополнительные потери мощности в синхронных двигателях при несимметрии напряжения вызывает появление местных (локальных) нагревов обмотки возбуждения, что приводит к необходимости снижать ток возбуждения и тем самым уменьшать значение реактивной мощности, выдаваемой в сеть.

Несимметрия напряжений не оказывает заметного влияния на работу воздушных и кабельных линий, в тоже время нагрев трансформаторов и, следовательно, сокращение сроков их службы могут оказаться существенными.

При несимметрии линейных напряжений реактивная мощность, генерируемая БК, изменяется по сравнению с номинальным значением $Q_{ном}$ на величину [6]:

$$\Delta Q = Q_{ном} \cdot \frac{U_{ном}^2 - U_1^2 (1 + K_{2U}^2)}{U_{ном}^2} \approx \frac{U_{ном}^2 - U_1^2}{U_{ном}^2}, \quad (3.20)$$

где U_1 – линейное напряжение прямой последовательности;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение БК.

При $K_{2U} = 0,05 \div 0,06$ оказывается $|\Delta Q| = (0,01 - 0,04) \cdot Q_{ном}$. Поскольку на практике напряжение U_I может быть больше или меньше напряжения $U_{ном}$, то возможно как увеличение, так и уменьшение генерируемой реактивной мощности.

Вопросы для самопроверки

- 1 Какие существуют показатели качества электроэнергии?
- 2 Что такое отклонение напряжения?
- 3 Каким показателем характеризуется отклонение напряжения? Их допустимые значения?
- 4 Как влияют отклонения напряжения в сетях, питающих ЭТУ, на работу других электроприемников, получающих питания от этих же сетей?
- 5 Какими показателями характеризуются колебания напряжения?
- 6 Каким образом оценивается размах изменения напряжения?
- 7 Какие предельно допустимые значения для кратковременной и длительной дозы фликера?
- 8 Какие по величине колебания напряжения имеют место при работе ДСП при питании их напряжениями 6,10,35 и 110 кВ?
- 9 Как влияют колебания напряжения в сетях, питающих ЭТУ, на работу других электроприемников, получающих питание от этих же сетей?
- 10 Какими показателями характеризуется несинусоидальность напряжения и как они определяются?
- 11 Как влияет несинусоидальность напряжения в сетях, питающих ЭТУ?
- 12 Какими показателями характеризуется несимметрия напряжений и как они определяются?
- 13 Как влияет несимметрия напряжения в сетях, питающих ЭТУ, на работу других электроприемников?

4 ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Эффективность работы всех ЭТУ во многом определяется качеством электрической энергии в сетях питания. Различные ЭТУ по разному реагируют на изменения ПКЭ.

Колебания напряжения в сети, питающей ДСП, приводят к увеличению времени плавки, а колебания напряжения с размахом 10-15% могут привести к выходу из строя вентильных выпрямительных агрегатов. Колебания напряжения влияют на работу электролизных установок. Так при производстве хлора и каустической соды колебания напряжения с размахом $\pm 5\%$ вызывает резкое увеличение износа анодов, нарушение нормальной работы отдельных технологических цехов и снижение производительности предприятия в целом. При относительно больших по частоте и размаху колебаниях напряжения срок службы электролизной установки снижается с 9 до 7 месяцев [7]. Колебания напряжения с размахом 12% в некоторых случаях приводили к браку продукции установок высокочастотного нагрева, разрушению сердечников индукционных плавильных печей и отключению систем управления их режимом.

Кратковременные колебания напряжения при применении дуговой электросварки практически не влияют на качество сварного шва, что объясняется инерционностью тепловых процессов в металле.

Колебания напряжения оказывают существенное влияние на контактную сварку. Это воздействие сказывается как на качестве самого сварного процесса, так и на надежности работы схемы управления сваркой. Допускаются размахи изменений напряжения $\pm 5\%$ для сварки обычных сталей и $\pm 3\%$ для сварки титановых и других жаропрочных сталей и сплавов. Продолжительность допустимых колебаний напряжения для аппаратуры управления машинами контактной сварки ограничивается величиной не более 0,2 с во избежание ложной работы этой аппаратуры, особенно при управлении на логических элементах.

Несимметрия напряжений и токов отрицательно влияет на работу руднотермических печей, вызывая снижение их производительности, увеличение расхода электроэнергии и, тем самым, уменьшение КПД печи. Причем, ухудшение основных показателей работы РТП оказывается большим, чем изменение степени несимметрии режима, а после некоторых граничных значений несимметрии наблюдается резкое падение производительности и КПД печи при резком возрастании расхода электроэнергии. Последнее объясняется возникновением зон активного и пассивного хода реакции и, тем самым, неравномерного распределения энергии по объему ванны печи.

Несимметрия напряжения значительно ухудшает режимы работы многофазных вентильных выпрямителей. В результате различия напряжения по фазам значительно увеличивается пульсация выпрямленного напряжения. Значительное отрицательное влияние несимметрия напряжения может оказывать также на систему импульсно-фазового управления тиристорных преобразователей.

Несинусоидальность напряжения оказывает влияние на работу некоторых видов ЭТУ, например, магнитодинамические насосы и установки, а также на системы управления режимами работы.

Наибольшее влияние на работу ЭТУ оказывают отклонения напряжения. ЭТУ, работающие в импульсном режиме (машины контактной сварки), весьма чувствительны к провалам напряжения, если длительность провалов соизмерима со временем включения ЭТУ.

У большинства ЭТУ снижение напряжения вызывает значительное уменьшение потребляемой мощности, возможен брак нагреваемых изделий, существенно затягивается технологический процесс, а в ряде случаев он полностью расстраивается. Так на одном из заводов цветной металлургии систематическое длительное снижение напряжения на шинах заводской подстанции на 6-7% привело к удлинению технологического процесса до 7 вместо 3,5 часов.

При снижении напряжения на 8-10% зачастую технологический процесс в печах сопротивления и индукционных невозможно довести до конца.

Неблагоприятно сказываются отклонения напряжения и на электрической сварке. Снижение напряжения ухудшает качество сварных швов. Продолжительность времени сварки при снижении напряжения на 10% увеличивается на 20% за счет времени подогрева шва.

Вентильные преобразователи для питания вакуумных и плазменных дуговых печей, электролизных установок обычно имеют систему автоматического регулирования постоянного тока путем фазового управления. При повышении напряжения в сети угол регулирования автоматически увеличивается, а при понижении напряжения уменьшается. Повышение напряжения приводит к ухудшению коэффициента мощности. Так, 1%-ное повышение напряжения приводит к увеличению потребления реактивной мощности преобразователем примерно на 1-1,4%. В то же время другие показатели вентильных преобразователей с повышением напряжения улучшаются, поэтому выгодно повышать напряжение на их зажимах в пределах допустимых значений.

Электropечи чувствительны к отклонениям напряжения. Понижения напряжения, например, на 7% приводит к удлинению процесса плавки стали в 1,5 раза. Повышение напряжения выше $1,05U_{ном}$ приводит к перерасходу электроэнергии, и как следствие, к увеличению себестоимости продукции.

Производительность электротермических установок Π_y во многих случаях имеет квадратичную зависимость от уровня напряжения:

$$\Pi_y = k \cdot U^2, \quad (4.1)$$

где k – коэффициент, зависящий от параметров электрооборудования и выпускаемой продукции, некоторых особенностей технологии.

Отклонения напряжения существенно сказываются на работе ДСП. Связь между производительностью печи Π и отклонением напряжения δU для периода расплавления представляется в виде [6]:

$$\Pi = \Pi_{ном} (1 + 2\delta U), \quad (4.2)$$

где $\Pi_{ном}$ – производительность печи при номинальном напряжении.

Так для печи ДСП-100 снижение напряжения на 5% в период расплавления шихты привело к снижению производительности на 10% и увеличению периода расплавления на 16 мин.

Рассмотрим более подробно как влияют отклонения напряжения на работу печей сопротивления и ДСП.

4.1 Влияние отклонений напряжения на работу печей сопротивления

Отклонения напряжения приводят к изменению времени протекания технологического процесса и следовательно к изменению производительности печей, что приводит к изменению расходов электроэнергии.

От уровней напряжения зависят также срок службы нагревателей и потери активной мощности.

Рассмотрим влияние отклонений напряжения на печи отжига.

Время цикла отжига определяется по выражению:

$$t_{ц.о} = t_n + t_{\theta 1} + t_{\theta 2}, \quad (4.3)$$

где t_n – время нагрева;

$t_{\theta 1}, t_{\theta 2}$ – время выдержки на первой и второй стадиях.

Величина t_n определяется по формуле:

$$t_n = \frac{A_n + A_{акк.л}}{P_{ном} \cdot \delta U - P_{пот}}, \quad (4.4)$$

где A_n – энергия, затрачиваемая на нагрев изделия;

$A_{акк.л}$ – аккумуляция тепла печью;

$P_{пот}$ – мощность потерь;

δU – отклонения напряжения, о.е.

Расход электроэнергии за цикл работы печи:

$$A_{ц} = A_n + A_{акк.л} + A_{акк.м} + A_{1-2} + P_{пот} \cdot t_{ц}, \quad (4.5)$$

где $A_{акк.м}$ – аккумуляция тепла тележкой;

A_{1-2} – расход электроэнергии на 1-й и 2-й стадиях выдержки.

Удельный расход электроэнергии

$$a_{уд} = \frac{A_{ц}}{G_n}, \quad (4.6)$$

где G_n – загрузка печи.

Срок службы нагревателей определяется по формуле:

$$t_{сл} = \frac{\delta_0}{V_{ок}}, \quad (4.7)$$

где δ_0 – толщина оксидной пленки, которая не должна превышать 20% общей толщины нагревателя;

$V_{ок}$ – скорость окисления нагревателя, которая определяется в зависимости от отклонения напряжения,

$$V_{ок} = 210 \cdot 10^{-7} \delta U - 0,66 \cdot 10^{-5} = (210 \cdot \delta U - 66) \cdot 10^{-7}. \quad (4.8)$$

4.2 Влияние отклонений напряжения на работу ДСП

Степень влияния отклонения напряжения на работу ДСП зависит от типа регуляторов мощности. В настоящее время на дуговых печах применяются регуляторы, поддерживающие постоянными полное сопротивление фазы печи $z_{ном} = const$ и ток дуги $I_{\delta} = const$.

Регуляторы первого типа, называемые дифференциальными, получили наиболее широкое распространение в ДСП. Токовые регуляторы получили некоторое распространение на РТП. При таком регуляторе мощность печи изменяется пропорционально первой степени изменения напряжения.

Для ДСП с дифференциальным регулятором зависимость тока дуги от отклонений напряжения выражается формулой:

$$I_{\delta} = A + B\delta U + C\delta U^2, \quad (4.9)$$

где A, B, C – постоянные коэффициенты;

$$A = 3,654 \text{ кА}; B = 1,908 \text{ кА/о.е.}; C = 0,514 \text{ кА/о.е.}^2$$

Мощность, выделяемая на дуге определяется выражением:

$$P_{\delta} = I_{\delta}^2 R_{\delta} = I_{\delta}^2 \left(\sqrt{\frac{U_{\phi}^2}{I_{\delta}^2} - X_{\phi}^2} - R_{\phi} \right), \quad (4.10)$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение сети, кВ;

R_{ϕ}, X_{ϕ} – активное и индуктивное сопротивления фазы, Ом.

Подставляя I_{δ} в формулу (4.10), получим:

$$\begin{aligned} P_{\delta} &= I_{\delta}^2 R_{\delta} = (A + B\delta U + C\delta U^2)^2 \sqrt{\frac{U_{\phi}^2}{I_{\delta}^2} - X_{\phi}^2} - R_{\phi} = \\ &= \sqrt{U_{\phi}^2 (A + B\delta U + C\delta U^2)^2 - X_{\phi}^2 (A + B\delta U + C\delta U^2)^2} - \\ &- (A + B\delta U + C\delta U^2)^2 R_{\phi}. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Рассмотрим влияние изменения мощности дуги при отклонениях напряжения на продолжительность времени плавки ДСП. Запишем уравнение энергетического баланса ДСП [1]:

$$A_n + A_{эл} + A_{хим} = A_m + A_{ш} + A_{э} + A_{м.о} + A_{м.пр}, \quad (4.12)$$

где A_n – активная электроэнергия, затрачиваемая на плавку;

$A_{эл}$ – энергия сгорания электродов;

$A_{хим}$ – энергия от химических реакций;

$A_m, A_{ш}$ – энергия, затрачиваемая на нагрев и перегрев металла и шлака;

$A_{э}$ – электрические потери во время работы печи;

$A_{м.р}$ – тепловые потери во время работы печи под током;

$A_{м.пр}$ – тепловые потери во время простоя печи.

Выразим энергию через мощность и время t_p .

$$(P_{\delta} + \Delta P_n) t_p + \Delta P_{эл} \cdot t_p + P_{хим} (t_p + t_{пр}) = A_m + A_{ш} + (\Delta P_n + \Delta P_m) t_p + \Delta P_m \cdot t_{пр} \quad (4.13)$$

Поскольку $t_{нл} = t_p + t_{пр}$, то приняв $t_p = k_1 \cdot t_{нл}$, $0 < k_1 < 1$, получим:

$$t_{нл} = \frac{A_m + A_{ш}}{k_1 \cdot P_{\delta} + k_1 \cdot \Delta P_{эл} + P_{хим} - \Delta P_m}. \quad (4.14)$$

Здесь ΔP_n – мощность электрических потерь в период работы печи;

$\Delta P_{эл}$ – мощность потерь на электродах;

ΔP_m – мощность тепловых потерь.

Производительность печи определяется по формуле:

$$\Pi_n = \frac{G_m}{t_{нл}}, \quad (4.15)$$

где G_m – вес готового металла, выплавляемого за плавку, т.

Из формулы (4.15) видно, что чем меньше время плавки, тем выше производительность печи и наоборот.

Отклонение производительности печи при отклонениях напряжения определяется по формуле:

$$\Delta \Pi_n = \frac{\Pi_{\phi} - \Pi_n}{\Pi_n} = \frac{t_{нл.н} - 1}{t_{нл.ф}}, \quad (4.16)$$

где Π_{ϕ} – фактическая производительность при отклонениях напряжения;

Π_n – производительность при номинальном напряжении сети.

Изменения удельных расходов электроэнергии при отклонениях напряжения могут быть определены по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta a_y &= \frac{a_{y.ф} - a_{y.н}}{a_{y.н}} = \frac{a_{y.ф}}{a_{y.н}} - 1; \\ a_{y.н} &= \frac{A_n}{G_m}, \end{aligned} \quad (4.17)$$

где $a_{y.ф}, a_{y.н}$ – удельный расход активной энергии при фактическом напряжении и номинальном, соответственно;

A_n – активная электроэнергия, затрачиваемая на плавку, определяется по (4.12).

Вопросы для самопроверки

- 1 Как влияют колебания напряжения в электрических сетях, питающих ЭТУ на их работу?
- 2 Как влияет несимметрия напряжений и токов на работу руднотермических печей и многофазных вентильных выпрямителей?
- 3 На работу каких ЭТУ влияет несинусоидальность напряжения?
- 4 Привести примеры влияния отклонений напряжения на работу ЭТУ (машин контактной сварки, установок дуговой сварки, вентильных преобразователей и т.д.).
- 5 Как зависит производительность электротермических установок от уровня напряжения?
- 6 Как влияют отклонения напряжения на производительность ДСП?
- 7 Как влияют отклонения напряжения на время нагрева и срок службы нагревателей печей сопротивления (привести и объяснить формулы)?
- 8 Как влияют отклонения напряжения на время плавки ДСП (привести и объяснить формулу)?
- 9 Как оценить изменение производительности и удельных расходов электроэнергии в ДСП при отклонениях напряжения?

5 РАСЧЕТ УЩЕРБА ОТ НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОГО КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

5.1 Составляющие экономического ущерба

ПКЭ оказывают непосредственное влияние на экономичность режимов работы различных систем электроснабжения. При отклонении ПКЭ от норм ГОСТ 13109-97 появляется экономический ущерб, который представляет собой добавочные затраты на выпуск промышленной продукции. Он складывается из технологической V_m и электромагнитной V_e составляющих [1]:

$$V_{\Sigma} = V_m + V_e \quad (5.1)$$

В технологическую составляющую для ЭТУ входят ущербы от изменения производительности, брака продукции и изменения срока службы установок.

К электромагнитным составляющим ущерба относятся ущербы от изменения потребления активной и реактивной энергии, потерь активной энергии, а также срока службы трансформаторов.

На технологическую составляющую ущерба для большинства ЭТУ оказывают влияние только отклонения напряжения, а на электромагнитную составляющую – отклонения, несимметрия и несинусоидальность напряжения.

5.2 Расчет ущерба для печей сопротивления

Суммарный ущерб для печей сопротивления определяется уравнением [1]:

$$V_{\Sigma} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6, \quad (5.2)$$

где V_1 , V_2 , V_3 , V_4 , V_5 , V_6 – ущербы от изменения соответственно производительности (V_1), брака продукции (V_2), потребления активной энергии (V_3), потерь активной мощности (V_4), потребления реактивной энергии (V_5) и срока службы нагревателей (V_6).

Годовой ущерб от изменения производительности V_1 для одной печи определяется по формуле

$$V_1 = P_e C \sum_{i=1}^n \Delta P_i, \quad (5.3)$$

где P_e – годовая производительность печи, т/г;

C – себестоимость тонны изделия; грн/т;

ΔP_i – изменение производительности при δU_i отклонении напряжения (о.е.);

n – количество δU_i отклонений напряжения.

Ущерб от брака продукции V_2 для печей отжига равен нулю при отклонениях напряжения в пределах $\pm 15\%$.

Ущерб от изменения потребления активной энергии U_3 определяется по формуле:

$$U_3 = P_{ном} \cdot C_{у.э} \sum_{i=1}^n K_{\delta U_i} \cdot t_i, \quad (5.4)$$

где $P_{ном}$ – номинальная мощность печи, кВт;
 $C_{у.э}$ – удельная стоимость электроэнергии, грн/кВт·час;
 $K_{\delta U_i}$ – относительное изменение напряжения на i -м интервале, о.е;
 t_i – годовое число часов работы печи при δU_i -м отклонении напряжения (час).

Годовые ущербы от потерь активной энергии (U_4) и потребления реактивной энергии (U_5) составляют:

$$U_4 = \Delta P_{ном} \cdot C_{у.э} \sum_{i=1}^n K_{\delta U_i}^2 \cdot t_i, \quad (5.5)$$

$$U_5 = Q_{ном} \cdot k_2 \cdot C_{у.э} \sum_{i=1}^n K_{\delta U_i} \cdot t_i, \quad (5.6)$$

где k_2 – экономический эквивалент реактивной мощности;

Для печей сопротивления $Q_{ном} = 0$, поэтому $U_5 = 0$.

Ущерб от изменения срока службы нагревателей U_6 :

$$U_6 = C_n \frac{t_z}{t_{сл.н}} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\delta U_i}} - 1, \quad (5.7)$$

где C_n – стоимость нагревателей, грн;

t_z – годовая продолжительность работы печи, ч;

$t_{сл.н}$ – срок службы нагревателей при номинальном напряжении, ч.

5.3 Расчет ущерба для дуговых электродпечей

Суммарный ущерб для дуговых печей выражается уравнением

$$U_{\Sigma} = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6 + U_7, \quad (5.8)$$

где $U_1 - U_5$ – определяются аналогично (5.3) – (5.6) (для ПС);

U_6 и U_7 – ущербы, связанные с изменением расхода электродов (U_6) и сроком службы питающего трансформатора (U_7).

Ущерб от изменения расхода электродов U_6 определяется по формуле:

$$U_6 = \frac{C_{эл} (t_{пл.н} - t_{пл.ф})}{t_{сл} \cdot S_{т.ном} \cdot t_{пл.ф}}, \quad (5.9)$$

где $C_{эл}$ – стоимость электрода, грн;

$t_{сл}$ – время службы электрода, ч;

$S_{т.ном}$ – номинальная мощность трансформатора;

$t_{пл.н}$; $t_{пл.ф}$ – время плавления при номинальном и фактическом напряжении.

Ущерб от изменения срока службы понижающего трансформатора печи:

$$U_7 = \Delta t \cdot E_n \cdot K, \quad (5.10)$$

где Δt – относительное сокращение срока службы трансформатора, о.е.;

K – капитальные затраты на трансформатор, грн;

E_n – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений, о.е.

5.4 Расчет ущерба для электросварочных машин

Полный ущерб для сварочных машин можно записать формулой:

$$U_{\Sigma} = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6 + U_7 + U_8 \quad (5.11)$$

где U_6 – ущерб от изменения затрат на электроды;

U_7 – ущерб от изменения срока службы гибких кабелей на подвесных машинах;

U_8 – ущерб от изменения срока службы сварочного трансформатора.

В зависимости от вида сварочных машин ряд составляющих ущерба в формуле (5.11) может отсутствовать. Например, для всех одно- и многоточечных, шовных и рельефных сварочных машин $t_{св} = const$, поэтому $U_1 = 0$. Для всех машин, кроме подвесных, $U_7 = 0$. Составляющие $U_2 - U_5$ для сварочных машин определяется по выражениям аналогичным (5.3-5.6)

Ущерб от брака продукции U_2 будет пропорционален количеству некачественных точек (деталей).

Брак при сварке может быть двух видов:

- а) деталь после сварки в технологическом процессе участвовать не может (неисправимый брак);
- б) деталь после сварки направляется на дефектную площадку, где брак устраняется (исправимый брак).

Неисправимый брак наиболее часто возникает при рельефной и стыковой сварках.

При точечной, шовной и многоточечной сварках в большинстве случаев брак от отклонения напряжения можно исправить:

$$U_2 = u_{2y} \cdot n_z \cdot E_i, \quad (5.12)$$

где u_{2y} – удельный ущерб от брака при сварке одной точки или детали, грн/шт.

n_z – число точек или деталей, свариваемых за год;

E_i – вероятность брака от отклонений напряжения, которая соответствует вероятности выхода напряжения за допустимые границы.

Удельный ущерб от брака при сварке одной точки при исправном браке определяется из соотношения

$$V_{2y} = E_n \cdot K_{y.k} + 2,5C_{y.z} + C_{y.z.g.v.}, \quad (5.13)$$

а при неисправном браке:

$$V_{2y} = E_n \cdot K_{y.k} + C_{y.l.p} + 2,5C_{y.z} + C_{y.z.g.v.}, \quad (5.14)$$

где $K_{y.k}$ – удельные капитальные затраты на сварку одной точки или детали, грн/шт;

$C_{y.l.p}$ – удельная стоимость предварительной обработки детали, грн/шт;

E_n – нормативный коэффициент кап.вложений;

$C_{y.z}$ – заработная плата, выплачиваемая сварщику за сварку одной точки, грн/шт;

$C_{y.z.g.v.}$ – удельная стоимость электроэнергии, воздуха, воды, грн/кВт ч; грн/м³.

Ущерб от изменения затрат на электроды и срока службы кабелей на подвесных машинах находятся по формулам:

$$V_6 = 2C_{y.zl} \cdot n_z \cdot E_i; \quad (5.15)$$

$$V_7 = 2C_{y.z.k} \cdot n_z \cdot E_i, \quad (5.16)$$

где $C_{y.zl}$ и $C_{y.z.k}$ – удельные стоимости электрода и замены гибкого кабеля, приходящиеся на одну точку;

E_i – вероятность выхода напряжения за допустимые пределы;

$$V_8 = \Delta t \cdot E_n \cdot K, \quad (5.17)$$

где Δt – относительное сокращение срока службы трансформатора;

K – капитальные затраты на сварочный трансформатор;

E_n – нормативный коэффициент окупаемости капитальных вложений.

Вопросы для самопроверки

- 1 Какие составляющие ущерба возникают при отклонениях ПКЭ от норм ГОСТ 13109-97?
- 2 Как определяются составляющие суммарного ущерба для ПС?
- 3 Как определяются составляющие суммарного ущерба для дуговых электропечей?
- 4 Как определяются составляющие суммарного ущерба для электросварочных машин?

6 СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭТУ

6.1 Требования, предъявляемые к схемам электроснабжения электро-технологических установок

Схемы питания ЭТУ должны удовлетворять требованиям надежности, экономичности и обеспечивать установленные ГОСТом показатели качества электроэнергии (ПКЭ).

Экономически целесообразная схема электроснабжения определяется на основании технико-экономического расчета по методу наименьших приведенных затрат:

$$Z = E_n \cdot K + И + Y_{k.z} + Y_{n.z}, \quad (6.1)$$

где E_n – нормативный коэффициент эффективности капиталовложения;

K – капиталовложения в схему электроснабжения и устройства, обеспечивающие качество электроэнергии, тыс.грн;

$И$ – эксплуатационные издержки на ремонт и потери электроэнергии, тыс.грн/год;

$Y_{k.z}$ – ущерб, обусловленный электроэнергией пониженного качества (электромагнитная и технологическая составляющая), тыс.грн/год;

$Y_{n.z}$ – ущерб, обусловленный браком или недоотпуском продукции из-за перебоев в электроснабжении, тыс.грн/год

$$Y_{k.z} = Y_{\Sigma} + Y_{m\Sigma}. \quad (6.2)$$

Электромагнитная составляющая ущерба Y_{Σ} определяется в основном, дополнительными потерями активной мощности и сокращением срока службы изоляции электрических машин, трансформаторов, кабелей и конденсаторов.

Суммарное значение электромагнитной составляющей ущерба при наличии отклонений δU , колебаний δU_i , несимметрии K_{2U} и несинусоидальности K_{IU} напряжения в сети с числом N узлов запишется в виде [1]:

$$Y_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N (Y_{\delta U} + Y_{\delta U_i} + Y_{K_{2U}} + Y_{K_{IU}}). \quad (6.3)$$

Технологическая составляющая ущерба $Y_{m\Sigma}$ определяется в основном отклонением напряжения от оптимальных значений. Несимметрия и колебания напряжения влияют на технологическую составляющую ущерба дополнительными отклонениями напряжения.

Электромагнитная составляющая ущерба для различных предприятий находится в пределах 7500-30000 грн., а технологическая – в пределах 10000-100000 грн., поэтому экономически целесообразно улучшать качество электроэнергии в электрических сетях с ЭТУ.

По надежности электроснабжения ЭТУ делятся на потребители 1, 2 и 3-й категории. В зависимости от категоричности определяется и ущерб от перерыва электроснабжения. Он складывается из двух составляющих: прямого ущерба Y_n , связанного с самим фактом перерыва и учитывающего брак продукции, простой персонала и т.п., и дополнительного Y_o , связанного с длительностью перерыва и учитывающего недоотпуск продукции, т.е.:

$$Y_{н.о} = Y_n + Y_o. \quad (6.4)$$

Величина народнохозяйственного ущерба от перерывов в электроснабжении определяется по соответствующим методикам.

В настоящее время на промышленных предприятиях получили распространение радиальная, магистральная и смешанная схемы распределения электроэнергии.

Радиальная схема применяется при крупных сосредоточенных нагрузках, расположенных в различных направлениях от источника питания. Она обладает большой гибкостью и удобствами в эксплуатации.

При магистральной схеме питания нескольких потребителей осуществляется одной или двумя параллельными линиями. Магистральные схемы выполняются одиночными и двойными, с односторонним и двухсторонним питанием. Такие схемы позволяют наиболее экономично осуществлять принципы разукрупнения подстанций и приближать высшее напряжение к потребителям электроэнергии.

Смешанные схемы питания применяются на крупных предприятиях, имеющих большое количество различных групп электроприемников.

Питание ЭТУ можно осуществлять по радиальной, магистральной и смешанной схеме в зависимости от мощности, количества, взаимного расположения.

6.2 Схемы электроснабжения печей сопротивления

Структура системы электроснабжения (СЭС) печей сопротивления (ПС) определяется их назначением, мощностью и типом, местом установки в цехе. Печи могут использоваться в виде одиночных установок или групп установок.

Печи сопротивления подключаются к электрическим сетям низкого напряжения. При суммарной мощности электропечей до нескольких сотен киловатт печи подключают к общецеховым сетям напряжением 380 В и питают совместно с другими приемниками цеха. При больших мощностях электропечная нагрузка выделяется на отдельные цеховые трансформаторы.

Для питания ПС используют как радиальные, так и магистральные схемы.

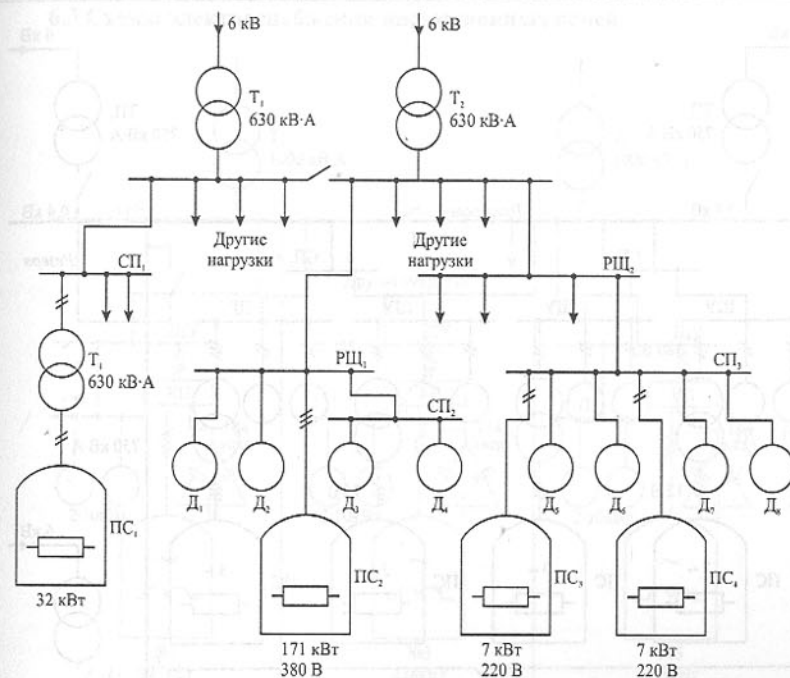


Рисунок 6.1 – Схема электроснабжения ПС отделения оцинкования посуды

РЩ1, РЩ2 – распределительные щиты; СП1, СП2 – силовые пункты; ПС1 – печь обжига захватных приспособлений; ПС2 – калорифер сушильной камеры; ПС3, ПС4 – печи для плавки олова; Д1-Д8 – двигатели вспомогательных механизмов.

Радиальные схемы (рис. 6.1) находят применение при питании электропечных установок малой и большой мощности, при размещении печей неудобном для внедрения магистральных схем. Печи малой мощности при радиальных схемах часто объединяются в группы и подключаются к распределительным силовым сборкам цеха.

Мощные печи подключаются непосредственно к распределительному щиту низкого напряжения цеховой ТП.

Распределение электрической энергии к ПС осуществляется с помощью кабельных линий, проложенных в полу, по стенам цеха, кабельным каналам и шинопроводами.

Магистральные схемы (рис. 6.2) применяются при упорядоченном расположении ПС вдоль цеха и при мощности печей около 200-400 кВт. В качестве магистрального токопровода используются комплектные токопроводы типов ШМА-68 (на токи 1600-2500А) и ШМА-59 (на токи 4000А). Для повышения надежности электроснабжения и обеспечения необходимой мощности питания применяют двух и трехстороннее питание токопроводов, кольцевание их и использование резервных перемычек.

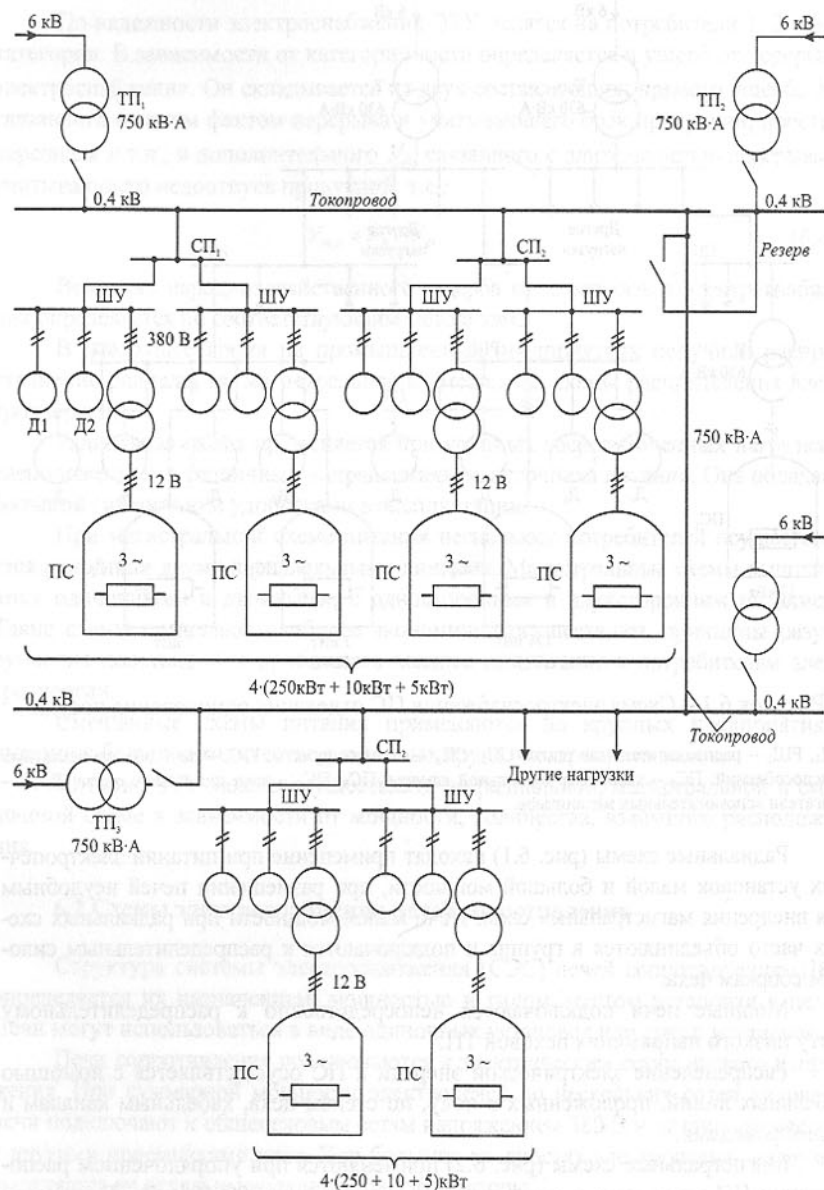


Рисунок 6.2 – Схема электроснабжения ПС цеха сушки и запечки изоляции электрических машин

ТП₁-ТП₄ – цеховые трансформаторы подстанции; СП₁-СП₃ – силовые пункты; ШУ – щит управления; ПС – печь сопротивления с трансформатором; Д₁ – двигатель вентилятора; Д₂ – двигатель тележки.

6.3 Схемы электроснабжения индукционных печей.

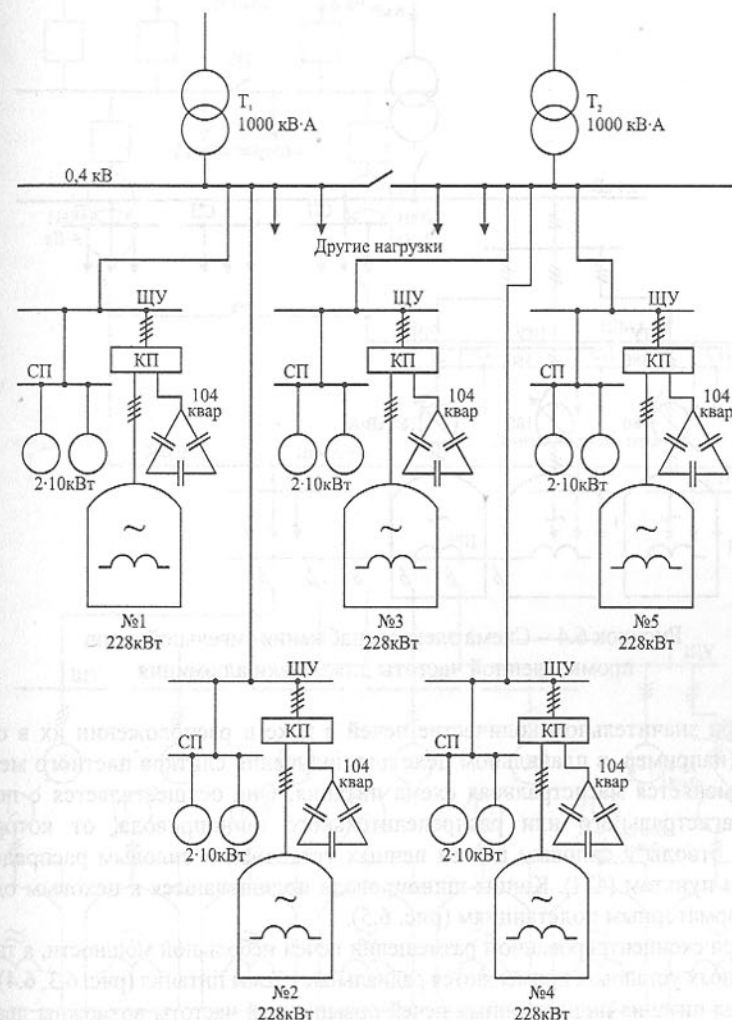


Рисунок 6.3 – Схема электроснабжения канальных печей для плавки цинка

Индукционные печи промышленной частоты могут питаться либо от цеховой сети непосредственным включением (рис. 6.3) или через регулировочные автотрансформаторы (трансформаторы) (рис. 6.4), либо от высоковольтной сети через специальные печные трансформаторы (рис. 6.6). Печи повышенной частоты питаются от машинных (рис. 6.5) и статических преобразователей (рис. 6.6). Двигатели машинных преобразователей и трансформаторы статических преобразователей в зависимости от установленной мощности могут быть низковольтными и высоковольтными.

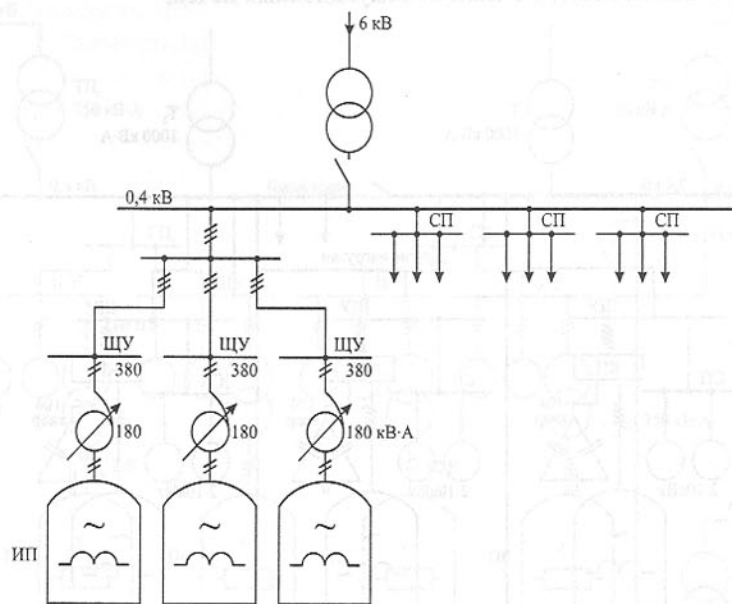


Рисунок 6.4 – Схема электроснабжения тигельной печи промышленной частоты для плавки алюминия

При значительном количестве печей в цехе и расположении их в одну линию (например, в плавильном цехе для получения слитков цветного металла) применяется магистральная схема питания. Она осуществляется с помощью магистрального или распределительного шинпровода, от которого берутся отводы к силовым щитам печных установок и силовым распределительным пунктам (СП). Концы шинпровода подключаются к цеховым однотрансформаторным подстанциям (рис. 6.5).

При сконцентрированном размещении печей небольшой мощности, а также для мощных установок применяются радиальные схемы питания (рис. 6.3, 6.4).

Для питания индукционных печей повышенной частоты возможны два варианта схем электроснабжения: питание печей от индивидуальных преобразователей (рис. 6.5, 6.6) и питание группы печей от сборных шин, на которые работает один общий преобразователь или группа преобразователей, соединенных параллельно. Второй вариант получил широкое распространение при электроснабжении установок сквозного нагрева, применяемых на машиностроительных и подобных им предприятиях.

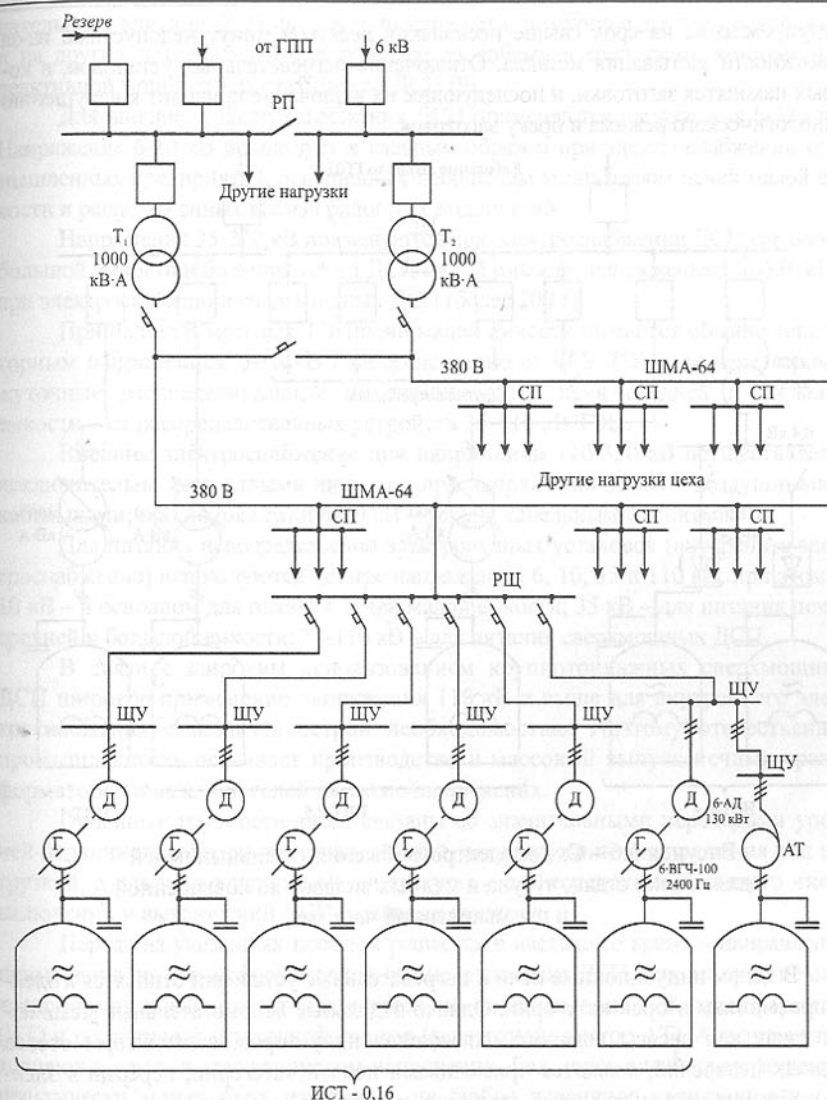


Рисунок 6.5 – Схема электроснабжения тигельных печей для плавки алюминия на повышенной частоте

Что касается режимов работы, то каналные индукционные печи работают круглосуточно и перебои в электроснабжении для них нежелательны.

Режим работы тигельных печей и нагревательных установок зависит от работы оборудования цеха. В соответствии с этим и определяется допустимость перерывов в их электроснабжении. Отключение работающих плавильных печей без

предупреждения на срок свыше нескольких десятков минут недопустимо из-за возможности застывания металла. Отключение нагревательных установок, в которых находятся заготовки, и последующее их включение приводит к нарушению технологического режима и браку заготовок.

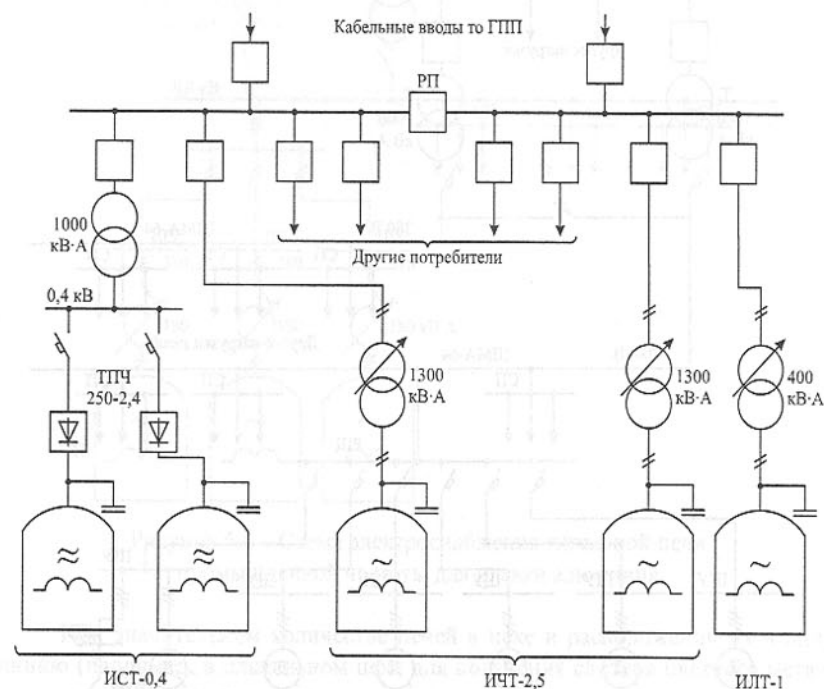


Рисунок 6.6 – Схема электроснабжения тигельных печей для плавки стали, чугуна и медных сплавов на повышенной и промышленной частоте

В целом индукционные печи и нагревательные установки относятся к электроприемникам второй категории. Однако отдельные вспомогательные механизмы, такие как насосы водяного охлаждения индукторов, вентиляторы отсоса вредных испарений, являются приемниками первой категории, перерыв в электроснабжении которых может привести к серьезным авариям и нарушениям нормальных условий труда. Все это должно учитываться при организации электроснабжения индукционных печей.

6.4 Схемы электроснабжения ДСП

Построение рациональных схем электроснабжения ДСП определяется рядом условий: числом, емкостью и мощностью ДСП; уровнем напряжения внешнего и внутреннего электроснабжения; параметрами печных трансформаторов; выбором коммутационной аппаратуры; способами и средствами снижения отри-

цательного влияния ДСП на электрические сети, питающие другие предприятия и на других потребителей предприятия; способами и средствами компенсации реактивной мощности, потребляемой ДСП [9].

Для внешнего электроснабжения ДСП применяются напряжения 6-330 кВ. Напряжение 6-10 кВ используется главным образом при электроснабжении промышленных предприятий, оснащенных небольшим количеством печей малой емкости и расположенных вблизи районных подстанций.

Напряжения 35-220 кВ применяются при электроснабжении ДСП средней и большой емкости и больших групп ДСП малой емкости; напряжения 110-330 кВ – при электроснабжении сверхмощных ДСП (более 200 т).

При наличии местных ТЭЦ печи малой емкости питаются обычно генераторным напряжением 6-10 кВ непосредственно от ГРУ ТЭЦ или через промежуточные распределительные подстанции (РП), печи средней и большой емкости – от распределительных устройств 35-110 кВ ТЭЦ.

Внешнее электроснабжение при напряжении 110-330 кВ осуществляется исключительно воздушными линиями; при напряжении 35 кВ – воздушными и кабельными; при напряжении 6-10 кВ – только кабельными линиями.

Для питания непосредственно электропечных установок (внутреннее электроснабжение) используются четыре напряжения: 6, 10, 35 и 110 кВ, при этом 6, 10 кВ – в основном для питания печей малой емкости; 35 кВ – для питания печей средней и большой емкости; 110 кВ – для питания сверхмощных ДСП.

В связи с широким использованием крупнотоннажных сверхмощных ДСП широкое применение напряжения 110 кВ и выше для внутреннего электроснабжения становится острой необходимостью. Поэтому отечественная промышленность осваивает производство и массовый выпуск печных трансформаторов и выключателей на такие напряжения.

Основные трудности здесь связаны со значительными перепадами уровней первичного и вторичного напряжений, регулированием напряжения под нагрузкой, а для коммутационной аппаратуры – с обеспечением большого числа включений и выключений ДСП в рабочих режимах.

Первая из указанных проблем решается в настоящее время в направлении применения двухтрансформаторной схемы включения ДСП, при которой печной трансформаторный агрегат разделяется на собственно печной трансформатор (ПТ) и регулировочный трансформатор (автотрансформатор АТ). Агрегаты изготовляют в одно- и двухкорпусном исполнении. Регулировочный трансформатор практически может быть изготовлен на любое первичное напряжение и при двухкорпусном варианте печного агрегата установлен за пределами цеха.

Вторая проблема решена пока на уровне напряжения 110 кВ, однако надежность изготавливаемых выключателей еще недостаточна. Поэтому массовыми все еще остаются воздушные электропечные выключатели, изготавливаемые на напряжение 35 кВ. Эти выключатели после примерно 250-300 операций требуют профилактического ремонта. Поэтому для повышения надежности питания ДСП ставят параллельно два выключателя, работающие попеременно. При групповой работе ДСП иногда один резервный выключатель ставят на две-три печи.

По надежности электроснабжения ДСП, как и большинство ЭТУ, относятся к электроприемникам второй категории, допускающим перерыв в электроснабжении на время ручного перехода на резервное питание. Однако необходимо иметь в виду, что отключения печи вызывают снижение производительности, рост удельного расхода электроэнергии из-за потерь аккумулированного печью тепла. Поэтому допустимая длительность перерыва в электроснабжении должна определяться размером ущерба, вызываемого этими факторами.

Расчеты показывают, что ущерб, связанный с переводом ДСП на резервное питание вручную, не превышает затрат на установку автоматического ввода резерва, в связи с чем надобность в нем отпадает. На этом же основании для одиночных ДСП не предусматривают 100%-го резервного питания с прокладкой отдельной резервной линии. Резервирование питания ДСП осуществляется в основном на питающих подстанциях путем использования двойной системы сборных шин или двух-трех секций. В более редких случаях прокладывают резервные линии на группу ДСП, питающихся от одной секции.

Наиболее распространенным вариантом электроснабжения ДСП на современных предприятиях является питание их через общезаводские ГПП. При этом раздельное питание ДСП от других потребителей обеспечивается применением двойной системы шин, позволяющей выделить печную нагрузку на отдельные силовые трансформаторы или вводы (рис. 6.7).

Однако двойная система сборных шин является сложным и дорогим устройством, требующим значительных капитальных затрат и большого расхода материалов и электрооборудования. Кроме того, велика вероятность ошибочных операций с шинными разъединителями, а аварии возникающие при этом, приводят к тяжелым последствиям и значительным перерывам в электроснабжении.

В целях упрощения схем и конструкций ГПП группы ДСП часто питают через промежуточные распределительные подстанции, которые располагают непосредственно в электроплавильных цехах (ЭСПЦ) или около них (рис. 6.7).

На ГПП от подстанции энергосистемы подходят две воздушные линии 220 кВ. На ГПП установлены два трансформатора мощностью по 125 МВА с номинальным напряжением 220/35 кВ, служащие для питания только электропечной нагрузки, и два автотрансформатора мощностью по 240 МВА с номинальными напряжениями 220/110/6 кВ, от которых питаются другие потребители завода и в том числе не печные нагрузки цеха на напряжении 6 кВ.

От трансформаторов ГПП по двум воздушным токопроводам 35 кВ, выполненным проводами марки АСО-500 (по три провода на фазу), электроэнергия подается на распределительную подстанцию (РП) ЭСПЦ-2, к трансформаторам ГПП токопроводы подключены наглухо. Выключение и включение токопроводов осуществляется на стороне 220 кВ трансформаторов.

В ЭСПЦ-2 установлены три печи: одна печь емкостью 100 т с трансформатором мощностью 25 МВА и две печи емкостью 200 т с трансформаторными агрегатами мощностью по 60 МВА в двухкорпусном исполнении. Регулировочный автотрансформатор установлен в помещении печной подстанции в одной камере с печным трансформатором.

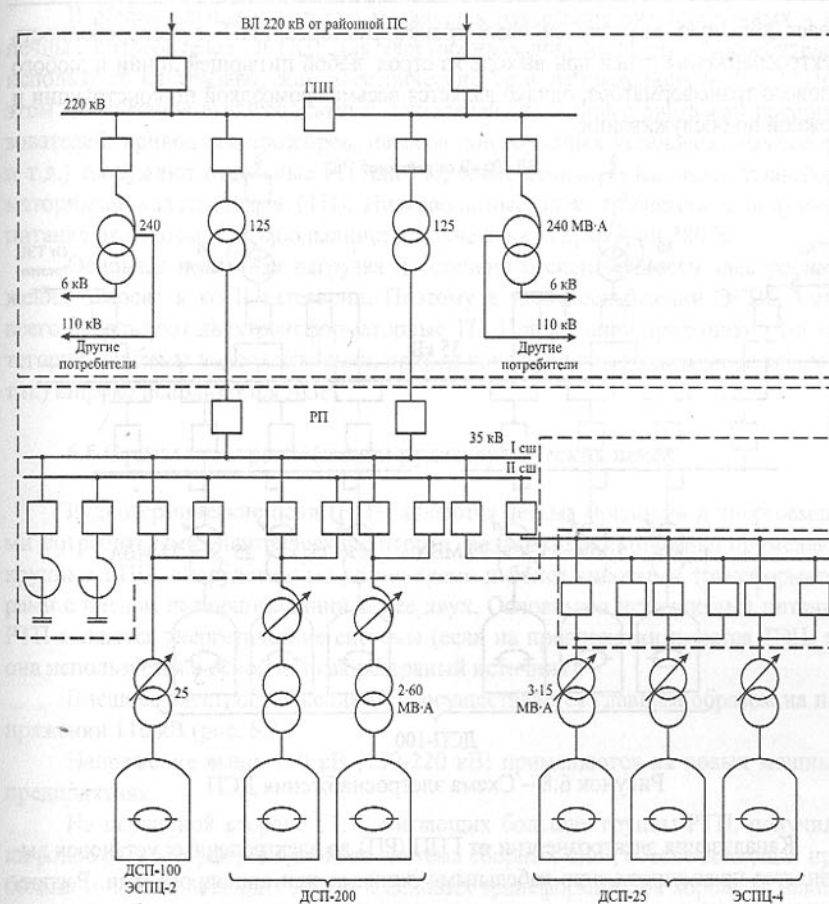


Рисунок 6.7 – Схема электроснабжения ДСП

Оперативное управление печами осуществляется воздушными выключателями типа ВВП-35. На каждую печь установлено по два выключателя, позволяющие подключить печь к любой системе шин и выводить один из выключателей в ремонт.

Опыт проектирования и эксплуатации показывает, что мощные ДСП целесообразнее питать от отдельных ГПП, сооружаемых вблизи ЭСПЦ (рис. 6.8). В цехе установлено 6 печей ДСП-100 с трансформаторами мощностью: 4х25, 29 и 32 МВА. Схема питания печей построена по двухсекционному принципу с дополнительной обходной системой шин. Для сокращения числа печных выключателей на каждой секции устанавливается только один резервный выключатель и дополнительная обходная система шин. В схеме предусмотрен холодный резерв (кабельные вводы 35 кВ от местной ТЭЦ). Силовые трансформаторы получают питание по воздушным линиям 110 кВ от районной подстанции. Схема обеспе-

чивает хорошую загрузку силовых трансформаторов ГПП и бесперебойность электроснабжения печей при выходе из строя любой питающей линии и любого силового трансформатора, однако является весьма громоздкой по конструкции и сложной по обслуживанию.

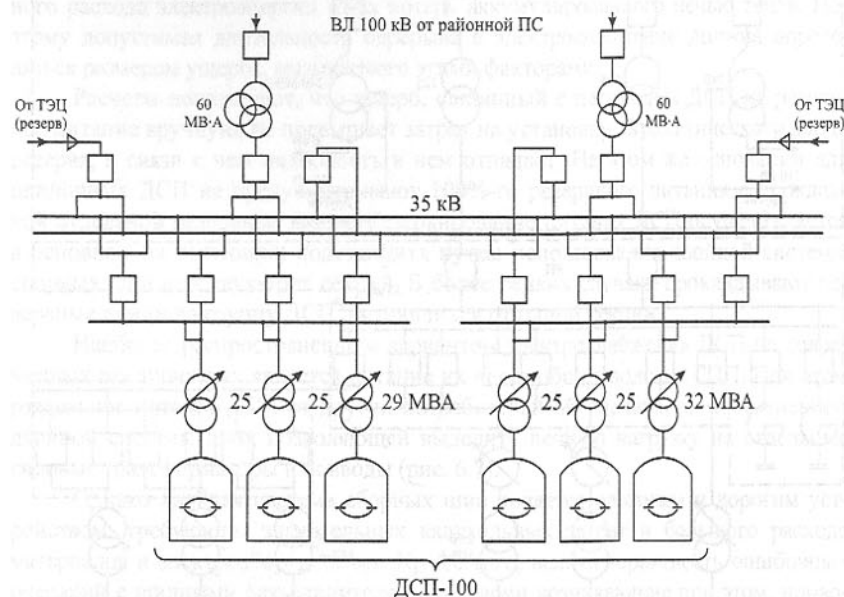


Рисунок 6.8 – Схема электроснабжения ДСП

Канализация электроэнергии от ГПП (РП) до электропечных установок выполняется преимущественно кабельными линиями или шинопроводами. Распределение электроэнергии по печам производится в основном по радиальным схемам (рис. 6.8). Магистральные схемы широкого распространения не получили, так как они снижают надежность электроснабжения, не позволяют отделять ДСП от других потребителей и не обеспечивают равных условий по уровню напряжения между ДСП: печи, подключенные к концу магистрали, имеют более низкие средние значения напряжения, а следовательно, меньшую производительность, чем печи, подключенные к началу магистрали. Повышение надежности электроснабжения при магистральной схеме обеспечивается применением двойной магистрали (питание ДСП, расположенных в ЭСПЦ-4, рис. 6.7).

Важным вопросом при проектировании систем электроснабжения ДСП является вопрос электроснабжения не печных потребителей ЭСПЦ.

В ЭСПЦ используется большое количество вспомогательных механизмов и устройств, участков, отделений и служб, необходимых для нормальной работы основных технологических агрегатов – электропечей. Установленная мощность не печных электроприемников достигает 15-25% общей мощности цеха.

В общем случае характерным является раздельное питание печных и не печных потребителей ЭСПЦ. Для электроснабжения не печных потребителей используют внутривозовские электрические сети напряжением 6-10 кВ. При этом для питания высоковольтных двигателей (приводные двигатели преобразователей, привод компрессоров, насосов, кислородных установок, дымососов и т.д.) сооружают отдельные РП или РП, совмещенные с цеховыми трансформаторными подстанциями (ТП). Низковольтные электроприемники получают питание от цеховых ТП в большинстве случаев на напряжении 380 В.

Основная не печная нагрузка по степени бесперебойности электроснабжения относится ко II категории. Поэтому в электроснабжении ЭСПЦ чаще всего используют двухтрансформаторные ТП. При питании приемников I-й категории (системы водоохлаждения, привод наклона печи, разливные краны и т.п.) широко используется АВР.

6.5 Схемы электроснабжения руднотермических печей

Руднотермические печи (РТП) являются весьма мощными и энергоемкими потребителями электрической энергии, поэтому для их питания применяют крупные ГПП, оборудованные двумя-тремя и более силовыми трансформаторами с числом питающих линий более двух. Основными источниками питания РТП являются энергетические системы (если на предприятии имеется ТЭЦ, то она используется в основном как резервный источник).

Внешнее электроснабжение РТП осуществляется главным образом на напряжении 110 кВ (рис. 6.9).

Напряжение выше 110 кВ (150-220 кВ) применяются на новых мощных предприятиях.

На первичной стороне ГПП, питающих большие группы РТП, получила широкое распространение двойная система сборных шин, обеспечивающая при большом числе питающих линий и силовых трансформаторов хорошую маневренность и гибкость оперативных переключений (рис. 6.9). Однако такая система обладает теми же недостатками, которые рассматривались выше. Поэтому на новых предприятиях все большее распространение находят упрощенные схемы внешнего электроснабжения, главным образом за счет внедрения систем глубокого ввода (рис. 6.10) и разукрупнения мощных подстанций на ряд простых двухтрансформаторных подстанций.

Для непосредственного питания установок РТП используется в основном напряжение 10 кВ. Однако при строительстве новых предприятий с мощными РТП рационально осуществлять их питание непосредственно от сетей 35, 110 кВ и выше, шире практикуя систему глубокого ввода.

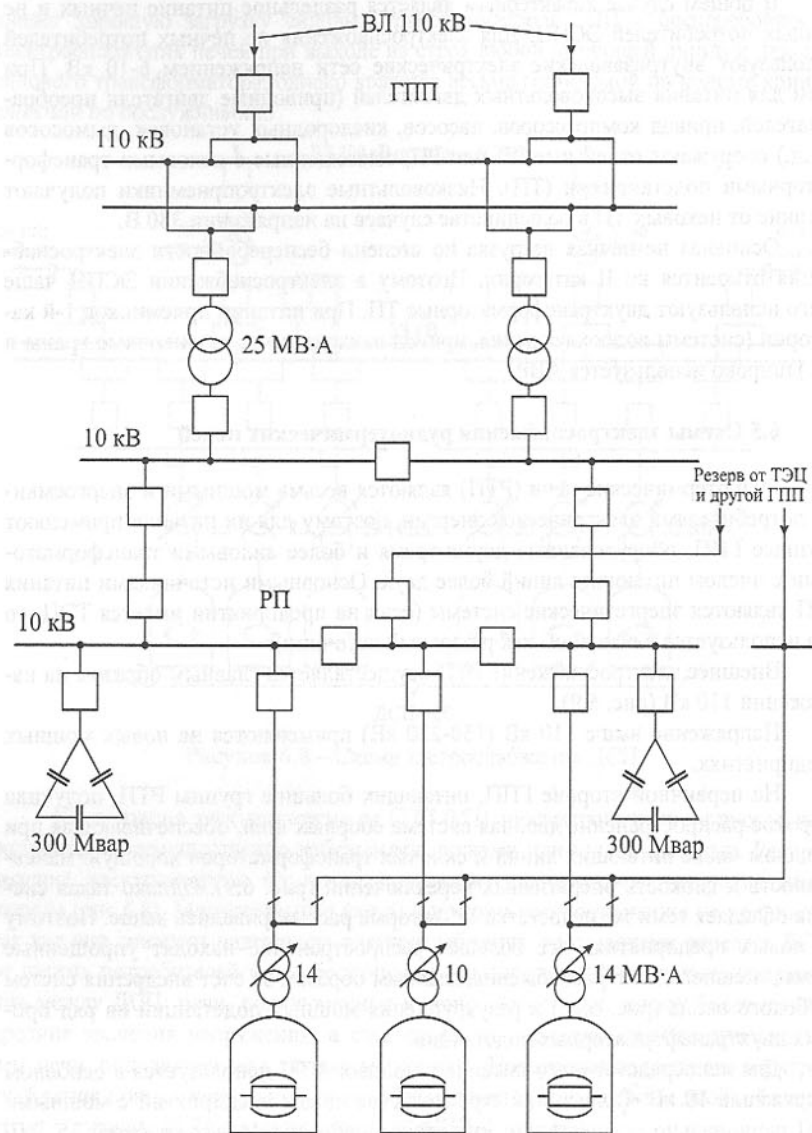


Рисунок 6.9 – Схемы внешнего электроснабжения РТП

Наиболее распространенными схемами питания установок РТП является радиальные, но при большом числе печей, расположенных в одном цехе, применяются также магистральные схемы, причем для повышения надежности электроснабжения преимущественно схема с двойной магистралью.

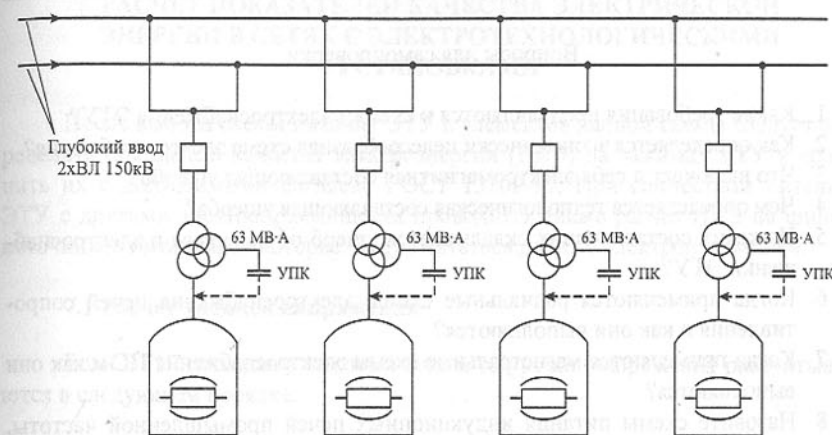


Рисунок 6.10 – Схема внешнего электроснабжения РТП с двойной магистралью

Конструктивно внутризаводские распределительные сети выполняются в виде одиночных кабелей или групп кабелей, проложенных в земле, по стенам и в кабельных каналах цехов. Большие группы кабелей прокладываются в специальных кабельных туннелях или на кабельных эстакадах. В магистральных схемах широко используются мощные шинопроводы. Для снижения токов короткого замыкания и применения более простой и экономичной коммутационной аппаратуры в кабельных линиях, питающих РТП, часто ставят реакторы.

В связи с тем, что РТП работают в непрерывном режиме, они более чувствительны к перерывам электроснабжения. Поэтому для их питания применяют повышенное резервирование – увеличенное число питающих линий внешнего электроснабжения, применение резервных магистралей с односторонним и двухсторонним питанием, резервных линий, применение двойных сквозных магистралей, применение шиносоединительных и межсекционных выключателей и т.д. В целом РТП относятся к потребителям 2-й категории. Они имеют большую тепловую инерцию, поэтому отключение их на 1,5-2 часа не приводит к расстройству технологического процесса.

Вследствие спокойного характера режима работы РТП, широко применяется совместное питание РТП и других потребителей.

В установках РТП для компенсации реактивной мощности используется поперечная и продольная емкостная компенсация. Поперечная компенсация осуществляется централизованно. Реже – индивидуально.

Вопросы для самопроверки

- 1 Какие требования предъявляются к схемам электроснабжения ЭТУ?
- 2 Как определяется экономически целесообразная схема электроснабжения?
- 3 Что включает в себя электромагнитная составляющая ущерба?
- 4 Чем определяется технологическая составляющая ущерба?
- 5 Из каких составляющих складывается ущерб от перерыва в электроснабжении ЭТУ?
- 6 Когда применяются радиальные схемы электроснабжения печей сопротивления и как они выполняются?
- 7 Когда применяются магистральные схемы электроснабжения ПС и как они выполняются?
- 8 Назовите схемы питания индукционных печей промышленной частоты. Как они выполняются?
- 9 Назовите схемы питания индукционных печей повышенной частоты. Как они выполняются?
- 10 Какими условиями определяется рациональная схема электроснабжения ДСП?
- 11 Какие напряжения используются для внешнего и внутреннего электроснабжения ДСП?
- 12 Как решается вопрос использования напряжения 110 кВ и выше для питания крупнотоннажных ДСП?
- 13 Какие применяются схемы для питания ДСП?
- 14 Какие недостатки присущи магистральным схемам электроснабжения ДСП?
- 15 Как решается вопрос электроснабжения не печных потребителей ЭСПЦ?
- 16 Какое напряжение используется для внешнего и внутреннего электроснабжения РТП?
- 17 Как конструктивно выполняются электрические сети, питающие РТП?
- 18 Каким образом обеспечивается надежное питание РТП?

7 РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СЕТЯХ С ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ

После выбора схемы питания ЭТУ и элементов данной схемы следует определить показатели качества электроэнергии (ПКЭ) на зажимах ЭТУ и сравнить их с допустимыми согласно ГОСТ 13109-97. При совместном питании ЭТУ с другими электроприемниками проводится также расчет ПКЭ на шинах источников питания, от которых будут питаться данные электроприемники.

7.1 Расчет уровней напряжения

Если ЭТУ не создают пиковых токов, то уровни напряжения рассчитываются в следующем порядке:

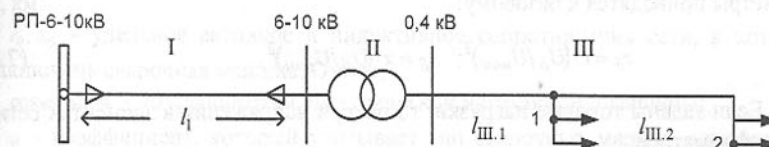


Рисунок 7.1 – Исходная расчетная схема.

- 1) Выбираются две расчетные точки (1 и 2) с наименее и наиболее удаленными ЭТУ.
- 2) Определяется верхний и нижний уровни отклонений напряжения на зажимах расчетных установок:

$$\begin{aligned} \delta U_1' &= \delta U_{\text{шп}}' - \Delta U_1' - \Delta U_{\text{II}}' - \Delta U_{\text{ш.1}}' + \delta U_T; \\ \delta U_2'' &= \delta U_{\text{шп}}'' - \Delta U_1'' - \Delta U_{\text{II}}'' - \Delta U_{\text{ш.2}}'' + \delta U_T, \end{aligned} \quad (7.1)$$

где $\delta U_{\text{шп}}', \delta U_{\text{шп}}''$ - отклонения напряжения на шинах источника питания в период минимума и ($\delta U_{\text{шп}}'$) и максимума нагрузок ($\delta U_{\text{шп}}''$);

$\Delta U_1', \Delta U_1'', \Delta U_{\text{II}}', \Delta U_{\text{II}}''$ - потери напряжения в сети выше 1000 В и в трансформаторе в период минимума и максимума нагрузки, %;

$\Delta U_{\text{ш.1}}', \Delta U_{\text{ш.2}}'$ - потери напряжения в сети до 1000 В в период минимума (т.1) и максимума (т.2) нагрузки, %;

δU_T - добавка напряжения в трансформаторе, %.

- 3) Определяются потери напряжения в элементах сети и трансформаторе. Для трехфазных ЭТУ при заданных активной и реактивной нагрузках потери напряжения на i -ом участке сети в процентах:

$$\Delta U_i = (PR + QX) / (10 \cdot U_{\text{ном}}^2), \quad (7.2)$$

где P, Q - расчетная активная и реактивная мощности участка, кВт(квар);

R, X - активное и индуктивное сопротивление участка, Ом;

$U_{ном}$ - номинальное напряжение, кВ.

Потери напряжения в трансформаторе определяются по упрощенному выражению:

$$\Delta U_{тр} = \frac{(U_a \cos \varphi + U_p \sin \varphi) S_p}{S_{ном}}, \quad (7.3)$$

где U_a, U_p - активная и реактивная составляющие напряжения КЗ, %;

$S_{ном}, S_p$ - номинальная и фактическая (расчетная) мощность трансформатора;

φ - фазовый угол нагрузки.

При определении потерь напряжения в сети с разными напряжениями их параметры приводятся к базовому:

$$r_\delta = r \cdot (U_\delta / U_{ном})^2; \quad x_\delta = x \cdot (U_\delta / U_{ном})^2. \quad (7.4)$$

Если заданы токовые нагрузки, то потери напряжения в элементах сети и в трансформаторе:

$$\begin{aligned} \Delta U'_I &= \frac{\sqrt{3} \cdot I'_{эфI} \cdot l_I (r_{0I} \cos \varphi + x_{0I} \sin \varphi)}{U_{номI}} \cdot 100\%; \\ \Delta U'_II &= \frac{\sqrt{3} \cdot I'_{эфII} \cdot (R_T \cos \varphi + X_T \sin \varphi)}{U_{номI}} \cdot 100\%; \\ \Delta U'_{III,1} &= \frac{\sqrt{3} \cdot I'_{эфIII,1} \cdot l_{III,1} (r_{0III,1} \cos \varphi + x_{0III,1} \sin \varphi)}{U_{ном2}} \cdot 100\%, \end{aligned} \quad (7.5)$$

где $I'_{эфI}, I'_{эфIII}$ - эффективный ток в сети напряжением выше 1000 В и до 1000 В соответственно;

$l_I, l_{III,1}$ - длина сети напряжением выше и до 1000 В;

$r_{0I}, x_{0I}, r_{0III,1}, x_{0III,1}$ - удельные активные и индуктивные сопротивления на первом участке и на третьем участке до точки 1;

R_T, X_T - активное и индуктивное сопротивление трансформатора, приведенное к стороне высокого напряжения ($U_{номI}$);

$U_{ном2}$ - номинальное напряжение на низкой стороне трансформатора.

4) Значения $\Delta U'_I, \Delta U'_II, \Delta U'_{III,2}$ определяются по формулам аналогичным (7.5), но только вместо $I'_{эфI}, I'_{эфIII}$ необходимо подставлять токи $I'_{эфI}, I'_{эфIII}$ для максимальной нагрузки.

5) Значения $\delta U'_1, \delta U'_2$ сравниваются с допустимыми границами отклонений напряжения согласно ГОСТ 13109-97 (для точки 1 - $\delta U'_1 \leq +5\% U_{ном}$; для точки 2 - $\delta U'_2 \geq -5\% U_{ном}$).

Рассмотрим на примере контактной сварки расчет уровней напряжения для ЭТУ, создающих пиковые нагрузки.

Расчет отклонения напряжения основан на использовании упорядоченной диаграммы потерь напряжения и ее двухступенчатой модели (как и при определении расчетного пика нагрузки п. 2.7.3). В этом случае вместо тока i -ой сварочной машины $i_{св,i}$, берется потеря напряжения от источника питания до ее зажимов. Считается, что напряжение на шинах источника питания равно номинальному.

Потеря напряжения на участке сети в процентах:

$$\Delta U_i = a \cdot i_{св,i} \cdot l_i \cdot (r_0 \cos \varphi_i + x_0 \sin \varphi_i) \quad (7.6)$$

где $i_{св,i}$ - сварочный ток i -ой сварочной машины, А; определяется по (2.36);

l_i - длина участка сети от шин ТП до точки подключения сварочной машины, км;

r_0, x_0 - удельное активное и индуктивное сопротивления сети, к которой подключена сварочная машина, Ом/км;

$\cos \varphi_i, \sin \varphi_i$ - коэффициенты электрической нагрузки i -ой машины;

a - коэффициент, который учитывает тип сварочных машин: однофазные, включенные на линейное напряжение; двухфазные, включенные между двумя линейными напряжениями, например между U_{AB} и U_{BC} , и трехфазные. Значение коэффициента a находится из табл. 7.1.

Таблица 7.1 - Значение коэффициента a для сварочных машин

| Тип машин | Расчетные фазы | | |
|----------------------------|----------------|------------|------------|
| | AB | BC | CA |
| AB BC CA | однофазные | | |
| | 2,0 | 0,5 | 0,5 |
| | 0,5 | 2,0 | 0,5 |
| AB, BC AB, CA BC, CA | двухфазные | | |
| | 2,4 | 2,4 | $\sqrt{3}$ |
| | 2,4 | $\sqrt{3}$ | 2,4 |
| ABC | трехфазные | | |
| | $\sqrt{3}$ | $\sqrt{3}$ | $\sqrt{3}$ |

Из равенства площадей упорядоченной диаграммы и ее двухступенчатой модели находится количество сварочных машин, создающих максимальную потерю напряжения

$$\frac{1}{k_{св}} \sum_{i=1}^n \Delta U_i \cdot k_{св,i} = n_1 \cdot \Delta U_{max} + (n - n_1) \Delta U_{min}, \quad (7.7)$$

откуда

$$n_1 = \frac{\frac{1}{k_e} \sum_{i=1}^n \Delta U_i \cdot k_{ei} - n \cdot \Delta U_{\min}}{\Delta U_{\max} - \Delta U_{\min}}. \quad (7.8)$$

Расчетная потеря напряжения определяется по формуле:

$$\Delta U_{\text{расч}} = m_{1x} \cdot \Delta U_{\max} + (m_x - m_{1x}) \Delta U_{\min}. \quad (7.9)$$

Здесь $\Delta U_{\max}, \Delta U_{\min}$ - максимальное и минимальное значение потери напряжения, найденное по формуле (7.6).

Величины m_{1x} и m_x находятся из табл. 2.9 по зависимостям: $m_{1x} = f(n_1; \bar{k}_e)$

и $m_1 = f(n; \bar{k}_e)$.

Данная методика расчета потери напряжения дает некоторое завышение, что обеспечивает фактически более высокий уровень напряжения на зажимах сварочной машины.

Расчетный уровень напряжения в электрической сети, питающей машины контактной сварки,

$$U_{\text{расч}} = U_{\text{ном}} - \Delta U_{\text{расч}} \quad (7.10)$$

должен быть не ниже величины, устанавливаемой технологами.

В том случае, если напряжение на шинах источника питания отличается от номинального, то расчет уровня отклонения напряжения $\delta U_{\text{расч}}$ ведется по (7.1) с учетом (7.6) и (7.10). Тогда расчетная величина напряжения в электрической сети, питающей машины контактной сварки, будет равна

$$U_{\text{расч}} = U_{\text{ном}} - \delta U_{\text{расч}}, \quad (7.11)$$

где $\delta U_{\text{расч}}$ - расчетный уровень отклонения напряжения, В (кВ).

Пример 7.1. Определить уровень напряжения в т.1 (минимальный режим) и в т.3 (максимальный режим) при работе 3-х трехфазных сетей сопротивления, имеющих $k_2 = k_6 = 1$ и подключенных к шиннопроводу ШРА-73 на напряжение 380 В (рис. 7.2).

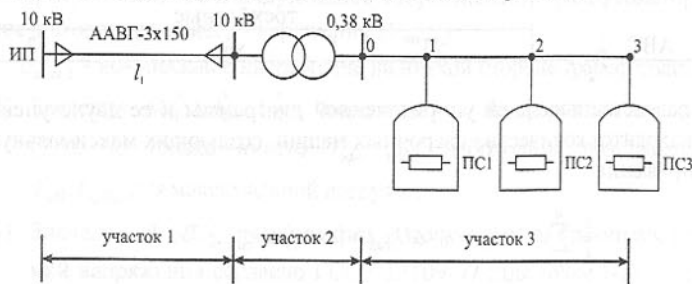


Рисунок 7.2 – Расчетная электрическая схема сети

Параметры сети: ААВГ-3х 150: $r_0 = 0,208 \text{ Ом/км}$; $x_0 = 0,0596 \text{ Ом/км}$; $l_1 = 250 \text{ м}$; $S_{\text{тр}} = 630 \text{ кВА}$; $R_{\text{тр}} = 3,1 \text{ МОм}$; $X_{\text{тр}} = 13,6 \text{ МОм}$ (сопротивления трансформатора приведены к напряжению 380 В); ШРА-73: $r_0 = 0,085 \text{ Ом/км}$; $x_0 = 0,075 \text{ Ом/км}$; $l_{0-1} = 25 \text{ м}$; $l_{0-2} = 35 \text{ м}$; $l_{0-3} = 50 \text{ м}$; $\delta U_{\text{ИП}} = -0,75\%$; $\delta U_T = 1,25\%$ (табл. П.А1, П.А2, П.А3). Исходные и расчетные данные приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2 - Исходные и расчетные данные для примера 7.1

| ЭТУ | P _{ном} , кВт | cos φ | sin φ | I, А | | | ΔU _и % | | | ΔU _Σ % |
|-------------------|------------------------|-------|-------|---------|-----|-----|-------------------|------|------|-------------------|
| | | | | участок | | | участок | | | |
| | | | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | |
| ПС1 | 15 | 0,95 | 0,31 | 0,91 | 24 | 24 | 0,022 | 0,08 | 0,03 | 0,132 |
| ПС2 | 24 | 0,97 | 0,24 | 1,4 | 38 | 38 | 0,038 | 0,11 | 0,06 | 0,208 |
| ПС3 | 80 | 0,98 | 0,20 | 4,7 | 124 | 124 | 0,115 | 0,32 | 0,28 | 0,715 |
| Расчетные формулы | | | | (2.11) | | | (7.5) | | | 1,055 |

По формуле (7.1) находим уровень напряжения в т.1 (U_1) при работе только ПС1.

$$\delta U_1 = -0,75 - 0,132 + 1,25 = 0,37\% < 5\%; \quad U_1 = (1 + 0,0037) \cdot 380 = 381,4 \text{ В.}$$

Рассчитаем уровень напряжения в т.3 (U_3) при работе всех ПС

$$\delta U_3 = -0,75 - 1,055 + 1,25 = -0,56\% < -5\%; \quad U_3 = (1 - 0,0056) \cdot 380 = 377,8 \text{ В.}$$

Пример 7.2. От шиннопровода ШРА-73, подключенного к шинам 0,38 кВ цеховой подстанции (рис. 7.3), получают питание 11 машин точечной контактной сварки: 4 – однофазных, 6 – двухфазных и 1 – трехфазная. Определить расчетный уровень напряжения в шиннопроводе.

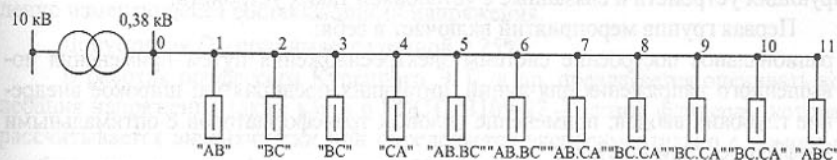


Рисунок 7.3 – Расчетная электрическая схема сети

Параметры ШРА-73: $r_0 = 0,085 \text{ Ом/км}$; $x_0 = 0,075 \text{ Ом/км}$.

$\Delta U_{\max} = 7,5 \text{ В}$; $\Delta U_{\min} = 0,3 \text{ В}$ - для нахождения U_{AB} и $\Delta U_{\min} = 0,25$ - для U_{BC} и U_{CA} .

Из табл. 2.9 находим: $m_x = f(1; 0,04) = 3$; $m_{x1} = f(4; 0,04) = 2$.

По формуле (7.10) рассчитаем максимальную потерю напряжения между фазами АВ, ВС и СА.

$$\Delta U_{M,AB} = 2 \cdot 7,5 + (3 - 2) \cdot 0,3 = 15,3 \text{ В}; \quad \Delta U_{M,BC} = 2 \cdot 7,5 + (3 - 2) \cdot 0,25 = 15,25 \text{ В.}$$

Уровень напряжения в шиннопроводе (7.11): $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = 380 - 15,3 = 364,7 \text{ В}$.

Таким образом, максимальная потеря напряжения в шиннопроводе составляет $U_{\max} = -100 \cdot 15,3 / 380 = -4\%$, что меньше -5% допускаемых ГОСТ 13109-97.

Таблица 7.3 - Исходные и расчетные данные примера 7.2

| фазность МКС | AB | BC | BC | CA | AB, BC | AB, BC | AB, CA | BC, CA | BC, CA | BC, CA | ABC |
|--|--|------------|------------|------------|-------------|-------------|--------------|------------|------------|------------|-------------|
| $S_{нагр}$, кВА | 75 | 75 | 75 | 100 | 300 | 300 | 300 | 150 | 150 | 150 | 450 |
| k_{Σ} , о.е. | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,7 |
| k_{Σ} , о.е. | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,02 | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,01 |
| $\cos \varphi / \sin \varphi$ | 0,6 0,8 | 0,6 0,8 | 0,6 0,8 | 0,6 0,8 | 0,7 0,71 | 0,7 0,71 | 0,65 0,76 | 0,6 0,8 | 0,6 0,8 | 0,6 0,8 | 0,7 0,71 |
| l_{Σ} , км | 0,025 | 0,030 | 0,035 | 0,040 | 0,045 | 0,050 | 0,055 | 0,060 | 0,065 | 0,070 | 0,080 |
| i_{Σ} , А; формулы (2.36), (7.7) | 178 | 178 | 178 | 237 | 316 | 316 | 355 | 197 | 197 | 197 | 479 |
| ΔU_i , В между фазами формулы (7.6); табл. 7.1 | AB | 1,00 | 0,30 | 0,35 | 0,53 | 3,86 | 4,30 | 5,26 | 2,27 | 2,46 | 7,50 |
| | BC | 0,25 | 1,18 | 1,40 | 0,53 | 3,86 | 4,30 | 3,79 | 3,15 | 3,40 | 7,50 |
| | CA | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 2,11 | 2,78 | 3,10 | 5,26 | 3,15 | 3,40 | 7,50 |
| k_{Σ} , о.е.; формула (2.55) | 0,04 | | | | | | | | | | |
| n_i , формула (7.9) | $n_{iAB} = n_{iBC} = n_{iCA} = 4$ | | | | | | | | | | |
| \bar{k}_{Σ} , формула (2.55) | $\bar{k}_{\Sigma AB} = \bar{k}_{\Sigma BC} = \bar{k}_{\Sigma CA} = 0,04$ | | | | | | | | | | |

Повышение уровней напряжения. Для поддержания уровней напряжения в допустимых пределах используют различные методы, которые можно разделить на две группы: не требующие затрат на установку специальных регулирующих устройств и связанные с установкой таких устройств.

Первая группа мероприятий включает в себя:

- рациональное построение системы электроснабжения путем применения повышенного напряжения для линий, питающих предприятия; широкое внедрение глубоких вводов; применение силовых трансформаторов с оптимальными коэффициентами загрузки;
- правильный выбор ответвлений обмоток трансформаторов имеющих устройство переключения обмоток без возбуждения (ПВВ);
- использование перемычек на напряжения до 1 кВ между цеховыми трансформаторами, обеспечивающими отключение части трансформаторов в режиме минимума нагрузок;
- снижение сопротивления системы внутриводского электроснабжения включением на параллельную работу трансформаторов ГПП (используется, если токи КЗ не превышают допустимых значений для коммутационной аппаратуры);
- использование регулировочных возможностей синхронных электродвигателей с автоматическим регулированием тока возбуждения.

Ко второй группе мероприятий по регулированию напряжения относятся:

- установка на ГПП или ПГВ трансформаторов и автотрансформаторов, имеющих устройство регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) с диапазоном регулирования 10-20%;

- применение компенсирующих устройств – батарей конденсаторов (установки продольной и поперечной компенсации реактивной мощности) и синхронных конденсаторов, обеспечивающих регулирование напряжения путем изменения индуктивного сопротивления сети и потоков реактивной мощности;
- применение специальных регуляторов напряжения.

7.2 Расчет колебаний напряжения

Расчет колебаний напряжения ΔU_i осуществляется при оценке влияния ЭТУ на осветительные электроприемники. Оценку допустимости колебаний напряжения в соответствии с ГОСТ 13109-97 следует проводить по кривой допустимых значений размахов изменения напряжения ΔU_i в зависимости от частоты $F_{\Delta U_i}$ или интервала времени между изменениями напряжения $\Delta t_{i,i+1}$, т.е. $\Delta U_i = f(F_{\Delta U_i})$; $\Delta U_i = f(\Delta t_{i,i+1})$, а также по кратковременной P_{Si} и длительной дозе фликера P_{Li} .

Имеются и другие методы оценки колебаний напряжения. Так, например, Смелянский М.Я. и Минеев Р.В. в работе «Влияние дуговых электропечей на системы электроснабжения» предлагают оценивать колебания «дозой мигания» за время $\Theta = 1$ мин

$$D_M = \sqrt{\int_t^{t+\Theta} [\Delta U_{10}(t)]^2 dt}, \quad (7.12)$$

где ΔU_{10} - выражает в процентах разность между десятигерцевой и медленно изменяющейся составляющими напряжения.

Допустимая D_M принимается равной 0,25%.

В работах профессора Куренного Э. Г. и др. предлагается оценивать колебания напряжения также как и в ГОСТ 13109-97 – «дозой фликера», которая рассчитывается аналитически или определяется экспериментально с помощью прибора, называемого фликерметром. Условия допустимости колебаний в этом случае выражается:

$$P_{Li}(t) \leq P_{Li,\delta}; P_{Li,M}(t) \leq P_{Li,\delta}, \quad (7.13)$$

где $P_{Li,\delta}; P_{Li}(t); P_{Li,M}$ - допустимое, текущее и максимальное значение дозы. Расчет колебаний по «дозе фликера» согласно ГОСТ 13109-97 подробно рассматривается в курсе «Электроснабжение».

Рассмотрим расчет колебаний напряжения применительно к кривой ГОСТ 13109-97. Эта кривая построена для периодических колебаний прямоугольно-ступенчатой формы. В том случае, если создаются непериодические колебания, то их можно привести к периодическим эквивалентным по энергии или средней мощности за время контроля процесса t . Так как верхний предел колебаний напряжения в сетях с ЭТУ не превышает 10 Гц, то модель зрения можно представить в виде дифференциальной цепи RL .

Энергия, «запасаемая» в индуктивности при любом изменении напряжения прямоугольно-ступенчатой формы определяется по формуле:

$$W_k = \frac{L \cdot I_{mk}^2}{2}, \quad (7.14)$$

где I_{mk} – наибольшее значение тока дифференцирующего звена;

$$I_{mk} = \frac{\delta U_{tk}}{R}, \quad (7.15)$$

где δU_{tk} – максимальный размах колебаний напряжения.

Таким образом:

$$W_k = \frac{L}{2R^2} \cdot \delta U_{tk}^2. \quad (7.16)$$

Средняя энергия при n колебаниях за период t составит:

$$E_c = \frac{L}{2R^2} \cdot \frac{\sum_{k=1}^n \delta U_{tk}^2}{t}. \quad (7.17)$$

При эквивалентных по энергии (мощности) непериодических колебаниях с размахом $\delta U_{I_{эжв}}$ значение средней мощности процесса колебания будет равно:

$$E_n = \frac{L}{2R^2} \cdot \delta U_{I_{эжв}}^2 \cdot \frac{n}{t}. \quad (7.18)$$

Так как E_c должно быть равно E_n , то приравняв правые части формул (7.17) и (7.18) получим:

$$\delta U_{I_{эжв}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n \delta U_{tk}^2}{n}}. \quad (7.19)$$

Проверка допустимости колебаний напряжения проводится по условию:

$$\delta U_{I_{эжв}} \leq \delta U_{доп}, \quad (7.20)$$

где $\delta U_{доп}$ – определяется по кривой допустимых размахов колебаний согласно ГОСТ 13109-97.

При подключении одной ЭТУ к подстанции или другому источнику питания, где имеется осветительная нагрузка, δU_t в % определяется по формуле:

$$\delta U_{tk} = \frac{I_{\Pi} (R \cos \varphi + X \sin \varphi)}{U_{ном}} \cdot 100, \quad (7.21)$$

где I_{Π} – пиковый ток ЭТУ (определяется по графику или расчетом);

R, X – активное и индуктивное сопротивление сети от ЭТУ до точки, где напряжение принимается постоянным (например, шины ГПП)

$$F_{\delta U_t} = \frac{2k}{t_{ц.с.}} \quad (7.22)$$

$2k$ – количество колебаний за время цикла $t_{ц.с.}$

Если к расчетному узлу подключено несколько ЭТУ, то величину колебаний напряжения $\delta U_{I_{эжв}}$ определяется по формуле:

$$\delta U_{I_{эжв}} = \sqrt{(\delta \bar{U}_t)^2 + D(\delta U_t)}, \quad (7.23)$$

где $\delta \bar{U}_t$ – среднее значение величины размаха колебаний;

$D(\delta U_t)$ – дисперсия величин колебаний напряжения.

Используя правило «трех сигм», т.е.

$$\delta U_{t_{max}} = \delta \bar{U}_t + 3\sigma(\delta U_t), \quad (7.24)$$

величину $\delta \bar{U}_t$ и $\sigma(\delta U_t)$ можно выразить через максимальный размах колебаний

$$\delta \bar{U}_t = \frac{\delta U_{t_{max}}}{2}; \quad \sigma(\delta U_t) = \frac{\delta U_{t_{max}}}{6}. \quad (7.25)$$

Тогда:

$$\delta U_{I_{эжв}} = \sqrt{\left(\frac{\delta U_{t_{max}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\delta U_{t_{max}}}{6}\right)^2} = 0,53 \delta U_{t_{max}}; \quad (7.26)$$

$$\delta U_{t_{max}} = \frac{I_{\Pi M} (R \cos \varphi + X \sin \varphi)}{U_{ном}},$$

где $I_{\Pi M}$ – максимальный ток пика нагрузки суммарного графика.

Для дуговых печей максимальный размах колебаний напряжения можно определить по приближенной формуле:

$$\delta U_{t_{max}} = 1,25 \frac{S_n}{S_{кз}}. \quad (7.27)$$

$$\text{Здесь } S_n = \sqrt{\sum_{i=1}^m S_{\Pi T, i}^2},$$

где $S_{\Pi T, i}$ – номинальная мощность трансформатора i -й печи;

m – число ДСП в группе из N печей, периоды расплава которых совпадают во времени;

$S_{кз}$ – мощность короткого замыкания в точке подключения ДСП.

Частоту эквивалентных колебаний можно ориентировочно принимать:

- для ДСП – $F_{\delta U_i} = 1 - 2 \text{ Гц}$;
- для сварочных машин – $F_{\delta U_i} = 0,5 - 2,5$.

Если известны графики активной и реактивной резкопеременной нагрузки, то размах эквивалентного колебания напряжения определяется по формуле, %:

$$\delta U_{i, \text{экв}} = 100 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{n_k} \frac{\delta Q_i^2}{n_k}} / S_k, \quad (7.28)$$

где δQ_i – значение i -го размаха реактивной мощности, определенное по графику;

n_k – суммарное число размахов за время расчетного цикла.

При значениях суммарного активного r_Σ и реактивного x_Σ сопротивлений сети в расчетной точке одного порядка величину колебаний напряжения определяют по формуле:

$$\delta U_i = (\delta I_a r_\Sigma + \delta I_p x_\Sigma) / U_{ном} \quad (7.29)$$

или $\delta U_i = (\delta P r_\Sigma / x_\Sigma + \delta Q) / S_{кз},$

где $\delta I_a, \delta I_p$ – размахи соответственно активного и реактивного тока;

$\delta P, \delta Q$ – размахи колебаний активной и реактивной мощностей.

Для проверки допустимости $\delta U_{i, \text{экв}}$ вычисляют среднюю частоту колебания по формуле:

$$f_{cp} = n_k / T, \quad (7.30)$$

где T – время цикла работы печи по графику изменения потребляемой реактивной мощности;

n_k – количество колебаний за это время.

Для ДСП при отсутствии графиков реактивной мощности рекомендуется определять размах эквивалентного колебания напряжения по следующим формулам, %:

- для группы одинаковых ДСП

$$\delta U_{i, \text{экв}} = 100 \cdot \sqrt[4]{N} \cdot S_{П.Т} / S_k, \quad (7.31)$$

где N – количество ДСП;

$S_{П.Т}$ – мощность печного трансформатора;

- для группы печей разной мощности

$$\delta U_{i, \text{экв}} = 100 \cdot S_{П.Т. \max} \sqrt[4]{\sum_{i=1}^n (S_{П.Т. i} / S_{П.Т. \max})} / S_{кз}, \quad (7.32)$$

где $S_{П.Т. \max}$ – наибольшая мощность печного трансформатора, МВА;

$S_{кз}$ – мощность короткого замыкания, МВА.

Эквивалентные колебания напряжения для практических расчетов считают допустимыми, если они не превышают 1%.

Пример 7.3 Определить колебания напряжения на шинах 10 кВ при питании 3-х ДСП одинаковой мощности $S_{П.Т} = 8 \text{ МВА}$. Мощность короткого замыкания $S_{кз} = 300 \text{ МВА}$.

Решение. По формуле (7.31), находим

$$\delta U_{i, \text{экв}} = (100 \cdot \sqrt[4]{3} \cdot 8) / 300 = 3,5\% > 1\%.$$

Пример 7.4 Определить колебание напряжения на шинах 35 кВ при питании 4-х ДСП разной мощности: $S_{П.Т1} = S_{П.Т2} = 15 \text{ МВА}$, $S_{П.Т3} = S_{П.Т4} = 25 \text{ МВА}$. Мощность $S_{кз} = 1000 \text{ МВА}$.

Решение. По формуле (7.32), находим

$$\delta U_{i, \text{экв}} = 100 \cdot 25 \cdot \sqrt[4]{80/25} / 1000 = 3,34\% > 1\%.$$

Снижение колебаний напряжения. Одним из путей снижения колебаний напряжения является распределение нагрузок, для чего используют различные схемы и устройства. Наиболее простой является схема, основанная на использовании сдвоенного реактора: спокойные и резкопеременные нагрузки подключаются к различным секциям (обмоткам) реактора. Применение такой схемы для подключения ДСП позволяет в ряде случаев обеспечить на шинах «спокойной» нагрузки колебания напряжения, значения которых не превосходят предельно допустимые.

Для резкопеременных и «спокойных» нагрузок применяются также трансформаторы с расщепленными обмотками. К одной ветви обмотки НН трансформатора подключается спокойная нагрузка, а к другой – резкопеременная.

Для снижения колебаний напряжения применяются установки продольной компенсации (УПК), которые наиболее эффективны при преобладании реактивного сопротивления линии, т.е. когда отношение X_L / r велико, а также при низких значениях коэффициента мощности.

При пиковых нагрузках применение УПК оказывается эффективным средством уменьшения размахов изменения напряжения, что широко используется для электроснабжения сварочных установок и руднотермических печей.

Недостатком УПК является возникновение феррорезонанса токов и субгармонических колебаний. Появление субгармоник может привести к возникновению субгармонического резонанса, при котором наблюдаются периодические колебания напряжения. В результате становится заметным мигание ламп, возникают периодические колебания частоты вращения роторов электродвигателей.

Для резкопеременных нагрузок, когда технико-экономическим анализом доказана нецелесообразность схемных решений, способных снизить до необходимого уровня влияние толковой нагрузки, рекомендуется предусматривать устройства динамической и статической компенсации реактивной мощности.

7.3 Расчёт несинусоидальности напряжения

Целью расчёта является определение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения K_{2U} (3.8) и сравнить его с нормативным согласно ГОСТ 13109-97. Для этого необходимо рассчитать действующее значение напряжения n -ой гармоники U_n .

Исходными для расчёта K_{2U} являются: параметры элементов сети, параметры нагрузок, получающих питание от данной сети, значение мощности КЗ питающей системы.

Если источниками высших гармоник являются ЭТУ напряжением до 1000В и мощность их не превышает 20% мощности трансформатора, устанавливаемого на главной понизительной подстанции (ГПП) предприятия, то расчётная схема составляет только до шин 6-10 кВ источника питания. Если же мощность ЭТУ напряжением до 1000В превышает 20% мощности питающего трансформатора или на предприятии имеются другие источники высших гармоник, в том числе и в сети 6-10 кВ, то расчётная схема должна составляться для всего предприятия. Следует отметить, что при расчете несинусоидальных режимов в электрических сетях выше 1000В учитывается только индуктивные сопротивления элементов сети, элементов сети, а в сетях до 1000 В необходимо учитывать и активные сопротивления.

Для расчёта U_n в (3.8) необходимо предварительно определить ток соответствующей гармоники, который зависит не только от характеристики электрической сети, но и от вида нелинейной нагрузки.

По спектральному составу генерируемых гармоник ЭТУ можно разделить на три группы: ДСП переменного тока, машины контактной сварки переменного тока и ЭТУ, работающие на постоянном токе.

Дуговые сталеплавильные печи являются источниками высших гармоник вследствие нелинейности ВАХ электрической дуги.

ДСП в режиме расплавления генерируют в сеть 2,3,5,7 гармоники. Токи гармоник (кроме тока второй гармоники) зависят от числа и мощности ДСП и для практических расчётов их рекомендуют принимать:

- для одной ДСП

$$I_n = I_{п.т} / n^2, \quad (7.33)$$

где $I_{п.т}$ – номинальный ток печного трансформатора;

n – порядковый номер гармоники

$$I_{п.т} = S_{п.т} / \sqrt{3} U_{ном}; \quad (7.34)$$

- для группы одинаковых ДСП

$$I_{н.гр} = I_n \sqrt{N}, \quad (7.35)$$

где N – число печей, одновременно работающих в режиме расплавления;

- для группы печей разной мощности

$$I_{н.гр} = I_{н.макс} \sqrt{\sum_{i=1}^m (S_{п.т,i} / S_{п.т,макс})}, \quad (7.36)$$

где $S_{п.т,i}$ – мощность i -го печного трансформатора;

$S_{п.т,макс}$ – наибольшая мощность печного трансформатора в группе ДСП;

$I_{н.макс}$ – ток n -ой гармоники печного трансформатора наибольшей мощности;

m – общее число работающих в режиме расплавления печей.

Руднотермические печи генерируют токи 2,3 и 5-ой гармоник, уровни которых в токе не превышают 1–1,5% [1].

Машины контактной сварки, снабжённые тиристорными контакторами, также являются источниками высших гармоник, величину которых можно определить по формуле:

$$I_{эф,n} = I_{св} \sqrt{k_s} / n^2, \quad (7.37)$$

где $I_{св}$ – ток, потребляемый в период сварки (2.37) или (7.7);

k_s – коэффициент включения сварочной машины.

Машины контактной сварки генерируют 3,5 и 7 гармоники.

Аналогично (7.37) рассчитывается величина тока высших гармоник и для установок дуговой сварки переменного тока.

Для группы из m сварочных машин (установок), работающих независимо

$$I_{эф,n,гр} = \sqrt{\sum_{i=1}^m I_{н,i}^2}. \quad (7.38)$$

ЭТУ, работающие на постоянном токе, имеют в своей схеме вентильные преобразователи, поэтому гармоники, генерируемые ими, будут зависеть от схемы выпрямления преобразователей. В зависимости от схемы выпрямления ЭТУ генерируют [1]:

$n = 5, 7, 11$ и 13 – при шестифазной схеме;

$n = 11, 13, 23$ и 25 – при двенадцатифазной схеме;

$n = 23, 25, 47$ и 49 – при двадцатичетырёхфазной схеме.

Действующее значение тока любой гармоники в цепи преобразователя определяется из выражения [7]:

$$I_n = \frac{m \cdot S_{пр} \cdot \sin \varphi}{\sqrt{3} \cdot \pi \cdot U_{ном} \cdot X_{сг} \cdot n^2} \cdot \sin \left(\frac{172n \cdot X_{сг}}{m \cdot \sin \varphi} \right), \quad (7.39)$$

где m – число фаз выпрямления преобразователя;

$S_{пр}$ – потребляемая мощность преобразователя;

φ – угол, характеризующий коэффициент реактивной мощности преобразователя ($\sin \varphi = Q_{np} / S_{np}$);

Q_{np} – реактивная мощность, потребляемая преобразователем;

$X_{*\Sigma}$ – суммарное индуктивное сопротивление сети.

$$X_{*\Sigma} = X_{*C} + X_{*np}, \quad (7.40)$$

где $X_{*C} = S_{np} / S_{K3}$ – эквивалентное сопротивление системы в относительных единицах, приведенное к мощности преобразователя S_{np} ;

S_{K3} – мощность КЗ на шинах источника питания.

$$X_{*np} = X_{*T} = \frac{U_K \%}{100} \left(1 + \frac{K_p}{4} \right) \frac{S_{np}}{S_{HT}}. \quad (7.41)$$

Здесь S_{HT} – номинальная мощность преобразовательного трансформатора;

K_p – коэффициент расщепления обмоток этого трансформатора;

U_K – напряжение КЗ трансформатора, %.

Для двухобмоточных трансформаторов, применяемых в шестифазных (трёхфазных мостовых) схемах выпрямления, $K_p = 0$.

В общем случае для трансформаторов с расщеплёнными обмотками $K_p = 0$, если ветви низшего напряжения трансформатора имеют хорошую электромагнитную связь, т.е. обмотки низшего напряжения вмотаны одна в другую и $K_p = 4$, если обмотки низшего напряжения не имеют магнитной связи друг с другом или преобразователь выполнен по схеме с двумя трансформаторами, имеющими разные схемы соединения.

Допускается определять токи гармоник до 13-го порядка по формуле:

$$\begin{aligned} I_n &= I_{np} / n; \\ I_{np} &= S_{np} / \sqrt{3} U_{ном}, \end{aligned} \quad (7.42)$$

где S_{np} (I_{np}) – мощность (ток) преобразователя.

Ток гармоник группы разных преобразователей зависит от режима их работы. Для определения такого тока требуется анализ рабочих режимов, что является сложной технической задачей.

Максимальный ток гармоник группы преобразователей можно определять по (7.39) или (7.42), где в качестве S_{np} принимают суммарную мощность одновременно работающих преобразователей.

Пример 7.5. Определить ток 5-ой гармоники при работе одной трехфазной ДСП-12, имеющей $S_{П.Т} = 5 \text{ МВА}$ и $U_{ном} = 10 \text{ кВ}$.

По формуле (3.14) и (3.15), находим

$$I_{П.Т} = 5000 / \sqrt{3} \cdot 10 = 289 \text{ А},$$

$$I_5 = 289 / 5 = 57,8 \text{ А}.$$

Пример 7.6. Определить ток 7-ой гармоники для трех ДСП-12, имеющих:

$$S_{П.Т} = 5 \text{ МВА} \text{ и } U_{ном} = 10 \text{ кВ}.$$

По формуле (7.34) и (7.35), находим

$$I_{П.Т} = 5000 / \sqrt{3} \cdot 10 = 289 \text{ А};$$

$$I_7 = 289 \cdot \sqrt[4]{3/7^2} = 7,8 \text{ А}.$$

Пример 7.7. Определить ток 9-ой гармоники для пяти разных по мощности ДСП, подключенных к электрической сети $U_{ном} = 10 \text{ кВ}$ и имеющих печные трансформаторы:

$$S_{П.Т1} = 5,0 \text{ МВА}; S_{П.Т2} = S_{П.Т3} = 2,8 \text{ МВА}; S_{П.Т4} = S_{П.Т5} = 1,0 \text{ МВА}$$

По формуле (7.33) и (7.34) находим

$$I_{9\max} = 5000 / (\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 9^2) = 3,6 \text{ А};$$

$$I_9 = 3,6 \cdot \sqrt[4]{(5 + 2 \cdot 2,8 + 2 \cdot 1) / 5} = 4,5 \text{ А}.$$

Пример 7.8. Определить ток 3,5 и 7-ой гармоник, генерируемых двухфазной машиной контактной сварки мощностью $S_{наст} = 75 \text{ кВА}$, $U_{ном} = 0,38 \text{ кВ}$, $K_3 = 1$, $K_8 = 0,02$.

По формуле (2.36), находим

$$I_{св} = 1 \cdot 75 \cdot \sqrt{0,02 / 0,38} = 28 \text{ А}; I_3 = 28 / 9 = 3,1 \text{ А}; I_5 = 28 / 25 = 1,1 \text{ А}; I_7 = 28 / 49 = 0,6 \text{ А}.$$

Пример 7.9 Определить токи высших гармоник, генерируемые шестифазным вентиляльным преобразователем; мощность трансформатора преобразователя $S_{П.Т} = 6,675 \text{ МВА}$, $U_K = 8,2\%$; мощность преобразователя $S_{np} = 6,48 \text{ МВА}$; мощность КЗ на шинах питающей подстанции $S_{K3} = 370 \text{ МВА}$, $U_{ном} = 10 \text{ кВ}$, $\sin \varphi = 0,58$, $K_p = 0$.

Решение. Преобразователь генерирует 5,7,11 и 13 гармоник. Расчёт приведен по формуле (7.39) с учетом (7.40) и (7.41)

$$X_{*\Sigma} = X_{*C} + X_{*np}; X_{*C} = \frac{S_{П.Т}}{S_{K3}} = \frac{6,48}{370} = 0,017 \text{ о.е.};$$

$$X_{*np} = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{S_{np}}{S_{П.Т}} = \frac{8,2}{100} \cdot \frac{6,48}{6,675} = 0,08; X_{*\Sigma} = 0,017 + 0,08 = 0,097 \text{ о.е.}$$

$$I_5 = \frac{6 \cdot 6480 \cdot 0,58}{\sqrt{3} \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 0,097 \cdot 25} \cdot \sin \left(\frac{172 \cdot 5 \cdot 0,097}{6 \cdot 0,58} \right) = 69,5 \text{ А};$$

$$I_7 = 48,3 \text{ А}; I_{11} = 28,1 \text{ А}; I_{13} = 22,4 \text{ А}.$$

расчёт по формуле (7.42) даёт следующий результат

$$I_5 = 75 \text{ А}; I_7 = 53 \text{ А}; I_{11} = 34 \text{ А}; I_{13} = 29 \text{ А}.$$

Исследования спектрального состава напряжения в сетях, питающих ЭТУ, показали, что в спектре напряжения присутствуют те же гармоники, что и в спектре тока. Поэтому для определения гармонического состава напряжения необходимо ток n -ой гармоники умножить на сопротивление n -ой гармоники.

Фазное напряжение гармоники в расчётной точке питающей сети находят из выражения [7]:

$$U_n = I_n \cdot n \cdot U_{НЛ} \cdot U_{ном} / S_{КЗ}, \quad (7.43)$$

где I_n – действующее значение фазного тока n -ой гармоники;

$U_{НЛ}$ – напряжение нелинейной нагрузки (если расчётная точка совпадает с точкой присоединения нелинейной нагрузки, то $U_{НЛ} = U_{ном}$);

$U_{ном}$ – номинальное напряжение сети.

Действующее значение высшей гармоники напряжения в любой точке питающей сети при работе преобразователя с любой последовательностью чередования фаз выпрямления может быть определено по формуле [7]:

$$U_n = \frac{m \cdot U_{ном} \cdot X_{*C} \cdot \sin \varphi}{\pi \cdot n \cdot X_{*C}} \sin \left(\frac{172 \cdot n \cdot X_{*C}}{m \cdot \sin \varphi} \right). \quad (7.44)$$

При работе группы вентильных преобразователей порядок расчёта K_U следующий.

По формуле (7.44) определяются уровни высших гармоник напряжения для каждого преобразователя, а также их углы $\varphi_n \approx \varphi_1 \cdot n$.

Одинаковые гармоники напряжения всех преобразователей геометрически суммируются:

$$U_{n\Sigma} = \sum_{i=1}^m U_{ni}. \quad (7.45)$$

Затем определяется коэффициент искажения формы кривой напряжения $K_{U\Sigma}$

$$K_{U\Sigma} = \frac{1}{U_1} \cdot \sqrt{\sum_{n=5}^p U_{n\Sigma}^2}, \quad (7.46)$$

где p – номер последней из учитываемых гармоник.

U_1 – первая гармоника напряжения: $U_1 \approx U_{ном}$.

В сетях с преобразователями определить K_U можно, не вычисляя токи и напряжения гармоник, пользуясь формулой:

$$K_U = X_{*C} \sqrt{\frac{3}{\pi} \cdot \frac{\sin \varphi}{X_{*C} + X_{*np}} - \frac{9}{\pi^2}} = \frac{S_{np}}{S_{КЗ}} \sqrt{\frac{0,955 \cdot \sin \varphi}{S_{np}/S_{КЗ} + X_{*np}}} - 0,91. \quad (7.47)$$

При параллельной работе нескольких преобразователей K_U вычисляют по (7.47) с учётом (7.40) и (7.41) где в качестве S_{np} и $S_{НЛ}$ принимают соответственно суммарную мощность одновременно работающих преобразователей и трансформаторов.

В том случае, когда номинальные мощности $S_{П.Т}$ отдельных трансформаторов, их U_K и $\cos \varphi$ не равны между собой, коэффициент K_U в расчётной точке с достаточной для инженерных расчётов точностью можно определить для каждого индивидуального преобразователя по формуле (7.47), а общий коэффициент – по формуле:

$$K_{U\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^m K_{Ui}^2}. \quad (7.48)$$

Рассмотрим порядок расчёта гармоник напряжения для типовой схемы электроснабжения цеха, когда источником гармоник является сварочная машина (рис. 7.4, а).

На основании расчётной схемы составляется схема замещения (рис. 7.4, б), при этом источники гармоник представляются как источники тока. Зная параметры элементов сети и нагрузок, можно определить гармонические сопротивления и проводимости отдельных элементов, приведенных к $U_{НН}$ трансформатора:

- для трансформаторов

$$Z_{Т,n} = (R_T \sqrt{n} + jX_T n) \cdot (U_{НН}/U_{ВН})^2, \quad Y_{Т,n} = 1/Z_{Т,n}; \quad (7.49)$$

где R_T и X_T – активное и индуктивное сопротивления трансформатора на высоком напряжении;

- для группы из m двигателей

$$Z_{д,n} = \frac{R_{П}}{m} k_{с.д} \sqrt{n} + j \frac{X_{П}}{m} k_{с.д} \cdot n, \quad Y_{д,n} = 1/Z_{д,n}; \quad (7.50)$$

где $R_{П}, X_{П}$ – средние пусковые сопротивления двигателей;

$k_{с.д}$ – коэффициент включения двигателей;

- для питающей системы напряжением 6 кВ и выше

$$Z_{П.С,n} = jX_{П.С,n} = j \frac{U_{ном}^2}{S_{КЗ}} \cdot n, \quad Y_{П.С,n} = 1/Z_{П.С,n}; \quad (7.51)$$

где $U_{ном}$ – номинальное напряжение на низшей стороне трансформатора;

$S_{КЗ}$ – мощность КЗ на шинах источника питания;

- для кабельных линий напряжением 6 и 10 кВ

$$Z_{КЛ,n} \approx X_{КЛ,n} = jX_{КЛ} \cdot \left(\frac{U_{НН}}{U_{ВН}} \right)^2 \cdot n, \quad Y_{КЛ,n} = 1/Z_{КЛ,n}; \quad (7.52)$$

- для сетей напряжением до 1000В.

$$Z_{H.C.n} = R_{H.C} \sqrt{n} + jX_{H.C} \cdot n, Y_{H.C.n} = 1/Z_{H.C.n}; \quad (7.53)$$

- для статических конденсаторов

$$Z_{B.K.n} \approx jX_{B.K.n} = -jX_{B.K} \cdot n, Y_{B.K.n} = 1/Z_{B.K.n}. \quad (7.54)$$

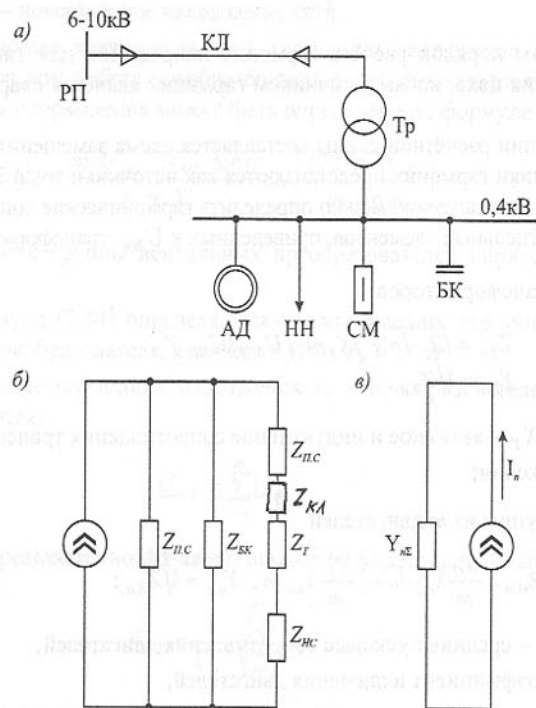


Рисунок 7.4 – Расчетная схема электрической сети (а) и ее схема замещения (б, в)

После определения гармонических сопротивлений и проводимостей отдельных элементов схемы замещения проводится её свёртывание к схеме, приведенной на рис. 7.4, в. Определяются результирующее сопротивление и проводимость для ветви с последовательными сопротивлениями

$$Z_{O.n} = Z_{П.С.n} + Z_{КЛ.n} + Z_{Т.С.n} + Z_{H.C.n}; Y_{O.n} = 1/Z_{O.n}. \quad (7.55)$$

Суммируя комплексные проводимости всех параллельных ветвей по n -ой гармонике получаем:

$$Y_{n\Sigma} = Y_{B.K.n} + Y_{O.n} + Y_{H.C.n}. \quad (7.56)$$

Гармонический состав напряжения на шинах 0,4 кВ подстанции определяется по формуле:

$$U_n = I_{эф.n} \cdot |Y_{n\Sigma}| \quad (7.57)$$

где $I_{эф.n}$ - эффективный ток n -ой гармоники определяется по формуле (7.37).

Коэффициент искажения формы кривой напряжения (в %)

$$K_U = \frac{1,1 \sqrt{U_3^2 + U_5^2 + \dots + U_S^2}}{U_1} \cdot 100, \quad (7.58)$$

где 1,1 - коэффициент запаса, учитывающий неучёт четных гармоник и гармоник $S+1$ -го порядка.

В заключении отметим, что расчёт гармоник тока и напряжения сопряжён с определёнными погрешностями, связанными с неточностью расчета гармонических сопротивлений и параметров, характеризующих режим работы нелинейных нагрузок.

Пример 7.10 Для условий примера 7.9 определить U_n по формуле (7.44) и рассчитать K_U .

Решение.

$$U_5 = \frac{6 \cdot 10000 \cdot 0,017 \cdot 0,58}{3,14 \cdot 5 \cdot 0,097} \cdot \sin\left(\frac{172 \cdot 5 \cdot 0,097}{6 \cdot 0,58}\right) = 158 \text{ В};$$

$$U_7 = 153 \text{ В}; U_{11} = 140 \text{ В}; U_{13} = 132 \text{ В};$$

По формуле (7.58),

$$K_U = \frac{1,1 \sqrt{158^2 + 153^2 + 140^2 + 132^2}}{10000} \cdot 100 = 3,2\%.$$

По формуле (7.47),

$$K_U = \frac{6,48}{370} \cdot \sqrt{\frac{0,955 \cdot 0,58}{6,48/370 + 0,08}} = 0,91 = 3,8\%.$$

Результаты расчёта достаточно близки.

Пример 7.11 Для схемы, изображенной на рис 7.5, по формуле (7.47) определить K_U , на шинах трансформаторной подстанции.

Исходные данные: $S_{K2} = 2000 \text{ МВА}$;

$T1: S_{ном.Т} = 40 \text{ МВА}; U_K = 10,5\%$;

$СД: S_{ном.Д} = 12 \text{ МВА}; X_d'' = 0,15 \text{ о.е.}$

$T2: S_{ном.тр} = 24 \text{ МВА}; U_K = 14\%$.

Нагрузка преобразователя:

$S_{пр} = 25 \text{ МВА}; \cos \varphi = 0,8, S_{K1} = 405 \text{ МВА}.$

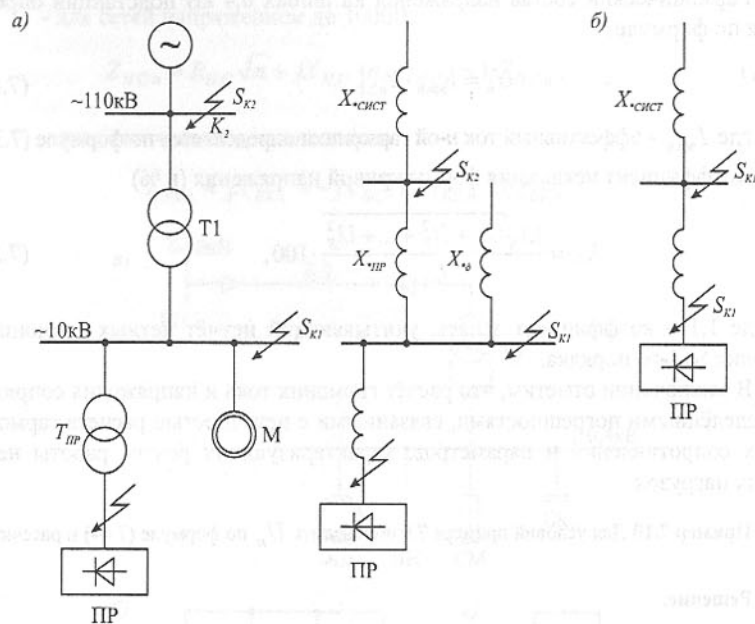


Рисунок 7.5 – Однолинейная схема питания мощного вентильного преобразователя (а) и схема замещения (б).

Решение.

Все сопротивления элементов сети приводятся к расчётной мощности преобразователя $S_{пр} = 25 \text{ МВА}$;

$$X_{*C} = S_{пр} / S_{K2} = 25 / 2000 = 0,0125 \text{ о.е.};$$

$$X_{*T1} = (U_k / 100) \cdot (S_{пр} / S_{ном.T1}) = (10,5 / 100) \cdot (25 / 40) = 0,0656 \text{ о.е.};$$

$$X_{*D} = X''_d \cdot S_{пр} / S_{ном.D} = 0,15 \cdot 25 / 12 = 0,312 \text{ о.е.};$$

$$X_{*\Sigma} = (X_{*C} + X_{*T1}) \parallel X_{*D} = (0,0125 + 0,0656) \cdot 0,312 / (0,0125 + 0,0656 + 0,312) = 0,062 \text{ о.е.};$$

Или

$$X_{*\Sigma} = S_{пр} / S_{K1} = 25 / 405 = 0,062 \text{ о.е.};$$

$$X_{*пр} = X_{T2} = (U_k / 100) \cdot (1 + K_P / 4) \cdot S_{пр} / S_{ном.T2} = (14 / 100) \cdot (1 + 0,4) \cdot 25 / 24 = 0,146 \text{ о.е.};$$

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = \sqrt{1 - 0,8^2} = 0,6;$$

По формуле (7.47) определяем K_U на шинах 10 кВ:

$$K_U = 0,062 \sqrt{[0,955 \cdot 0,6 / (0,062 + 0,146) - 0,91]} = 0,084 \text{ о.е.};$$

$$K_U = 8,4\%.$$

Методы и средства снижения несинусоидальности напряжения. Ограничение уровня высших гармоник в системе электроснабжения достигается рациональным построением схемы электроснабжения, применением

многофазных схем выпрямления и специальных законов управления преобразователями, применением резонансных фильтров [6, 7].

Наиболее простым методом снижения несинусоидальности является выделение нелинейных нагрузок на отдельную секцию шин, подключенной к одной обмотке многообмоточного трансформатора или реактора. Допустимое значение K_U на шинах с нелинейной нагрузкой определяется только условиями надёжной работы автоматических систем управления и самих нагрузок. Возможно и противоположное решение: рассредоточение нелинейных нагрузок по различным узлам системы электроснабжения, исходя из допустимого уровня несинусоидальности [4]. К схемным мероприятиям относится также способ увеличения мощности КЗ в общей точке присоединения нелинейной и прочей нагрузок. Как следует из (7.47), с увеличением мощности КЗ сети уровень высших гармоник в системе электроснабжения снижается.

Наиболее распространённым методом снижения уровней высших гармоник, генерируемых вентильными преобразователями, является увеличение числа фаз преобразователей. Увеличение числа фаз выпрямления можно достичь использованием трансформаторов преобразователей со специальным исполнением обмоток, позволяющих реализовать нужный многофазный режим преобразования, и созданием эквивалентного многофазного режима группы преобразователей, каждый из которых имеет схему с меньшим числом фаз.

Эквивалентный многофазный режим (12-фазный) в большинстве случаев осуществляется на базе одинаковых 6-ти фазных преобразователей при соединении сетевой обмотки одного трансформатора в звезду, а другого в треугольник (рис. 7.6).

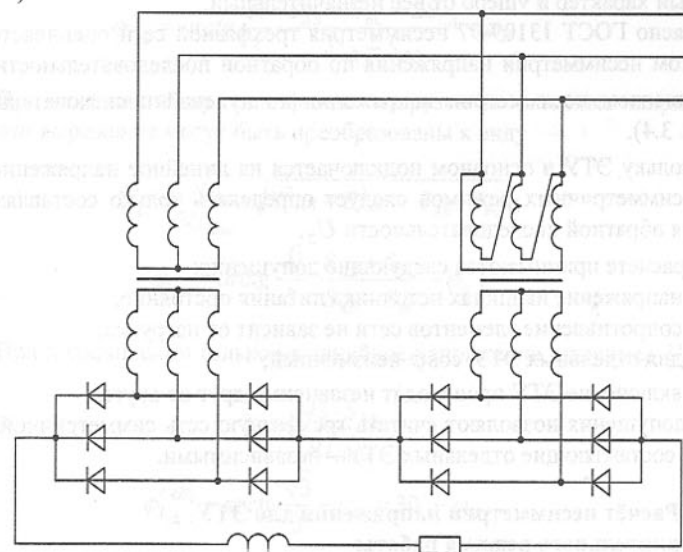


Рисунок 7.6 – Схема двенадцатифазного режима выпрямления преобразователя, полученная на базе шестифазных преобразователей.

В этом случае в сетевом токе будут отсутствовать 5-я и 7-я гармоники, взаимно компенсирующие друг друга.

В сложных преобразовательных устройствах, сочетающих группы отдельно или параллельно соединённых одно – или двухмостовых преобразователей, используют специальные законы управления, обеспечивающие подавление одной или нескольких гармоник сетевого тока. Однако такой способ снижения высших гармоник требует значительного усложнения системы управления преобразователем.

При комплексном подходе к решению проблемы качества электроэнергии в сетях с нелинейными нагрузками применяют многофункциональные устройства – силовые резонансные фильтры (СРФ) высших гармоник, называемые также фильтрокомпенсирующими устройствами (ФКУ), которые наряду со снижением уровня высших гармоник генерируют в питающую сеть реактивную мощность (см. разд. 8).

7.4 Расчёт несимметрии напряжения

Наиболее распространенными источниками несимметрии в трехфазных системах электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий являются мощные однофазные потребители, например, индукционные плавильные и нагревательные печи, сварочные агрегаты, установки электрошлакового переплава, а также трехфазные электроприспособления с неравномерной нагрузкой фаз (ДСП и др.).

Задача расчета состоит в определении несимметрии, вызываемой только эффективной нагрузкой, так как несимметрия от пиковой нагрузки носит кратковременный характер и ущерб от нее незначительный.

Согласно ГОСТ 13109-97 несимметрия трехфазной сети оценивается коэффициентом несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} и коэффициентом несимметрии напряжения по нулевой последовательности K_{0U} (см. п. 3.4).

Поскольку ЭТУ в основном подключается на линейное напряжение, при расчете несимметричных режимов следует определять только составляющую напряжения обратной последовательности U_2 .

При расчете принимаются следующие допущения:

- 1) напряжение на шинах источника питания постоянно;
- 2) сопротивление элементов сети не зависит от нагрузки;
- 3) для отдельных ЭТУ $\cos \varphi$ неизменный;
- 4) включение ЭТУ происходят независимо друг от друга.

Эти допущения позволяют считать трехфазную сеть симметричной, симметричные составляющие отдельных ЭТУ – независимыми.

7.4.1 Расчёт несимметрии напряжения для ЭТУ длительного режима работы

Значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности определяется по формуле (3.15)

$$K_{2U} = 100 \cdot U_2 / U_{ном}.$$

Здесь U_2 – величина линейного напряжения обратной последовательности

$$U_2 = \sqrt{3} \cdot I_{2\Sigma} \cdot Z_{2\Sigma}, \quad (7.59)$$

где $I_{2\Sigma}$ – эквивалентный (эффективный) ток обратной последовательности, обусловленный несимметричными нагрузками;

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

Ток обратной последовательности $I_{2\Sigma}$ и его начальная фаза φ_{I_2} при подключении трёх однофазных нагрузок на линейные напряжения АВ, ВС, СА [7]

$$I_{2\Sigma} = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \sqrt{I_{AB}^2 + I_{BC}^2 + I_{CA}^2 - I_{AB} \cdot I_{BC} - I_{AB} \cdot I_{CA} - I_{BC} \cdot I_{CA}}; \quad (7.60)$$

$$\varphi_{I_{2\Sigma}} = \arctg \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{I_{AB} + I_{BC} - 2I_{CA}}{I_{AB} - I_{BC}} - \varphi_H, \quad (7.61)$$

где φ_H – фазный угол нагрузок.

Если известны полные мощности нагрузок S_{AB} , S_{BC} , S_{CA} , то ток $I_{2\Sigma}$ находится из выражений

$$I_{2\Sigma} = \frac{\sqrt{3}}{3U_{ном}} \cdot \sqrt{S_{AB}^2 + S_{BC}^2 + S_{CA}^2 - S_{AB} \cdot S_{BC} - S_{AB} \cdot S_{CA} - S_{BC} \cdot S_{CA}}; \quad (7.62)$$

$$\varphi_{I_{2\Sigma}} = \arctg \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{S_{AB} + S_{BC} - 2S_{CA}}{S_{AB} - S_{BC}} - \varphi_H. \quad (7.63)$$

При включении двух однофазных нагрузок на линейные напряжения АВ и ВС, эти выражения могут быть преобразованы к виду

$$I_{2\Sigma} = \frac{\sqrt{3}}{3U_{ном}} \cdot \sqrt{S_{AB}^2 + S_{BC}^2 - S_{AB} \cdot S_{BC}}; \quad (7.64)$$

$$\varphi_{I_{2\Sigma}} = \arctg \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{S_{AB} + S_{BC}}{S_{AB} - S_{BC}} - \varphi_H. \quad (7.65)$$

При подключении только на линейное напряжение, например U_{AB}

$$I_{2\Sigma} = \frac{\sqrt{3}}{3U_{ном}} \cdot S_{AB}; \quad (7.66)$$

$$\varphi_{I_{2\Sigma}}^{(AB)} = \arctg \frac{\sqrt{3}}{3} - \varphi_H = 30^\circ - \varphi_H. \quad (7.67)$$

В случае включения однофазных нагрузок на другие линейные напряжения U_{BC} или U_{CA} значение φ_{I_2} определяется по формуле

$$\varphi_{12\Sigma}^{(BC)} = 270^\circ - \varphi_H; \quad \varphi_{12\Sigma}^{(CA)} = 150^\circ - \varphi_H. \quad (7.68)$$

Следует отметить, что при включении однофазных нагрузок с фазой φ_H на пару линейных напряжений, начальная фаза тока обратной последовательности $\varphi_{12\Sigma}$ находится в следующих пределах [7]

$$\begin{aligned} \text{AB и BC} \quad 30^\circ - \varphi_H &\leq \varphi_{12\Sigma} \leq 150^\circ - \varphi_H; \\ \text{BC и CA} \quad 150^\circ - \varphi_H &\leq \varphi_{12\Sigma} \leq 270^\circ - \varphi_H; \\ \text{CA и AB} \quad 270^\circ - \varphi_H &\leq \varphi_{12\Sigma} \leq 30^\circ - \varphi_H. \end{aligned} \quad (7.69)$$

Комплекс полного сопротивления обратной последовательности узла сети 6–10 кВ предприятия определяется по выражению [6]

$$Z_{2\Sigma} = \frac{U_{ном}^2}{\sqrt{4S_H^2 + (S_{K3} + 2,67S_H - Q_{БК})^2}} \cdot e^{j\varphi_{2\Sigma}}; \quad (7.70)$$

$$\varphi_{2\Sigma} = \arctg \frac{1 + 2,67K_H - K_{БК}}{2K_H}, \quad (7.71)$$

где $S_H, S_{K3}, Q_{БК}$ – соответственно мощность обобщенной нагрузки, КЗ и БК:

$$K_H = \frac{S_H}{S_{K3}}; \quad K_{БК} = \frac{Q_{БК}}{S_{K3}}. \quad (7.72)$$

Обычно для узлов нагрузки предприятий сопротивление обратной последовательности является реактивным. Следует отметить, что в связи с ростом вентильных преобразователей (ВП) и дуговых сталеплавильных печей (ДСП) в составе нагрузок предприятий, расчёт $Z_{2\Sigma}$ по формуле (7.70) может привести к большим погрешностям.

Более точная методика расчёта $Z_{2\Sigma}$ изложена в [7].

В распределительных сетях промышленных предприятий, подключённых к основному ЭС, при мощности КЗ на шинах 6–10 кВ $S_K \geq 200$ МВА можно принимать $Z_{2\Sigma} = X_{2C}$, где

$$X_{2C} = \frac{U_{ном}^2}{S_K}. \quad (7.73)$$

Выражение для определения сопротивлений обратной последовательности элементов СЭС приведены в табл. 2.6 [7].

Эффективное значение тока обратной последовательности $I_{2\phi}$ ДСП в период расплавления определяется выражением [6]

$$I_{2\phi} = 0,26 \cdot K_{ЭКЗ} \cdot I_H, \quad (7.74)$$

где I_H – номинальный ток печного трансформатора, А;

$K_{ЭКЗ}$ – коэффициент кратности тока эксплуатационного КЗ, значение которого зависит от ёмкости печи (см. табл. 2.8)

Вентильные преобразователи при несимметрии напряжений сети потребляют ток обратной последовательности [7]

$$I_{2ВП} = 0,5 \cdot K_{2U} \cdot I_{1ВП}, \quad (7.75)$$

где $I_{1ВП}$ – сетевой ток первой гармоники ВП в рассматриваемом режиме, А;

K_{2U} – коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности без учета вентильных преобразователей.

$$I_{1ВП} = S_{ВП} / (\sqrt{3} U_{ном}). \quad (7.76)$$

Величину K_{2U} можно рассчитать по приближённой формуле

$$K_{2U} = (1 + \delta U) \frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{S_K} \cdot e^{j\varphi_{\alpha\beta}}, \quad (7.77)$$

где α, β – математические величины

$$\alpha = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (P_{AB} - P_{CA}) - \frac{1}{2} \cdot (Q_{AB} + Q_{CA}) + Q_{BC};$$

$$\beta = -\frac{1}{2} \cdot (P_{AB} - P_{CA}) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (Q_{AB} - Q_{CA}) + P_{BC};$$

$\delta U = (U_1 - U_{ном}) / U_{ном}$ – отклонение напряжения прямой последовательности от номинального фазного значения;

$P_{AB}, P_{BC}, P_{CA}, Q_{AB}, Q_{BC}, Q_{CA}$ – суммарные активные и реактивные мощности соответствующих однофазных нагрузок;

ψ_U – аргумент напряжения коэффициента обратной последовательности (зависит от абсолютных значений и знаков α и β), и принимается по табл. 7.4.

Таблица 7.4 – Значение знака $\alpha, \beta, \psi_U, \psi_I$

| Знак | | Аргумент | |
|----------|---------|----------------------|-------------------|
| α | β | напряжения ψ_U | тока ψ_I |
| плюс | плюс | γ | μ |
| плюс | минус | $-\gamma$ | $-\mu$ |
| минус | плюс | $180^\circ - \gamma$ | $180^\circ - \mu$ |
| минус | минус | $\gamma - 180^\circ$ | $\mu - 180^\circ$ |

Примечание: $\gamma = \arctg\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)$; $\mu = \arctg\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)$.

Токи прямой и обратной последовательности определяются из выражений

$$I_1 = \frac{\sqrt{P_\Sigma^2 + Q_\Sigma^2}}{3 \cdot U_{ном}} \cdot e^{j \arctg(Q_\Sigma / P_\Sigma)}; \quad (7.79)$$

$$I_2 = \frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{3 \cdot U_{ном}} \cdot e^{j\psi_I}, \quad (7.80)$$

где $P_\Sigma = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA}$; $Q_\Sigma = Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CA}$ - соответственно активные и реактивные мощности несимметричной нагрузки.

Пример 7.12. Однофазные электрические печи мощностью 1 МВА и 3 МВА при $\cos \varphi = 0,82$, $\varphi_H = 11^\circ$ подключены к сети 10 кВ на линейные напряжения U_{AB} и U_{BC} . На шинах 10 кВ $S_K = 210$ МВА. Определить значение K_{2U} .

Решение. Ток обратной последовательности несимметричной нагрузки (7.64)

$$I_{2\Sigma} = \frac{\sqrt{3}}{3U_{ном}} \sqrt{S_{AB}^2 + S_{BC}^2 - S_{AB} \cdot S_{BC}} = \frac{\sqrt{3}}{3 \cdot 10} \cdot \sqrt{1000^2 + 3000^2 - 1000 \cdot 3000} = 153 \text{ А};$$

$$\varphi_{2\Sigma} = \arctg \frac{\sqrt{3} S_{AB} + S_{BC}}{3 S_{AB} - S_{BC}} - \varphi_H = \arctg \frac{\sqrt{3}}{3 \cdot 10} \cdot \frac{1+3}{1-3} - 11^\circ = -60^\circ = 300^\circ;$$

Для питающей системы по формуле (7.73) находим

$$Z_{2\Sigma} = U_{ном}^2 / S_K = 10^2 / 210 \cdot 10^3 = 0,476 \text{ Ом};$$

коэффициент обратной последовательности

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_{ном}} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot 153 \cdot 10^2}{10 \cdot 210 \cdot 10^3} = 1,26\%.$$

Пример 7.13. Определить K_{2U} на шинах 10 кВ подстанции, если известно: мощность обобщенной нагрузки $S_H = 12$ МВА, однофазных нагрузок $S_{AB} = S_{CA} = 2,5$ МВА, $\cos \varphi = 0,8$, мощность БК $Q_{БК} = 3,0$ Мвар, мощность КЗ $S_K = 136$ МВА.

Решение. По выражению (7.64) определяем ток обратной последовательности

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{3 \cdot 10} \cdot \sqrt{2,5^2 + 2,5^2 - 2,5 \cdot 2,5} = 144 \text{ А}.$$

Согласно (7.72) находим

$$K_H = \frac{12}{150} = 0,08; \quad K_{БК} = \frac{3}{150} = 0,02.$$

Определим модуль сопротивления обратной последовательности формула (7.70) с учётом (7.72)

$$Z_{2\Sigma} = \frac{10^2}{150 \sqrt{4 \cdot 0,08^2 + (1 + 2,67 \cdot 0,08 - 0,02)^2}} = 9,553 \text{ Ом}.$$

Напряжение обратной последовательности (7.59)

$$U_2 = \sqrt{3} \cdot 144 \cdot 0,553 = 137,7 \text{ В};$$

$$K_{2U} = 137,7 \cdot 100 / 10000 = 1,38\%.$$

Пример 7.14. Определить K_{2U} на шинах 10 кВ (пример 7.13), если к ним подключен вентильный преобразователь $S_{ВП} = 10000$ кВА.

Решение. Ток обратной последовательности преобразователя, согласно выражению (7.75) и (7.76) равен:

$$I_{2ВП} = 0,5 \cdot 0,0138 \cdot \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 10} = 4 \text{ А} \ll 144 \text{ А}.$$

Ввиду малости тока $I_{2ВП}$ по сравнению с током I_2 влиянием на его напряжение обратной последовательности можно пренебречь.

$$K_{2U} = \sqrt{3} (144 + 4) \cdot 0,553 \cdot 100 / 10000 = 1,38\%.$$

Пример 7.15. Определить коэффициент несимметрии напряжений на шинах 6 кВ подстанции цеха, к которым подключена однофазная установка ЭСП мощностью $S_H = 5$ МВА ($U_{BC} = 6$ кВ; $P_{BC} = 4,33$ МВт; $Q_{BC} = 2,5$ Мвар; $\varphi = 30^\circ$). Мощность КЗ в узле подключения $S_K = 136$ МВА.

Решение. По формуле (7.77) с учётом (7.78), определяем коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности, принимая $U_1 = U_{ном}$, т.е. $\delta U = 0$.

$$\alpha = \sqrt{3} (0 - 0) / 2 - (0 + 0) / 2 + 2,5 = 2,5;$$

$$\beta = -(0 - 0) / 2 - \sqrt{3} (0 - 0) / 2 + 4,33 = 4,33;$$

$$\psi_U = \arctg \left(\frac{\beta}{\alpha} \right) = \arctg \left(\frac{4,33}{2,5} \right) = 60^\circ;$$

$$K_{2U} = (1 + 0) \cdot \frac{\sqrt{2,5^2 + 4,33^2}}{136} \cdot e^{j60^\circ} = 0,0368 \cdot e^{j60^\circ}; \quad K_{2U} = 3,68\%.$$

Для этих же условий по формуле (7.66) определим $I_{2\Sigma}$

$$I_{2\Sigma} = \frac{\sqrt{3} \cdot 5}{3 \cdot 6} = 480 \text{ А}.$$

$$K_{2U} = (\sqrt{3} \cdot 480 \cdot 6^2 \cdot 100) / (136 \cdot 6000) = 3,66\%, \text{ что очень близко к } K_{2U} = 3,68\%.$$

Пример 7.16. Для условий примера 7.12, используя формулы (7.77) и (7.78), рассчитаем K_{2U} .

Исходные данные: $P_{AB} = 0,982$ МВт, $Q_{AB} = 0,189$ Мвар,

$$P_{BC} = 2,946 \text{ МВт}, \quad Q_{BC} = 0,567 \text{ Мвар}, \quad S_K = 210 \text{ МВА}.$$

Решение. Определяем математические величины α и β

$$\alpha = \sqrt{3} \cdot 0,982 / 2 - 0,189 / 2 + 0,567 = 1,32;$$

$$\beta = -0,982 / 2 - \sqrt{3} \cdot 0,189 / 2 + 2,946 = 2,29;$$

$$K_{2U} = \frac{\sqrt{1,32^2 + 2,29^2}}{210} = 0,0176; \quad K_{2U} = 1,76\%, \text{ что несколько больше } K_{2U} = 1,26\%$$

(пример 7.12).

7.4.2 Расчёт несимметрии напряжений для ЭТУ повторно-кратковременного и импульсного режимов работы

В основу расчёта коэффициента несимметрии напряжений положен метод симметричных составляющих [1, 9]. Напряжение обратной последовательности находится по формуле (7.59).

Величина вектора тока прямой I_1 и обратной I_2 последовательностей находится по известным выражениям

$$\begin{aligned} I_{1A} &= \frac{1}{3}(I_A + aI_B + a^2I_C); & I_{2A} &= \frac{1}{3}(I_A + a^2I_B + aI_C); \\ I_{1B} &= \frac{1}{3}(a^2I_A + I_B + aI_C); & I_{2B} &= \frac{1}{3}(aI_A + I_B + a^2I_C); \\ I_{1C} &= \frac{1}{3}(aI_A + a^2I_B + I_C); & I_{2C} &= \frac{1}{3}(a^2I_A + aI_B + I_C), \end{aligned} \quad (7.81)$$

где I_A, I_B, I_C – заданные векторы токов в фазах А, В и С;
 a – комплексный множитель (оператор поворота).

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}; \quad a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (7.82)$$

На рис. 7.7 показаны векторные диаграммы токов прямой и обратной последовательностей при различных вариантах подключения однофазных сварочных машин.

Для примера рассмотрим подключение однофазной машины контактной сварки (МКС) на линейное напряжение U_{AB} (рис. 7.7, а).

При такой схеме подключения в период сварки будут протекать токи, векторы которых $I_A = -I_B$, ток в фазе С и токи нулевой последовательности – отсутствуют.

Тогда формула применительно к фазе А будет иметь вид:

$$I_{1A} = \frac{1}{3}(I_A + aI_B); \quad I_{2A} = \frac{1}{3}(I_A + a^2I_B). \quad (7.83)$$

Подставив в формулу (7.83) значения (7.82), получим:

$$I_{1A} = \frac{1}{3}\left(\frac{1}{2} - j\frac{1}{2\sqrt{3}}\right)I_A; \quad I_{2A} = \frac{1}{3}\left(\frac{1}{2} + j\frac{1}{2\sqrt{3}}\right)I_A. \quad (7.84)$$

Из выражения (7.84) видно, что векторы тока прямой и обратной последовательности сдвинуты в пространстве, а их модули равны между собой:

$$|I_{1A}| = |I_{2A}| = \frac{i_{cs}}{\sqrt{3}}, \quad (7.85)$$

где i_{cs} – ток сварочной машины, определяется по формуле (2.36)

Если сделать аналогичные расчеты по другим фазам при различных схемах подключения сварочной машины (на U_{BC} или U_{CA}), то нетрудно заметить, что для них величины модулей токов прямой и обратной последовательностей также равны (7.85), т.е.

$$|I_{1B}| = |I_{2B}| = \frac{i_{cs}}{\sqrt{3}}; \quad |I_{1C}| = |I_{2C}| = \frac{i_{cs}}{\sqrt{3}} \quad (7.86)$$

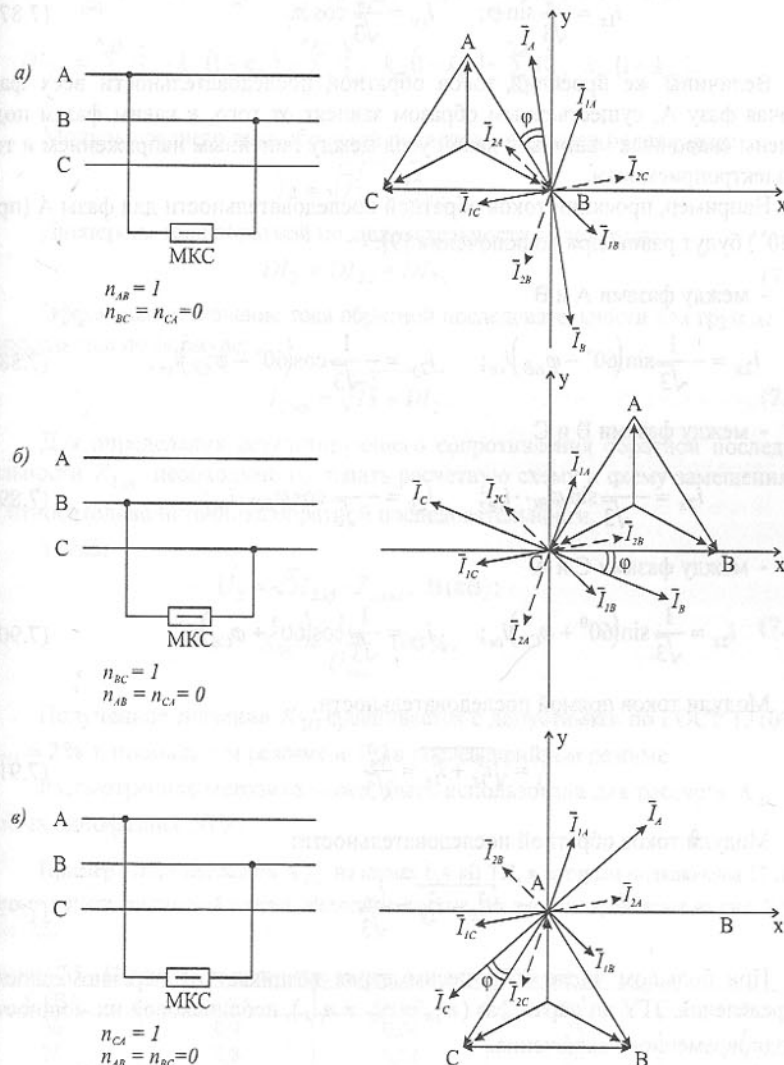


Рисунок 7.7 – Разложение на симметричные составляющие векторов тока однофазных сварочных машин при различных вариантах их подключения.

Совместив ось y с направлением вектора фазного напряжения \underline{U}_A и построив векторные диаграммы фазных токов для сварочных машин, подключенных на различное линейное напряжение (рис. 7.7), видим, что в момент сварки проекции токов прямой последовательности фазы А, В и С не зависят от схемы подключения и содержат импульсы величиной

$$i_{1x} = \frac{i_{c\phi}}{\sqrt{3}} \sin \varphi; \quad i_{1y} = \frac{i_{c\phi}}{\sqrt{3}} \cos \varphi. \quad (7.87)$$

Величины же проекций токов обратной последовательности всех фаз, включая фазу А, существенным образом зависят от того, к каким фазам подключены сварочные машины и какой угол между линейным напряжением и током электроприемника.

Например, проекции токов обратной последовательности для фазы А (при $\varphi \leq 30^\circ$) будут равны при подключении [9]:

- между фазами А и В

$$i_{2x} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \sin(60^\circ - \varphi_{AB}) i_{c\phi}; \quad i_{2y} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \cos(60^\circ - \varphi_{AB}) i_{c\phi}; \quad (7.88)$$

- между фазами В и С

$$i_{2x} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \sin \varphi_{BC} \cdot i_{c\phi}; \quad i_{2y} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \cos \varphi_{BC} \cdot i_{c\phi}; \quad (7.89)$$

- между фазами С и А

$$i_{2x} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sin(60^\circ + \varphi_{CA}) i_{c\phi}; \quad i_{2y} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cos(60^\circ + \varphi_{CA}) i_{c\phi}. \quad (7.90)$$

Модули токов прямой последовательности:

$$i_1 = \sqrt{i_{1x}^2 + i_{1y}^2} = \frac{i_{c\phi}}{\sqrt{3}} \quad (7.91)$$

Модули токов обратной последовательности:

$$i_2 = \sqrt{i_{2x}^2 + i_{2y}^2} = \frac{i_{c\phi}}{\sqrt{3}} \quad (7.92)$$

При большом числе ЭТУ несимметрия возникает от неравномерности распределения ЭТУ по парам фаз ($n_{AB} \neq n_{BC} \neq n_{CA}$), неодинаковой их мощности и неодновременного включения.

Средние значения и дисперсии импульсов совпадения проекций симметричных составляющих получаются их суммированием, т.е.

$$\begin{aligned} \bar{I}_{2x} &= \sum_{i=1}^{n_{AB}} i_{2xi} \cdot k_{ei} + \sum_{j=1}^{n_{BC}} i_{2xj} \cdot k_{ej} + \sum_{r=1}^{n_{CA}} i_{2xr} \cdot k_{er}; \\ \bar{I}_{2y} &= \sum_{i=1}^{n_{AB}} i_{2yi} \cdot k_{ei} + \sum_{j=1}^{n_{BC}} i_{2yj} \cdot k_{ej} + \sum_{r=1}^{n_{CA}} i_{2yr} \cdot k_{er}; \\ I_{2x} &= \sum_{i=1}^{n_{AB}} i_{2xi}^2 \cdot k_{ei} (1 - k_{ei}) + \sum_{j=1}^{n_{BC}} i_{2xj}^2 \cdot k_{ej} (1 - k_{ej}) + \sum_{r=1}^{n_{CA}} i_{2xr}^2 \cdot k_{er} (1 - k_{er}); \\ DI_{2y} &= \sum_{i=1}^{n_{AB}} i_{2yi}^2 \cdot k_{ei} (1 - k_{ei}) + \sum_{j=1}^{n_{BC}} i_{2yj}^2 \cdot k_{ej} (1 - k_{ej}) + \sum_{r=1}^{n_{CA}} i_{2yr}^2 \cdot k_{er} (1 - k_{er}). \end{aligned} \quad (7.93)$$

Модуль среднего тока обратной последовательности будет равен:

$$\bar{I}_2 = \sqrt{\bar{I}_{2x}^2 + \bar{I}_{2y}^2}. \quad (7.94)$$

Дисперсия тока обратной последовательности будет равна:

$$DI_2 = DI_{2x} + DI_{2y}. \quad (7.95)$$

Эффективное значение тока обратной последовательности для группы ЭТУ определяется по формуле:

$$I_{2\phi} = \sqrt{\bar{I}_2^2 + DI_2}. \quad (7.96)$$

Для определения результирующего сопротивления обратной последовательности $Z_{2\phi}$ необходимо составить расчетную схему и схему замещения сети относительно источника обратной последовательности.

Тогда:

$$\begin{aligned} U_2 &= \sqrt{3} I_{2\phi} \cdot Z_{2\phi}, \text{ В (кВ)}; \\ K_{2U} &= \frac{U_2}{U_{ном}} \cdot 100\%. \end{aligned} \quad (7.97)$$

Полученное значение K_{2U} сравнивается с допустимым по ГОСТ 13109-97 $K_{2U} = 2\%$ в нормальном режиме и 4% в послеаварийном режиме.

Рассмотренная методика может быть использована для расчета K_{2U} для любых однофазных ЭТУ.

Пример 7.17. Определить K_{2U} на шинах 0,4 кВ ТП, к которым подключены 17 однофазных машин контактной сварки. Исходные данные для расчета приведены на рис. 7.8 и в табл. 7.5.

Таблица 7.5 – Параметры и количество машин контактной сварки

| $S, \text{ кВА}$ | $k_n, \text{ о.е.}$ | $k_n, \text{ о.е.}$ | $\varphi, ^\circ$ | n |
|------------------|---------------------|---------------------|-------------------|-----|
| 50 | 0,9 | 0,04 | 25 | 6 |
| 75 | 0,8 | 0,04 | 20 | 4 |
| 150 | 0,9 | 0,05 | 22 | 4 |
| 300 | 0,6 | 0,03 | 25 | 3 |
| Всего | | | | 17 |

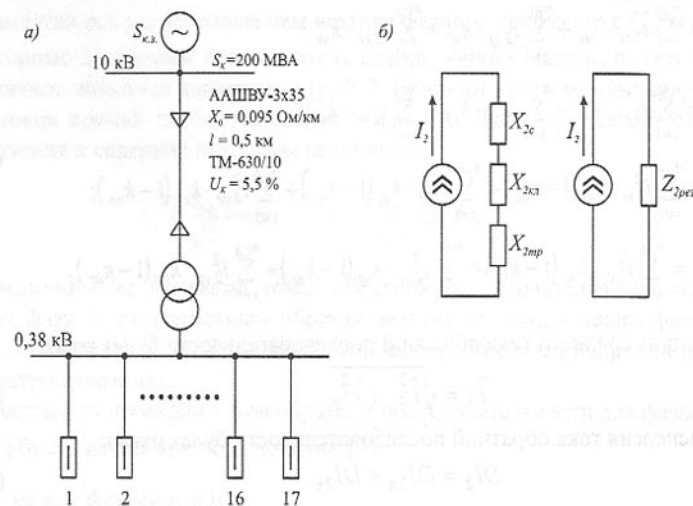


Рисунок 7.8 – Расчётная (а) и схема замещения (б) электрической сети

Распределение машин между фазами:

$$n_{AB} = 5 - (2 \cdot 50 + 2 \cdot 150 + 1 \cdot 300);$$

$$n_{BC} = 6 - (2 \cdot 50 + 2 \cdot 75 + 1 \cdot 150 + 1 \cdot 300);$$

$$n_{CA} = 6 - (2 \cdot 50 + 2 \cdot 75 + 1 \cdot 150 + 1 \cdot 300).$$

Используя формулы (2.36), (7.88) – (7.90), (7.93), рассчитаем $i_{cв}$; \bar{i}_{2x} ; \bar{i}_{2y} ; Di_{2x} , Di_{2y} ; результаты расчёта приведены в табл. 7.6

Таблица 7.6 – Результаты расчёта по (2.36), (7.88) – (7.90), (7.93)

| S, кВА | $i_{cв}$, А | AB | | BC | | CA | | AB | | BC | | CA | |
|-----------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | \bar{i}_{2x} | \bar{i}_{2y} | \bar{i}_{2x} | \bar{i}_{2y} | \bar{i}_{2x} | \bar{i}_{2y} | Di_{2x} | Di_{2y} | Di_{2x} | Di_{2y} | Di_{2x} | Di_{2y} |
| 50 | 118 | -1,56 | 2,24 | -1,16 | -2,48 | 1,56 | 2,24 | 58 | 120 | 32 | 148 | 58 | 120 |
| 75 | 158 | -2,3 | 2,8 | -1,24 | -3,44 | 2,32 | 2,8 | 129 | 188 | 37 | 284 | 129 | 188 |
| 150 | 355 | -7,5 | 8,1 | -3,85 | -9,5 | 7,5 | 8,1 | 754 | 1246 | 282 | 1715 | 754 | 1246 |
| 300 | 474 | -4,7 | 6,72 | -3,48 | -7,44 | 4,71 | 6,72 | 717 | 1460 | 392 | 1790 | 717 | 1460 |

По формуле (7.93) – (7.96), находим:

$$\bar{i}_{2x} = 2(-1,56) + 2(-7,5) + 1(-4,71) + 2(-1,16) + 2(-1,24) + 1(-3,85) + 1(-3,48) + 2 \cdot 1,56 + 2 \cdot 2,32 + 1 \cdot 7,5 + 1 \cdot 4,71 = -15 \text{ А}$$

$$\bar{i}_{2y} = 2 \cdot 2,24 + 2 \cdot 8,1 + 1 \cdot 6,72 + 2(-2,48) + 2(-3,44) + 1(-9,5) + 1(-7,44) + 2 \cdot 2,24 + 2 \cdot 2,8 + 1 \cdot 8,1 + 1 \cdot 6,72 = 24 \text{ А}$$

$$Di_{2x} = 2 \cdot 58 + 2 \cdot 754 + 1 \cdot 717 + 2 \cdot 32 + 2 \cdot 282 + 392 + 2 \cdot 58 + 2 \cdot 129 + 1 \cdot 754 + 1 \cdot 717 = 5000 \text{ А}^2$$

$$Di_{2y} = 2 \cdot 120 + 2 \cdot 1246 + 1 \cdot 1460 + 2 \cdot 148 + 2 \cdot 284 + 1 \cdot 1715 + 1 \cdot 1790 + 2 \cdot 120 + 2 \cdot 188 + 1 \cdot 1246 + 1 \cdot 1460 = 11880 \text{ А}^2.$$

$$\bar{i}_2 = \sqrt{(-15)^2 + 24^2} = 28 \text{ А};$$

$$Di_2 = 5000 + 11880 = 16880 \text{ А}^2;$$

$$I_{2\phi} = \sqrt{28^2 + 16880} = 133 \text{ А}.$$

Так как $Z_2 \approx X_2 \approx X_1$, находим $Z_{рез} = X_{2c} + X_{2кл} + X_{2тр}$;

$$X_{2c} = \frac{U_H^2}{S_K} = \frac{10^2}{200} = 0,5 \text{ Ом}; \quad X_{2кл} = x_0 \cdot l = 0,095 \cdot 0,5 = 0,047 \text{ Ом};$$

$$X_{2тр} = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_{H,TP}} = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{100}{0,63} = 8,73 \text{ Ом}; \quad Z_{рез} = 0,5 + 0,047 + 8,73 = 9,28 \text{ Ом}.$$

$$\text{По формуле (7.97): } U_2 = \sqrt{3} \cdot 133 \cdot 9,28 \cdot \left(\frac{0,38}{10}\right)^2 = 3,08 \text{ В}; \quad K_{2U} = \frac{3,08}{380} \cdot 100 = 0,81\% < 2\%.$$

Способы снижения несимметрии напряжений. Несимметрию напряжений, обусловленную несимметричными ЭТУ, можно ограничить до значений $K_{2U} = K_{2U \text{ доп}}$ как с помощью схемных решений, так и путем применения специальных симметрирующих устройств (СУ) [7].

Известно, что при соотношении мощностей КЗ в узле сети S_K и однофазной нагрузки $S_{ОДН}$, $S_K \geq 50 S_{ОДН}$, коэффициент обратной последовательности напряжений не превышает $K_{2U \text{ доп}}$. Поэтому целесообразно присоединять ЭТУ, вызывающие несимметрию, к узлам сети, где мощность КЗ удовлетворяет приведенному выше соотношению.

Самым простым способом симметрирования нескольких однофазных и двухфазных нагрузок является как можно более равномерное их распределение по фазам трёхфазной сети. Сложнее обстоит дело, когда имеются мощные однофазные единичные ЭТУ. В этом случае устранить или уменьшить влияние несимметричной нагрузки можно при помощи специальных симметрирующих устройств.

Наиболее эффективными схемами симметрирования однофазных нагрузок являются схема Штейнметца (рис. 7.9) и схема с реактором – делителем. Схема Штейнметца эффективна для установок с коэффициентом мощности близким к единице (печи сопротивления, дуговые печи косвенного действия), поэтому при активно – индуктивной нагрузке параллельно ей подключается батарея конденсаторов C_2 .

Мощность реактора и батареи конденсаторов C_1 в этом случае выбирается из условия

$$Q_L = Q_C = P_{\text{ном}} / \sqrt{3}.$$

Схема Штейнметца может обеспечивать симметрирование активно – индуктивной нагрузки и без конденсаторов C_2 . Однако в этом случае коэффициент мощности снижается до значений, меньших коэффициента мощности

нагрузки. В этом случае мощность симметрирующих элементов выбирается из условия

$$Q_L = 2S_H \cos\left(\varphi_H - \frac{\pi}{3}\right) / \sqrt{3};$$

$$Q_C = 2S_H \cos\left(\varphi_H + \frac{\pi}{3}\right) / \sqrt{3},$$

где S_H — полная мощность однофазной нагрузки;

φ_H — аргумент сопротивления нагрузки.

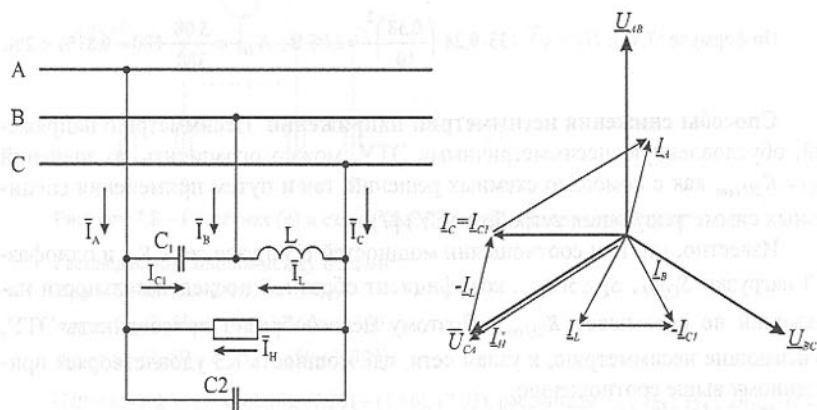


Рисунок 7.9 — Схема Штейнметца и векторная диаграмма этой схемы.

Для ЭТУ, коэффициент мощности которых $\cos \varphi \leq 0,7$, рекомендуется схема с реактором — делителем.

В электротехнологических установках, имеющих постоянный график нагрузки (индукционные каналные печи, дуговые печи косвенного действия, электрошлаковые и печи сопротивления прямого нагрева), обычно применяют неуправляемые устройства, устанавливаемые на стороне высшего напряжения печного трансформатора.

Индукционные плавильные тигельные печи и индукционные нагревательные установки промышленной частоты при питании от трёхфазных трансформаторов симметрируют с помощью управляемых схем на стороне низшего напряжения. Управление устройством осуществляется отключением части секций параллельно включённых конденсаторов.

Симметрирование двух- и трёхфазных несимметричных нагрузок с низким коэффициентом мощности можно осуществить с помощью трёхфазной батареи конденсаторов, используемой для компенсации реактивной мощности. В общем случае мощности конденсаторов в фазах могут быть неодинаковыми. Необходимо отметить, что эта схема воздействует только на реактивную составляющую тока и не влияет на активную.

На практике полное симметрирование, т.е. когда $K_{2U} = 0$, оказывается технически и экономически нецелесообразным, поэтому используется частичное симметрирование, когда с помощью косвенной компенсации или применения СУ обеспечивается значение $K_{2U} \leq 0,02$.

Условие частичного симметрирования можно представить в виде:

$$K_{2U} = I_{2ост} \cdot Z_2 / U_{ном} < U_{2 доп} / U_{ном} = 0,02$$

где $I_{2ост}$ — остаточный ток обратной последовательности.

Выбор мощности элементов симметрирующих устройств рассматриваются в разделе 8.

Вопросы для самопроверки

- 1 Как рассчитывается уровень напряжения на зажимах ЭТУ длительного режима работы?
- 2 Как рассчитывается уровень напряжения в сетях, питающих ЭТУ импульсного режима работы?
- 3 Мероприятия по повышению уровня напряжения.
- 4 Как рассчитывается размах колебаний напряжения в сетях, питающих ЭТУ резкопеременного режима работы?
- 5 Как определяется размах эквивалентного колебания напряжения для ДСП?
- 6 Мероприятия по снижению колебаний напряжения.
- 7 Как рассчитывается коэффициент искажения синусоидальной формы кривой напряжения в сетях, питающих различные типы ЭТУ?
- 8 Методы и средства снижения несинусоидальности напряжения.
- 9 Как рассчитывается коэффициент обратной последовательности в электрических сетях, питающих однофазные ЭТУ со спокойным режимом работы?
- 10 Как рассчитывается коэффициент обратной последовательности в электрических сетях, питающих однофазные ЭТУ импульсного режима работы?
- 11 Какие существуют способы снижения несимметрии напряжения?

8 КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ, ПИТАЮЩИХ ЭТУ

8.1 Характеристика ЭТУ как потребителей реактивной мощности

Электротехнологические установки (печи, установки контактной сварки, преобразовательные устройства) характеризуются неравномерным потреблением реактивной мощности в течение суток, а также ее колебаниями, вызывающими колебания напряжения. Кроме того, неравномерность потребления реактивной мощности по фазам и нелинейность ВАХ нагрузки вызывают несимметрию и несинусоидальность питающего напряжения.

Наибольшую реактивную мощность потребляют ДСП в период расплавления. Этот режим характеризуется частыми эксплуатационными короткими замыканиями, значительным искажением тока нагрузки и низким коэффициентом мощности.

Средний коэффициент мощности для печей типа ДСП-50 составляет 0,76, для ДСП-100 и ДСП-200 – 0,72–0,73, а для проектируемых печей типа ДСП-300 и ДСП-400 с трансформаторами 100–140 МВА он ожидается равным 0,6–0,65.

В момент эксплуатационных КЗ происходят набросы реактивной мощности, что приводит к значительным колебаниям напряжения, вызывающим помехи для работы других потребителей. Для снижения кратности тока ЭКЗ до (2,5–3,5) в печах малой мощности устанавливаются реакторы (дроссели) со стороны высшего напряжения печного трансформатора. Коэффициент мощности таких печей не превышает 0,91–0,92, а с учетом несинусоидальности – 0,88–0,9.

При компенсации реактивной мощности в сетях с ДСП одновременно решают задачу улучшения качества напряжения. Для этого в электрических сетях промышленных предприятий применяются быстродействующие синхронные компенсаторы, статические источники реактивной мощности, установки продольно-емкостной компенсации, реакторы и др.

Руднотермическая печь представляет собой линейную нагрузку, поэтому ее ток и напряжение практически синусоидальны. Коэффициент мощности для фосфорных и металлургических печей $\cos \varphi = 0,92–0,97$, а для печей производящих карбид кремния, ферросплавы, силикомарганец, достигает 0,74–0,88. Для таких печей целесообразна установка искусственной компенсации реактивной мощности.

Индукционные электропечи (тигельные и канальные промышленной частоты) в своем комплекте имеют конденсаторные батареи и согласно с требованиями ГОСТ 163223-79 должны иметь $\cos \varphi = 0,9$.

Для тигельных печей и индукционных установок повышенной частоты $\cos \varphi$ должен быть не менее 0,95 на выводах преобразовательного агрегата.

Значение потребляемой из сети реактивной мощности плазменными печами, электронно-лучевыми установками, печами сопротивления прямого нагрева зависит от характеристики преобразовательного агрегата.

Коэффициент мощности печей сопротивления косвенного нагрева зависит от способа регулирования мощности нагревателей:

- для трансформатора (автотрансформатора) со ступенчатым регулированием $\cos \varphi = 0,95–0,98$;
- для тиристорного или индукционного регулятора, магнитного усилителя или дросселя насыщения - $\cos \varphi = 0,7–0,9$;
- для контакторного (позиционного) регулирования $\cos \varphi = 1$.

Коэффициент мощности установок для нагрева заготовок (стержней, труб) при мощности до 2 МВт составляет 0,8–0,9, а графитировочных печей при мощности 3–6 МВт равен 0,59–0,73.

Для выпрямительных агрегатов электролизных установок серии ВАК $\cos \varphi$ находится в пределах 0,82–0,91 (большее значение соответствует агрегатам с большим выпрямленным током).

Коэффициент мощности однофазных машин контактной сварки изменяется от 0,2 до 0,5. Для повышения $\cos \varphi$ сварочных машин применяют сварку на постоянном токе, а также искусственную компенсацию реактивной мощности.

Компенсация реактивной мощности в электрических сетях, питающих ЭТУ, может быть центральной, групповой и индивидуальной [5]. Наиболее эффективна индивидуальная компенсация, когда дополнительный источник реактивной мощности устанавливается непосредственно возле крупного потребителя. По ПУЭ [12] все крупные электротермические установки, имеющие коэффициент мощности ниже 0,98 должны комплектоваться системами искусственной компенсации, которая подразделяется на поперечную и продольную.

8.2 Поперечная компенсация реактивной мощности

Поперечная компенсация реактивной мощности заключается в параллельном соединении компенсирующих устройств и нагрузки (рис. 8.1).

При параллельном соединении индуктивности и емкости ток I_2 в неразветвленной части цепи представляет собой геометрическую сумму токов I_1 и I_C в обеих ветвях. При правильном выборе емкости ток I_2 будет меньше тока I_1 , на величину $\Delta I = I_1 - I_2$ а коэффициент мощности $\cos \varphi_2$ в неразветвленной части цепи будет больше, чем коэффициент мощности $\cos \varphi_1$ ветви с индуктивностью. Если X_C слишком велико, т.е. $I_C > I_{\text{ЛН}}$, то емкостной ток I_C пойдет от потребителя к источнику, получается перекомпенсация, что приведет к дополнительным потерям мощности.

Повышение $\cos \varphi$ нагрузки с помощью источников реактивной мощности позволяет увеличить пропускную способность линий, повысить активную нагрузку трансформаторов без увеличения их полной мощности, снизить потерю напряжения и мощности в элементах сети а, следовательно, повысить уровень напряжения.

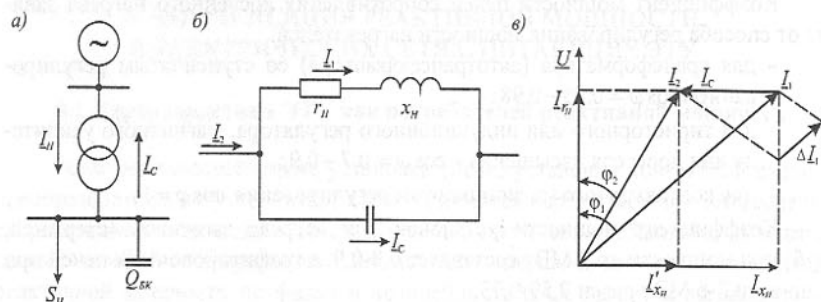


Рисунок 8.1 – Схема поперечной компенсации реактивной мощности

Вне зависимости от вида компенсации и технического исполнения компенсирующего устройства он должен иметь неизменную мощность Q_{Co} , выбираемую из условия достижения требуемого коэффициента мощности нагрузки $\cos \varphi_{HO}$ и переменную ΔQ_C , значение которой определяется необходимостью иметь стабилизированное напряжение при изменениях нагрузки.

Из условия постоянства активной мощности можно получить выражение для постоянного значения мощности компенсирующего устройства [8].

Действительно,

$$\frac{Q_n}{\lg \varphi_{n,e}} = \frac{Q_n - Q_{Co}}{\lg \varphi_{n,o}}, \quad (8.1)$$

где Q_n - «естественная» реактивная мощность нагрузки;

$\lg \varphi_{n,e}$ - «естественный» $\lg \varphi$.

$\lg \varphi_{n,o}$ - «требуемый» $\lg \varphi$.

Откуда

$$Q_{Co} = Q_n (1 - \lg \varphi_{n,o} / \lg \varphi_{n,e}). \quad (8.2)$$

Если пренебречь активным сопротивлением линии, что вполне допустимо для сетей с напряжением выше 1000 В, потеря напряжения в линии при протекании по ней реактивной мощности

$$\Delta U_n = Q \cdot X_n / U_n \approx Q \cdot X_n / U_{ном}, \quad (8.3)$$

где $U_n, U_{ном}$ - напряжение в начале линии и номинальное напряжение сети;

X_n - реактивное сопротивление линии.

Для отклонения напряжения $\delta U_{e,k}$ на нагрузке после компенсации имеем

$$\frac{\delta U_{e,k}}{100} = \frac{\Delta U}{U_n} = \frac{Q \cdot X_n}{U_n^2} = \frac{Q}{S_K} = \frac{Q_H - Q_{Co}}{S_K} = \frac{\Delta Q_H}{S_K}, \quad (8.4)$$

где S_K - мощность КЗ на шинах печной установки.

Как видно из формулы (8.4), отклонение напряжения на шинах печной подстанции при поперечной компенсации определяется лишь отклонением мощности нагрузки и не зависит от мощности компенсирующего устройства.

Для компенсации этих отклонений необходимо синхронно с изменением нагрузки искусственно менять мощность компенсирующего устройства так, чтобы отклонения напряжения не выходили за пределы допустимых $\delta U_{дон}$.

Тогда

$$\frac{\delta U_{дон}}{100} = \frac{\Delta Q_H - \Delta Q_C}{S_K}, \quad (8.5)$$

откуда

$$\Delta Q_C = \Delta Q_H (1 - \delta U_{дон} / \delta U_{e,k}), \quad (8.6)$$

где $\delta U_{e,k}$ - отклонение напряжения после компенсации, %.

В зависимости от быстродействия устройства компенсации последние могут использоваться либо только для устранения отклонений напряжения, либо для компенсации колебаний напряжения при резкопеременной нагрузке.

В качестве источников реактивной мощности наибольшее распространение на промышленных предприятиях получили конденсаторные батареи. Они более надежны и экономичны.

В системах электроснабжения мощных электропечей используются различные схемы поперечной компенсации (рис. 8.2).

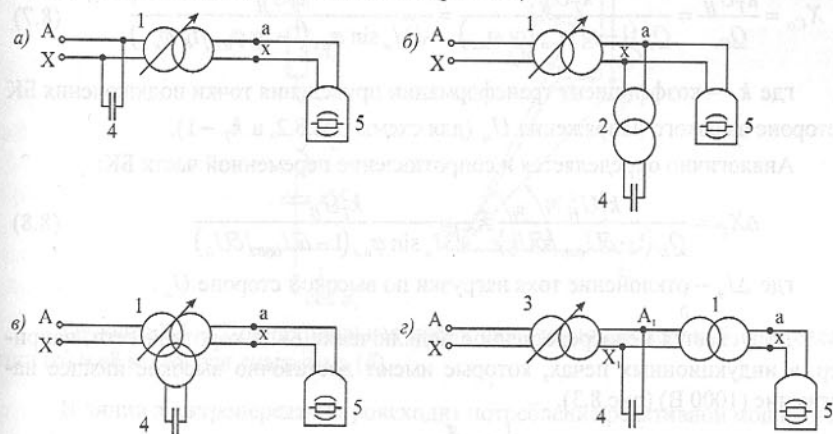


Рисунок 8.2 – Принципиальные схемы включения конденсаторных батарей при поперечной компенсации:

1 – печной трансформатор; 2 – повышающий трансформатор;
3 – регулировочный трансформатор; 4 – конденсаторная батарея;
5 – печь.

При выборе конкретной схемы подключения системы поперечной компенсации руководствуются следующими правилами:

- чем ближе подключена БК к самой ЭТУ, тем большая часть её электрооборудования разгружается от реактивной мощности;
- в связи с тем, что мощность БК прямо пропорциональна квадрату напряжения, необходимо её включать на наибольшее напряжение с учётом допустимого напряжения и необходимого уровня изоляции;
- при анализе конкретных схем производится технико-экономичный анализ с учётом стоимости дополнительного оборудования (трансформаторов, реакторов, коммутирующей аппаратуры и т.д.).

В установках руднотермических, дуговых сталеплавильных, индукционных (промышленной частоты) и других электропечей широко распространено прямое включение БК на стороне высшего напряжения печного трансформатора (рис. 8.2, а). Однако эта схема не разгружает электрооборудования печей. Для частичной или полной разгрузки от реактивной мощности печных трансформаторов используются другие схемы. Схема (рис. 8.2, б) требует установки дополнительного трансформатора для рационального использования емкости БК; в схеме (рис. 8.2, в) производится замена двухобмоточного трансформатора на трехобмоточный. Это повышает стоимость трансформаторов. За рубежом на ДСП широко используется схема (рис. 8.2, г), которая позволяет разгрузить регулировочный автотрансформатор трансформаторного агрегата.

Ёмкостное сопротивление постоянной части БК будет равно:

$$X_{Co} = \frac{k_T^2 U_H^2}{Q_{Co}} = \frac{k_T^2 U_H^2}{Q_H (1 - \lg \varphi_{n.o} / \lg \varphi_{n.e})} = \frac{k_T^2 U_H}{\sqrt{3} I_n \sin \varphi_{n.e} (1 - \lg \varphi_{n.o} / \lg \varphi_{n.e})} \quad (8.7)$$

где k_T — коэффициент трансформации приведения точки подключения БК к стороне высокого напряжения U_H (для схемы рис. 8.2, а $k_T = 1$).

Аналогично определяется и сопротивление переменной части БК:

$$\Delta X_C = \frac{k_T^2 U_H^2}{Q_H (1 - \delta U_{дон} / \delta U_0)} = \frac{k_T^2 U_H}{\sqrt{3} I_n \sin \varphi_{n.e} (1 - \delta U_{дон} / \delta U_0)} \quad (8.8)$$

где ΔI_n — отклонение тока нагрузки по высокой стороне U_H .

Допускается непосредственное подключение БК к короткой сети, например, в индукционных печах, которые имеют достаточно высокое низшее напряжение (1000 В) (рис. 8.3).

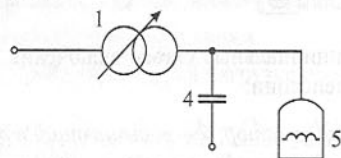


Рисунок 8.3 — Подключение БК к короткой сети трансформатора, питающего индукционную печь.

При использовании для компенсации реактивной мощности конденсаторов необходимо учитывать, что при включении и отключении БК, а также при коммутации её секций возникают толчки тока и перенапряжения. Это вызвано наличием колебательного контура, состоящего из емкости батареи и индуктивности сети и трансформатора. Ток включения незаряженной БК может в 5–15 раз превышать её номинальный ток, а перенапряжения могут достигать трехкратного значения фазного напряжения. Нелинейная индуктивность трансформаторных цепей может вызвать феррорезонансные явления. Всё это требует усложнения конструкции БК за счёт установки дополнительных токоограничивающих реакторов, снижает надежность и срок службы БК.

Колебания напряжения, возникающие при коммутационных процессах, ограничивает допустимую мощность БК, которая составляет 6–15 Мвар при напряжении сети 35 кВ и 20–90 Мвар при напряжении 110 кВ. Для мощных печей (руднотермических и дуговых) она соизмерима с требуемой мощностью компенсации. Поэтому для этих типов печей в основном применяется индивидуальная компенсация.

8.3. Продольная компенсация реактивной мощности

Способ компенсации реактивной мощности, при котором емкостное сопротивление конденсаторной батареи включается последовательно с сопротивлением нагрузки (рис. 8.4), носит название продольной емкостной компенсацией.

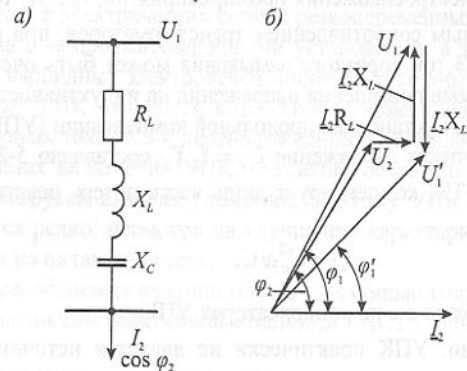


Рисунок 8.4 — Принципиальная схема включения продольной компенсации (а) и её векторная диаграмма (б).

В линии электропередачи происходит потребление реактивной мощности

$$Q_x = I_2^2 X_x. \quad (8.9)$$

Вследствие наличия включенной конденсаторной батареи часть этой мощности компенсируется

$$Q_c = I_2^2 X_c. \quad (8.10)$$

Таким образом, общее потребление реактивной мощности в линии после включения батареи составит

$$Q_a' = Q_a - Q_c = I_2^2(X_a - X_c). \quad (8.11)$$

Коэффициент мощности нагрузки с продольной компенсацией

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} = \frac{Q_a}{P_a} - \frac{I_2^2 X_c}{P_a} = \operatorname{tg} \varphi_{n.e} - \frac{I_2^2 X_c}{P_a}, \quad (8.12)$$

где $\operatorname{tg} \varphi_{n.e}$ - естественный $\operatorname{tg} \varphi$ нагрузки.

P_a, Q_a - активная и реактивная нагрузки.

Из этого выражения видно, что с помощью продольной компенсации можно снизить $\operatorname{tg} \varphi$ нагрузки.

При $X_a = X_c$ падения напряжения в индуктивности и ёмкости $I_2 X_a = I_2 X_c$ (резонанс напряжений) по линии будет протекать максимальный ток

$$I = \frac{U}{\sqrt{R_a^2 + (X_a - X_c)^2}} = \frac{U}{R_a}. \quad (8.13)$$

В системах электроснабжения промпредприятий, где R_a невелико по сравнению с индуктивным сопротивлением трансформаторов, при резонансе напряжений в режиме КЗ ток короткого замыкания может быть очень большим, что вызовет недопустимые повышения напряжения на индуктивности и ёмкости. Поэтому в применяемых установках продольной компенсации (УПК) ёмкость выбирается из расчёта, чтобы напряжение $U_c = I_2 X_c$ составляло 5-20% $U_{ном}$. Таким образом, ёмкость УПК компенсирует лишь часть потерь реактивной мощности, равную

$$Q = U_c^2 \omega C, \quad (8.14)$$

где U_c - напряжение на конденсаторах УПК.

Следовательно, УПК практически не является источником реактивной мощности.

Главное назначение продольной компенсации - частичная компенсация индуктивного сопротивления участков электрической сети для уменьшения потерь напряжения в них.

При наличии в цепи только сопротивления R_a и X_a напряжение U_2 в конце линии меньше напряжения U_1 в её начале на величину падений напряжений активного $I_2 R_a$ и индуктивного $I_2 X_a$ (рис.8, б), при этом $U_1 > U_2$; $\varphi_1 > \varphi_2$. Если же включить последовательно ёмкость X_c , то появится ещё одна составляющая падения напряжения $I_2 X_c$. Её направление на диаграмме противоположно индуктивной составляющей $I_2 X_a$.

При передаче активной и реактивной мощности по линии, потери напряжения в ней будут определяться

$$\Delta U_K = \frac{PR_a + Q(X_a - X_c)}{U_{ном}} = \Delta U - \frac{QX_c}{U_{ном}}, \quad (8.15)$$

где ΔU и U_K - потери напряжения в линии до и после компенсации.

Как уже было отмечено, компенсация индуктивного сопротивления цепи ёмкостью приводит к повышению токов КЗ, что очень опасно для самих конденсаторов УПК, так как напряжение на них при сквозных токах КЗ $U_K = I_K \cdot X_c$ возрастает пропорционально кратности тока КЗ ($I_K / I_{ном}$). Защита конденсаторов УПК от сквозных токов КЗ осуществляется их шунтированием искровым спекающимся разрядником, который после срабатывания выводится временно из работы для восстановления разрядных свойств.

Ценным свойством УПК является способность стабилизировать напряжение при резкопеременной нагрузке. Если, например, при $X_L = X_C$ ток I_2 резко увеличится, то изменится лишь величина $I_2 R_a$ (рис.8.4,б), что несущественно при малом R_a . А увеличение падения напряжения в индуктивности $I_2 X_a$ компенсируется увеличением падения напряжения в ёмкости ($-I_2 X_c$). Напряжение U_2 при этом будет мало отличаться от U_1 . Таким образом, продольная ёмкостная компенсация применяется главным образом как способ регулирования и стабилизации напряжения в электрических сетях с резкопеременными нагрузками (например, для цехов с мощными сварочными установками, а также при питании ферросплавных и карбидных электропечей мощностью 16,5-63 МВА).

К недостатку УПК относится возможность возникновения резонансных явлений при сквозных токах КЗ и перенапряжений, усугубляющихся при трансформаторных схемах включения УПК. Особенно резко они проявляются при наличии в токе нагрузки высших гармоник. Поэтому УПК в схемах питания ДСП используются редко, несмотря на улучшение характеристик печей и снижение их влияния на питающую сеть.

Устранить резонансные явления можно с помощью современного устройства управления потоками реактивной мощности FACTS, однако они очень дорогие.

Конденсаторные батареи продольной компенсации могут включаться либо непосредственно в рассечку цепи на высоком или промежуточном напряжениях (рис.8.5, а и б), либо через повышающий трансформатор на вторичной стороне печного трансформатора (рис.8.5, в).

Широко распространена схема включения БК в цепь обмотки высшего напряжения регулировочного трансформатора (рис.8.5, г), которая позволяет несколько (на 6-8%) снизить трансформаторную мощность.

УПК повышает напряжение на нагрузке. Для обычных параметров электрических печей (например, руднотермических) это увеличение достигает 30-

50%, что оказывает серьёзное влияние на характеристики печей, позволяя повысить максимально достижимую активную мощность.

На рис.8.5 представлены схемы включения БК продольной компенсации.

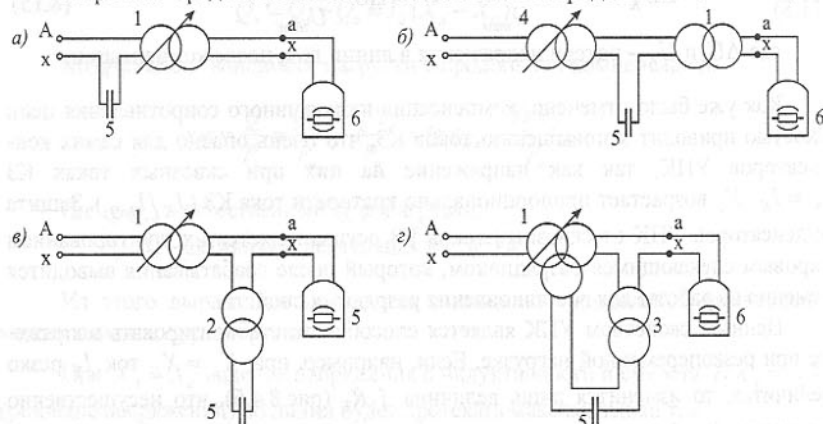


Рисунок 8.5 – Принципиальные схемы включения конденсаторной батареи продольной компенсации:

1 – главный печной трансформатор; 2 – повышающий трансформатор; 3 – линейный регулировочный (вольтдобавочный) трансформатор; 4 – регулирующий автотрансформатор; 5 – конденсаторная батарея; 6 – печь.

Включение конденсаторов непосредственно в короткую сеть невозможно ввиду протекания токов порядка нескольких десятков килоампер.

При настройке УПК на достижение заданного средневзвешенного коэффициента мощности выбирают БК с емкостным сопротивлением

$$X_{Co} = \frac{Q(1 - \lg \varphi_{н.о} / \lg \varphi_{н.е})}{I_n^2} = \frac{\sqrt{3}U \cdot \sin \varphi_{н.е} (1 - \lg \varphi_{н.о} / \lg \varphi_{н.е})}{I_n}, \quad (8.16)$$

где $\lg \varphi_{н.о}$ - требуемый коэффициент мощности;

$\lg \varphi_{н.е}$ - естественный коэффициент мощности.

Для компенсации отклонений и колебаний напряжения емкостное сопротивление БК должно быть равно:

$$X_C = \frac{U_n (\delta U_{i,0} - \delta U_{i,\text{дон}})}{100\sqrt{3}I_{\text{дон}} \cdot \sin \varphi} = \frac{U_n (\delta U_0 - \delta U_{\text{дон}})}{100\sqrt{3}I_{\text{дон}} \cdot \sin \varphi}, \quad (8.17)$$

где $I_{\text{дон}}$ - допустимый ток нагрузки БК;

$\delta U_{i,0}$, δU_0 - колебания и отклонения напряжения при отсутствии компенсации;

$\delta U_{i,\text{дон}}$, $\delta U_{\text{дон}}$ - допускаемые ГОСТ 13109-97 колебания и отклонения напряжения.

8.4 Компенсация реактивной мощности в электрических сетях со специфическими нагрузками

8.4.1 Компенсация реактивной мощности в электрической сети с несимметричными нагрузками

Как указывалось выше, несимметрия напряжения в трёхфазной сети характеризуется коэффициентом напряжения по обратной последовательности и не должна превышать 2%.

$$K_{2U} = U_2 / U_{\text{ном}} \leq 2\%.$$

Для компенсации реактивной мощности (КРМ) при несимметрии напряжений более 2% рекомендуется применять симметрирующие (СУ) или фильтросимметрирующие устройства (ФСУ). Суммарная мощность ёмкостного симметрирующего устройства выбирается таким образом, чтобы ток обратной последовательности СУ компенсировал ток обратной последовательности несимметричной нагрузки [8].

При подключении реактивных элементов СУ должно обеспечиваться допустимое значение K_{2U} , т.е.

$$K_{2U \text{ доп}} = (1 + \delta U) \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} / S_K. \quad (8.18)$$

Входной коэффициент реактивной мощности узла СУ – несимметричной нагрузки составляет:

$$\lg \varphi_{\text{вх}} = (Q_{CY} + Q_{\Sigma}) / P_{\Sigma}, \quad (8.19)$$

где P_{Σ} , Q_{Σ} – соответственно активные и реактивные мощности несимметричной нагрузки.

В зависимости от заданного значения Q_{CY} , допустимых отклонений напряжения прямой последовательности и коэффициента несимметрии напряжений K_{2U} , определяются реактивные мощности элементов СУ [8]:

$$\begin{aligned} Q_{AB} &= -\frac{1}{3} [C\sqrt{3} - D - Q_{CY}(1 - A - B\sqrt{3})]; \\ Q_{BC} &= -\frac{1}{3} [2D - Q_{CY}(1 + 2A)]; \\ Q_{CA} &= \frac{1}{3} [C\sqrt{3} + D + Q_{CY}(1 - A + B\sqrt{3})], \end{aligned} \quad (8.20)$$

где $A = K_{2U \text{ доп}} \cdot \cos \varphi_u / (1 + \delta U_{\text{дон}})$;

$B = K_{2U \text{ доп}} \cdot \sin \varphi_u / (1 + \delta U_{\text{дон}})$;

$C = BS_K + S_{AB} \cos(60^\circ - \varphi_{AB}) - P_{BC} + S_{CA} \cos(60^\circ + \varphi_{CA})$;

$D = -AS_K + S_{AB} \sin(60^\circ - \varphi_{AB}) + Q_{BC} - S_{CA} \sin(60^\circ + \varphi_{CA})$ – математические величины;

$S_{AB}, P_{BC}, S_{CA}, Q_{BC}$ – модули мощностей нагрузок.

Положительные значения Q_{CY} соответствует индуктивной мощности элемента устройства, а отрицательное – ёмкостной.

При наличии в узле сети генерирующих источников высших гармоник для полученной схемы СУ с помощью выражений, приведенных в табл.8.1, следует проверить, не возникают ли при выбранных параметрах резонансы токов на каких-либо частотах.

При возникновении резонанса необходимо проверить БК на перегрузку их токами гармоник. При недопустимой перегрузке БК следует использовать последовательное подключение реактора или установить фильтросимметрирующее устройство (ФСУ).

Таблица 8.1 – Формулы для определения резонансных гармоник

| № | Схема симметрирующего устройства | Порядковый номер резонансной гармоники |
|---|----------------------------------|---|
| 1 | | $n_{1,2} = \sqrt{\frac{S_K(Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CA}) \pm \sqrt{Q_{AB}^2 + Q_{BC}^2 + Q_{CA}^2 - (Q_{AB} \cdot Q_{BC} + Q_{BC} \cdot Q_{CA} + Q_{CA} \cdot Q_{AB})}}{3(Q_{AB} \cdot Q_{BC} + Q_{BC} \cdot Q_{CA} + Q_{CA} \cdot Q_{AB})}}$ |
| 2 | | $n_{1,2} = \sqrt{\frac{(2S_K + 3Q_{AB})(Q_{BC} + Q_{CA}) \pm \sqrt{(2S_K + 3Q_{AB})^2(Q_{BC} + Q_{CA})^2 - 12Q_{BC}Q_{CA}S_K(2Q_{AB} + S_K)}}{6 \cdot Q_{BC} \cdot Q_{CA}}}$ |
| 3 | | $n_{1,2} = \sqrt{\frac{S_K(Q_{BC} + Q_{CA}) \pm \sqrt{Q_{BC}^2 + Q_{CA}^2 - Q_{BC} \cdot Q_{CA}}}{3 \cdot Q_{BC} \cdot Q_{CA}}}$ |
| 4 | | $n_1 = \sqrt{\frac{S_K}{2 \cdot Q_{CA}}}$ |
| 5 | | $n_1 = \sqrt{\frac{S_K(S_K + 2Q_{AB})}{Q_{CA}(2S_K + 3Q_{AB})}}$ |
| 6 | | $n_1 = \sqrt{\frac{S_K(S_K + 2Q_{AB}) + Q_{BC}(2S_K + 3Q_{AB})}{Q_{CA}[2S_K + 3(Q_{AB} + Q_{BC})]}}$ |

Пример 8.1. Для условий примера 7.15 определим параметры симметрирующего устройства. Мощность, необходимая по условию компенсации $Q_{KY} = 5$ Мвар.

Принимаем $\delta U = 0$; $K_{2U} = K_{2U \text{ доп}} = 0,02$.

Решение. По формулам (8.20), находим

$$A = 0,02 \cdot \cos 30^\circ / (0+1) = 0,0173;$$

$$B = 0,02 \cdot \sin 30^\circ / (0+1) = 0,01;$$

$$C = 0,01 \cdot 136 - 4,33 = -2,97;$$

$$D = -0,0173 \cdot 136 + 2,5 = 0,147;$$

$$Q_{AB} = -\frac{1}{3}[\sqrt{3}(-2,97) - 0,147 - (-5)(1 - 0,0173 - 0,01 \cdot \sqrt{3})] = 0,155 \text{ Мвар};$$

$$Q_{BC} = -\frac{1}{3}[2 \cdot 0,147 - (-5)(1 + 2 \cdot 0,0173)] = -1,822 \text{ Мвар};$$

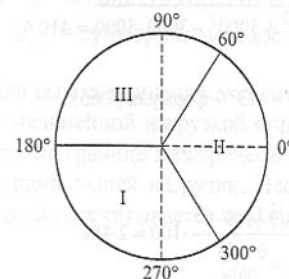
$$Q_{CA} = \frac{1}{3}[\sqrt{3}(-2,97) + 0,147 + (-5)(1 - 0,0173 + 0,01 \cdot \sqrt{3})] = -3,333 \text{ Мвар};$$

$$Q_{CY} = Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CA} = 0,155 - 1,822 - 3,333 = -5 \text{ Мвар}.$$

Таким образом, симметрирование выполняется по схеме 2 (табл.8.1).

В общем случае симметрирование может быть осуществлено и с помощью двух емкостных элементов, подключённых на равные линейные напряжения (в зависимости от фазы тока обратной последовательности). Симметрирующие возможности емкостного двухэлементного СУ существенно зависят от характера несимметричной нагрузки.

Мощность БК и подключение их между теми или иными фазами определяются в зависимости от аргумента $\varphi_{2\Sigma}$ вектора эквивалентного тока обратной последовательности, $I_{2\Sigma}$ в I, II или III области (рис.8.6) [7].



I. $180^\circ \leq \varphi_{2\Sigma} \leq 300^\circ$;

II. $300^\circ \leq \varphi_{2\Sigma} \leq 60^\circ$;

III. $60^\circ \leq \varphi_{2\Sigma} \leq 180^\circ$.

Рисунок 8.6 – Диаграмма распределения аргумента $\varphi_{2\Sigma}$ тока обратной последовательности $I_{2\Sigma}$

Суммарная мощность БК при полном симметрировании определяется по выражениям:

$$\text{I. } Q_\Sigma = \sqrt{3}U_{\text{ном}} \cdot I_{2\Sigma}(\sqrt{3} \sin \varphi_{2\Sigma} + \cos \varphi_{2\Sigma});$$

$$\text{II. } Q_\Sigma = 2\sqrt{3}U_{\text{ном}} \cdot I_{2\Sigma} \cdot \cos \varphi_{2\Sigma};$$

$$\text{III. } Q_\Sigma = \sqrt{3}U_{\text{ном}} \cdot I_{2\Sigma}(\sqrt{3} \sin \varphi_{2\Sigma} - \cos \varphi_{2\Sigma}).$$

(8.21)

Если реактивная мощность, необходимая для КРМ в узле сети $Q_{КРМ} > Q_{\Sigma}$ в расчёте вместо $Q_{КРМ}$ принимается Q_{Σ} .

Отношение мощностей Q_{AB}/Q_{Σ} ; Q_{BC}/Q_{Σ} ; Q_{CA}/Q_{Σ} и их подключения на линейные напряжения в I, II и III областях [7]

$$\begin{aligned} \text{I. } \frac{Q_{AB}}{Q_{\Sigma}} &= 0,5 - \frac{1}{2\sqrt{3}} \operatorname{tg} \varphi_{2\Sigma}; \quad \frac{Q_{BC}}{Q_{\Sigma}} = 1 - \frac{Q_{AB}}{Q_{\Sigma}}; \\ \text{II. } \frac{Q_{BC}}{Q_{\Sigma}} &= \frac{2}{3 - \sqrt{3} \cdot \operatorname{ctg} \varphi_{2\Sigma}}; \\ \text{III. } \frac{Q_{CA}}{Q_{\Sigma}} &= 1 - \frac{Q_{BC}}{Q_{\Sigma}}. \end{aligned} \quad (8.22)$$

При неполном симметрировании суммарная мощность БК

$$Q_{\text{нен}} = Q_{\Sigma} (1 - K_{2U}/K_{2U\phi}), \quad (8.23)$$

где $K_{2U\phi}$ — фактическое значение коэффициента несимметрии (до подключения СУ);

K_{2U} — нормируемое значение этого коэффициента.

Пример 8.2. Однофазные электрические печи мощностью 3МВА и 5МВА при $\cos \varphi = 1$ подключены к сети 6 кВ на линейные напряжения U_{AB} и U_{BC} . На шинах 6 кВ $S_K = 180$ МВА. Определить значение K_{2U} , и в случае необходимости рассчитать параметры СУ.

Решение. Ток обратной последовательности несимметричной нагрузки (7.64)

$$\begin{aligned} I_2 = I_{2\Sigma} &= \frac{\sqrt{3}}{3U_{\text{ном}}} \sqrt{S_{AB}^2 + S_{BC}^2 - S_{AB} \cdot S_{BC}} = \frac{\sqrt{3}}{3 \cdot 6} \sqrt{3000^2 + 5000^2 - 3000 \cdot 5000} = 419 \text{ А}; \\ \varphi_2 = \varphi_{2\Sigma} &= \arctg \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{S_{AB} + S_{BC}}{S_{AB} - S_{BC}} = \arctg \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{3+5}{3-5} = 113^\circ - \text{формула (7.65)}. \end{aligned}$$

Коэффициент обратной последовательности

$$K_{2U} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{2\Sigma} \cdot Z_{2\Sigma}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{2\Sigma} \cdot U_{\text{ном}}^2 \cdot 100}{U_{\text{ном}} \cdot S_K} = \frac{\sqrt{3} \cdot 419 \cdot 6^2}{6 \cdot 180} \cdot 100 = 2,4\%.$$

Мощность БК для полного устранения несимметрии (III зона, рис.8.4), формула (8.21)

$$Q_{\Sigma} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_{2\Sigma} (\sqrt{3} \sin 113^\circ - \cos 113^\circ) = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 419 (\sin 113^\circ - \cos 113^\circ) = 8,64 \text{ Мвар}.$$

Распределение БК (8.22)

$$\begin{aligned} Q_{BC} &= \frac{2 \cdot Q_{\Sigma}}{3 - \sqrt{3} \operatorname{ctg} \varphi_{2\Sigma}} = \frac{2 \cdot 8,64}{3 - \sqrt{3} \cdot \operatorname{ctg} 113^\circ} = 4,63 \text{ Мвар}; \\ Q_{CA} &= 8,64 - 4,63 = 4,01 \text{ Мвар}. \end{aligned}$$

Проверка правильности решения:

- ток обратной последовательности СУ

$$I_2 \text{ СУ} = \frac{\sqrt{3}}{3U_{\text{ном}}} \sqrt{Q_{BC}^2 + Q_{CA}^2 - Q_{BC} \cdot Q_{CA}} = \frac{\sqrt{3}}{3 \cdot 6} \sqrt{4,63^2 + 4,01^2 - 4,63 \cdot 4,01} = 419 \text{ А};$$

- начальная фаза тока

$$\varphi_{2\text{СУ}} = \arctg \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{2Q_{CA} - Q_{BC}}{Q_{BC}} - \varphi_{\text{СУ}} = \arctg \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{2 \cdot 4,01 - 4,63}{4,63} + 180^\circ = 293^\circ;$$

$$\varphi_{2\text{СУ}} - \varphi_2 = 293^\circ - 113^\circ = 180^\circ,$$

что подтверждает правильность выбора.

8.4.2 Компенсация реактивной мощности в электрической сети с нелинейными нагрузками

В узлах сети предприятия с нелинейными нагрузками допускается применение в качестве источника реактивной мощности конденсаторных батарей, если выполняются условия:

- для вентильных преобразователей

$$S_K/S_{\text{НЛ}} \geq 200 \quad (8.24)$$

- для других нелинейных нагрузок

$$S_K/S_{\text{НЛ}} \geq 100, \quad (8.25)$$

где S_K — мощность короткого замыкания;

$S_{\text{НЛ}}$ — суммарная мощность нелинейной нагрузки;

При выполнении этих условий вопрос о компенсации реактивной мощности в сети с нелинейной нагрузкой определяется необходимым балансом реактивной мощности на границе электрического раздела предприятия и энергосистемы в период её наибольшей нагрузки. Необходимая суммарная мощность конденсаторных батарей рассчитывается по формуле [13]:

$$Q_{\text{БК}} = Q_{\text{Н1}} - Q_{\Sigma}, \quad (8.26)$$

где $Q_{\text{Н1}}$ — наибольшая суммарная реактивная нагрузка предприятия в часы активной нагрузки энергосистемы;

Q_{Σ} — значение экономически оптимальной реактивной мощности, которая может быть передана предприятию в режиме наибольшей активной нагрузки энергосистемы.

При $K_U < 5\%$ рекомендуется применять в качестве устройств КРМ батареи конденсаторов (8.26) в комплексе с защитным реактором или фильтры.

Напряжение БК определяется по формуле:

$$U_{БК} \geq n_{\min}^2 \cdot U_{\text{ном}} / (n_{\min}^2 - 1), \quad (8.27)$$

где n_{\min} — наименьший порядковый номер гармоники;

$U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение сети, в которой устанавливают конденсатор, защищённый реактором. Индуктивное сопротивление, Ом, защитного реактора на частоте 50 Гц определяется из условия:

$$X_p \geq 1,1 \cdot U_{\text{ном БК}}^2 / (n_{\min}^2 \cdot Q_{\text{ном БК}}), \quad (8.28)$$

где $U_{\text{ном БК}}$ — номинальное напряжение конденсаторной установки по данным завода-изготовителя;

$Q_{\text{ном БК}}$ — реактивная суммарная мощность БК по данным завода-изготовителя.

При коэффициенте искажения формы кривой напряжения $K_U \geq 5\%$ рекомендуется применять силовые резонансные фильтры (СРФ) или фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ). Промышленность осваивает выпуск СРФ напряжением 10 кВ и ФКУ 0,4 кВ.

Выбор параметров силовых резонансных фильтров [6]. Узкополосные резонансные фильтры являются устройствами многоцелевого назначения и применяются для КРМ и снижения уровней гармоник. СРФ настраивают на частоты одной или нескольких гармоник, преобладающих в амплитудных спектрах напряжения, в зависимости от вида нелинейных нагрузок и величины K_p , определяемой по формуле:

$$K_p = Q_p / S_K, \quad (8.29)$$

где Q_p — установленная мощность БК-фильтра n_p -ой гармоники;

S_K — мощность короткого замыкания на шинах, к которым подключён фильтр.

При $K_p \geq 1,5 \cdot 10^{-2}$ нет необходимости устанавливать большое число фильтров, в этих случаях возможно применение ненастроенных фильтров, выбор которых приведен ниже.

В сетях с 6-фазными вентильными преобразователями при $K_p \leq 2 \cdot 10^{-2}$ устанавливают СРФ 7-ой гармоники. Если при этом не обеспечивается снижение K_U до 5% или менее, рекомендуется дополнительно предусмотреть фильтр 11-ой гармоники. При $K_p \geq 2,5 \cdot 10^{-2}$ достаточно учитывать СРФ 5-ой гармоники. В сетях с 12-фазными вентильными преобразователями устанавливают СРФ 11-ой гармоники. В этом случае можно использовать СРФ, настроенный на частоту 7 и 9-ой гармоники, если будет обеспечено требуемое снижение несину-

соидальности напряжения. Такое решение позволяет обеспечить условия работы конденсаторов и увеличить срок их службы.

Допускается установка СРФ и отдельных БК в случае, если БК используют для регулирования напряжения. В этом случае, при установке фильтра 5-ой гармоники должно соблюдаться условие $K_{БК} / K_p \geq 2$, фильтра 11-ой гармоники — $K_{БК} / K_p \geq 1,5$. Здесь $K_{БК} = Q_{БК} / S_K$, где $Q_{БК}$ — установленная мощность отдельной БК.

В сетях с ДСП, сварочными установками, газоразрядными лампами устанавливают СРФ 3,5 и 7-ой гармоники.

Расчёт параметров СРФ [7]. Мощность Q_p , квар, БК-фильтра (на фазу) определяют по выражению:

$$Q_p \geq 1,2 \cdot K_C U_{\text{ном БК}} \cdot I_{n\Sigma}, \quad (8.30)$$

где $U_{\text{ном БК}}$ — номинальное напряжение БК, кВ;

$I_{n\Sigma}$ — действующее значение гармоник тока, проходящих через СРФ n_p -ой гармоники;

$K_C = \sqrt{3}$ — при соединении конденсаторов в звезду и $K_C = 3$ — при соединении в звезду.

Ток $I_{n\Sigma}$ — определяют по формуле:

$$I_{n\Sigma} = \sqrt{\sum (I_{ns} \cdot \sigma_{ns})^2}, \quad (8.31)$$

где I_{ns} — ток n_s -ой гармоники; протекающий через СРФ n_p -ой гармоники;

σ_{ns} — для тока n_s -ой гармоники.

Коэффициент σ_{ns} находят по следующим формулам:

- при установке одного СРФ

$$\sigma_{ns} = \frac{1}{\left[\frac{1}{(1 - n_{s*}^2)} \right] / k_p n_p^2 + 1}, \text{ где } n_{s*} = n_p / n_s; \quad (8.32)$$

- при установке двух СРФ с частотами настройки n_{p1} и n_{p2}

$$\sigma_{ns}^{(1\phi)} = 1 / \left[\frac{1}{k_{p1} n_{p1}^2} (1 - n_{s1*}^2) + \frac{k_{p2}}{k_{p1}} \cdot \frac{n_{p2}^2}{n_{p1}^2} \cdot \frac{(1 - n_{s1*}^2)}{(1 - n_{s2*}^2)} + 1 \right]; \quad (8.33)$$

$$\sigma_{ns}^{(2\phi)} = 1 / \left[\frac{1}{k_{p2} n_{p2}^2} (1 - n_{s2*}^2) + \frac{k_{p1}}{k_{p2}} \cdot \frac{n_{p1}^2}{n_{p2}^2} \cdot \frac{(1 - n_{s2*}^2)}{(1 - n_{s1*}^2)} + 1 \right]; \quad (8.34)$$

где $n_{s1*} = n_{p1} / n_s$; $n_{s2*} = n_{p2} / n_s$; $k_{p1} = Q_{p1} / S_K$; $k_{p2} = Q_{p2} / S_K$.

- при установке одного СРФ и отдельной БК

$$\sigma_{ns}^{(\phi)} = 1 / \left[\frac{1}{k_p n_p^2} (1 - n_{s*}^2) + \frac{k_{BK}}{k_p} \cdot (1 - \frac{1}{n_{s*}^2}) + 1 \right]; \quad (8.35)$$

$$\sigma_{ns}^{(BK)} = 1 / \left[1 - \frac{k_p}{k_{BK}} \cdot \frac{n_{s*}^2}{1 - n_{s*}^2} + \frac{n_{s*}^2}{k_{BK} \cdot n_p^2} \right]. \quad (8.36)$$

Отсутствие перегрузки БК по мощности и превышения напряжения на них сверх номинального проверяют с помощью неравенства:

$$\sqrt{a_n^2 k_U^2 + \frac{1}{I_{ном БК}^2} \sum_{n=2}^m I_{n БК}^2 / n^2} \leq C_U, \quad (8.37)$$

где $a_n = n_p^2 / (n_p^2 - 1)$; $k_U = U_{ш} / U_{ном}$;

n_p – номер гармоники, на которую настроен СРФ;

$U_{ш}$ – наибольшее, возможное в условиях эксплуатации, значение напряжения на шинах подстанции;

$I_{нБК}$ – ток n -ой гармоники, протекающий через БК;

C_U – коэффициент допустимости перегрузки БК по напряжению.

Для $n > 3$ вторым слагаемым можно пренебречь, и условие (8.37) примет вид

$$a_n k_U \leq C_U. \quad (8.38)$$

Условие отсутствия перегрузки по току

$$I_{ном БК}^2 \geq \sum_{n=1}^m I_{n БК}^2 / \sqrt{C_i^2 - a_n^2 k_U^2}, \quad (8.39)$$

где C_i – коэффициент допустимости перегрузки БК по току.

Если требуемая мощность конденсаторов СРФ (8.30) превосходит величину дефицита реактивной мощности в месте их установки (8.26), т.е. $Q_P > Q_{БК}$, то фильтр следует настроить на частоту гармоники порядка

$$n_p \leq Q_{БК} \cdot n_{нм} / Q_{P(n_{нм})}, \quad (8.40)$$

где $n_{нм}$ – наименьший порядок гармоники из имеющихся в амплитудном спектре тока нелинейных нагрузок;

$Q_{P(n_{нм})}$ – мощность БК, определённая по формуле (8.30).

Относительная величина остаточного напряжения n_s -ой гармоники после установки СРФ:

$$\Delta U_{ns*} = U_{ns} \left(1 - \sum_{n=2}^m \sigma_{ns}^{(\phi)} \right). \quad (8.41)$$

При возможности параллельной работы СРФ, подключённых к разным сетям (системы шин) подстанции и настроенных на частоту одной и той же гармоники, каждый из СРФ следует выбрать по мощности КЗ при параллельной работе их с учётом суммарного тока гармоник источников.

Пример 8.3. Рассчитать фильтры для подстанции цеха электролиза.

Исходные данные: $S_K = 330$ МВА; $S_n = 26000$ кВА; число фаз $m = 12$;

$U_{ш} = 10,5$ кВ; $Q_{БК} = 4,5$ Мвар; $k_U = 7\%$; $U_{11*} = 5,4\%$; $U_{13*} = 4,1\%$; конденсаторные батареи соединены в треугольник.

Решение.

1. Определим токи гармоник преобразователей

$$I_{11} = \frac{26000}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 11} = 130 \text{ А}; \quad I_{13} = 110 \text{ А}.$$

2. Примем к установке один СРФ, настроенный на частоту 11-ой гармоники. Примем $Q_P = Q_{БК} = 4500$ квар; $K_P = \frac{4,5}{330} = 1,36 \cdot 10^{-2}$. Выберем конденсаторы типа КС-75-6,3.

3. Найдём долю тока 13-ой гармоники, протекающую через СРФ по формуле (8.32)

$$\sigma_{n11} = 1 / \left[\left(1 - \left(\frac{11}{11} \right)^2 \right) / 1,36 \cdot 10^{-2} \cdot 11^2 + 1 \right] = 1;$$

$$\sigma_{n13} = 1 / \left[\left(1 - \left(\frac{11}{13} \right)^2 \right) / 1,36 \cdot 10^{-2} \cdot 11^2 + 1 \right] = 0,853.$$

Ток гармоник в цепи БК по формуле (8.31)

$$I_{н\Sigma} = \sqrt{130^2 + (110 \cdot 0,853)^2} = 160,3 \text{ А}.$$

Мощность БК-фильтра на три фазы по формуле (8.30)

$$Q_P = 3 \cdot 1,2 \cdot 160,3 \cdot 6,3 = 3636 \text{ квар} \leq 4500 \text{ квар},$$

что подтверждает допустимость установленной мощности БК-составляющей $Q_P = 4500$ квар.

4. Проверим БК на отсутствие перегрузки по мощности и превышения напряжения по формуле (8.38)

$$\frac{11^2}{11^2 - 1} \cdot \frac{10,5^2}{3 \cdot 6,3} = 0,56 < 1,$$

что подтверждает правильность выбора по указанным параметрам.

5. Сопротивление фазы реакторов по формуле (8.28)

$$X_P \geq \frac{1,1 \cdot 6,3^2}{11^2 \cdot 4500/3} = 0,24 \text{ Ом}.$$

6. После установки выбранного фильтра остаточное напряжение гармоник определяют по формуле (8.40)

$$\Delta U_{11} = 5,4 \cdot (1 - 1) = 0; \Delta U_{13} = 4,1 \cdot (1 - 0,853) = 0,6\%.$$

При установке СРФ 11-ой и 13-ой гармоник мощность БК-фильтра

$$Q_p = 3 \cdot (1,2 \cdot 6,3 \cdot 130 + 1,2 \cdot 6,3 \cdot 110) = 5443 \text{ квар} > 4500 \text{ квар},$$

т.е. значительно больше, чем требуется для компенсации реактивной мощности.

Расчёт параметров филтросимметрирующего устройства (ФСУ) [7].

Устройство представляет собой несимметричный фильтр, который подключается на линейное напряжение сети (рис. 8.7). Выбор линейных напряжений, на которые включаются фильтрующие цепи ФСУ, и соотношение мощностей БК, включаемых в фазы фильтра, определяются условиями симметрирования напряжения.

Мощность БК включаемых на линейное напряжение $U_{ab}(U_{bc})$, должна удовлетворять условию:

$$Q_{БК}^{ab(bc)} > 1,2 \cdot U_{ном БК} \cdot I_{н\Sigma}^{ab(bc)}, \quad (8.42)$$

где $I_{н\Sigma}^{ab(bc)}$ — действующее значение тока высших гармоник, протекающего через фильтрующую цепь, настроенную на частоту n_p -ой гармоники.

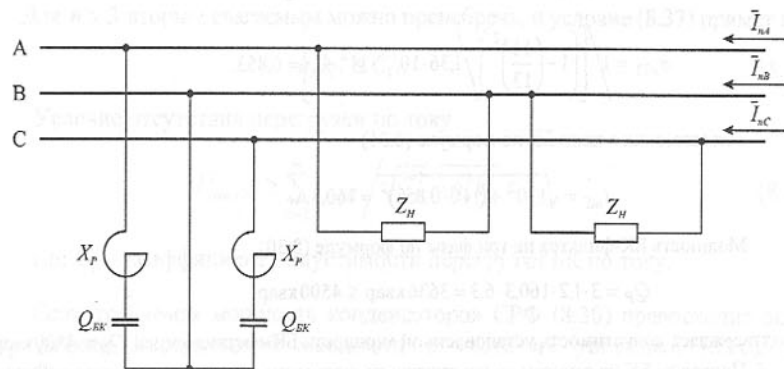


Рисунок 8.7 — Схема филтросимметрирующего устройства

Ток $I_{н\Sigma}^{ab(bc)}$ определяется по выражению:

$$I_{н\Sigma}^{ab(bc)} = \sqrt{\sum_{n=2}^m (I_{ns} \sigma_{ns*}^{ab(bc)})^2}, \quad (8.43)$$

где I_{ns} — ток n_s -ой гармоники;

$\sigma_{ns*}^{ab(bc)}$ — доля тока I_{ns} , проходящего через плечо фильтра, подключенного на напряжение $U_{ab}(U_{bc})$.

Коэффициенты

$$\sigma_{ns*}^{ab} = \sqrt{1 + \rho_{bc} + \rho_{bc}^2} / (1 + \rho_{ab} + \rho_{bc}) = [1 + 0,5(\rho_{bc} + \rho_{bc}^2)] / (1 + \rho_{ab} + \rho_{bc}); \quad (8.44)$$

$$\sigma_{ns*}^{ab} = \sqrt{1 + \rho_{ab} + \rho_{ab}^2} / (1 + \rho_{ab} + \rho_{bc}) = [1 + 0,5(\rho_{ab} + \rho_{ab}^2)] / (1 + \rho_{ab} + \rho_{bc}), \quad (8.45)$$

где $\rho_{ab(bc)}$ — коэффициенты, которые рассчитываются по выражению:

$$\rho_{ab(bc)} = \frac{1}{1 + [3K_{Pab(bc)} \cdot n_p^2 / (1 - n_s^2)]}; \quad (8.46)$$

$$K_{Pab(bc)} = Q_{БК}^{ab(bc)} / S_K,$$

где $K_{Pab(bc)}$ — относительная мощность БК ФСУ;

S_K — мощность КЗ на шинах ФСУ;

n_{s*} — относительная доля n_p -ой гармоники, протекающей через ФСУ

$$n_{s*} = n_p / n_s.$$

Суммарная мощность БК ФСУ, определяемая условиями фильтрации высших гармоник, не должна превосходить оптимальные значения реактивной мощности для данного узла сети. Если мощность БК ФСУ оказывается недостаточной по условиям перегрузки их токами высших гармоник, следует снизить частоту настройки фильтра.

При значениях $K_p = 1,5 \cdot 10^{-2}$ отклонение частоты настройки от резонансной допускается в пределах $\pm 5\%$. Рекомендуется в этом случае принимать $n_p = 5$ при наличии в сети 6-фазных вентильных преобразователей и $n_p = 11$ — при наличии 12-фазных вентильных преобразователей.

Относительное значение высших гармоник напряжения в составе линейных напряжений сети после установки ФСУ, настроенного на частоту n_p -ой гармоники и включенного на линейное напряжение U_{ab} и U_{bc} (по отношению к значению их до установки ФСУ), определяется по выражениям:

$$U_{n*ab} = \frac{\rho_{ab} \cdot \sqrt{3 \cdot (1 + \rho_{bc} + \rho_{bc}^2)}}{1 + \rho_{ab} + \rho_{bc}} = \sqrt{3} \rho_{ab} [1 + 0,5(\rho_{bc} + \rho_{bc}^2)] / [1 + \rho_{ab} + \rho_{bc}];$$

$$U_{n*bc} = \frac{\rho_{bc} \cdot \sqrt{3 \cdot (1 + \rho_{ab} + \rho_{ab}^2)}}{1 + \rho_{ab} + \rho_{bc}} = \sqrt{3} \rho_{bc} [1 + 0,5(\rho_{ab} + \rho_{ab}^2)] / [1 + \rho_{ab} + \rho_{bc}]; \quad (8.47)$$

$$U_{n*ca} = \frac{\rho_{ca} \cdot \sqrt{3 \cdot (\rho_{ab}^2 + \rho_{bc}^2 + \rho_{ab} \cdot \rho_{bc})}}{1 + \rho_{ab} + \rho_{bc}} =$$

$$= \sqrt{3} \cdot \sqrt{\rho_{ab}^2 + \rho_{bc}^2 + \rho_{ab} \cdot \rho_{bc}} / (1 + \rho_{ab} + \rho_{bc}).$$

При $K_p \geq 1,5 \cdot 10^{-2}$ можно считать

$$U_{n*ab(bc)} \approx 1 - \sigma_{ns*}^{ab(bc)}.$$

В качестве критерия оптимальности выбора параметров симметрирующего устройства (СУ) принимается условие минимума установленной мощности СУ: $S \rightarrow \min$.

Это условие используется при выборе устройств для полного или частичного симметрирования.

Установленная мощность СУ с электрическими связями определяется реактивной мощностью Q элементов СУ:

$$S_y = \sum_{i=1}^r |Q_i|,$$

где r — число элементов СУ.

Пример 8.4. Выбрать фильтросимметрирующее устройство для условий примера 8.2. при $K_{IT} = 7,6\%$. Источник гармоник — 12-ти фазный вентильный преобразователь. Токи гармоник, генерируемые вентильным преобразователем, $I_{11} = 145$ А, $I_{13} = 122$ А. Относительные значения напряжения высших гармоник $U_{11*} = 5,8\%$; $U_{13*} = 4,9\%$.

Решение. По условию симметрирования выбираем мощности БК в соответствии с решением примера 8.2. $Q_{AB} = 4,63$ Мвар; $Q_{BC} = 4,01$ Мвар. Выбираемые БК входят в состав фильтров, включённых на напряжение АВ и ВС и настроенных на частоту $n_p = 11$.

Для определения остаточного напряжения 13-ой гармоники найдём значения коэффициентов ρ_{ab} и ρ_{ca} , формула (8.46)

$$K_{Pab} = Q_{ab}/S_K = 4,63/180 = 2,57 \cdot 10^{-2}; \quad K_{Pbc} = Q_{bc}/S_K = 4,01/180 = 2,22 \cdot 10^{-2}.$$

$$\rho_{ab} = \frac{1}{1 + 3 \cdot 2,57 \cdot 10^{-2} \cdot 11^2 / [1 - (11/13)^2]} = 0,03;$$

$$\rho_{bc} = \frac{1}{1 + 3 \cdot 2,22 \cdot 10^{-2} \cdot 11^2 / [1 - (11/13)^2]} = 0,034.$$

Относительное значение остаточного напряжения 13-ой гармоники находится по формуле (8.47)

$$U_{13*ab} = \sqrt{3} \cdot 0,03 \cdot [1 + 0,5 \cdot (0,034 + 0,034^2)] / (1 + 0,03 + 0,034) = 0,053;$$

$$U_{13*bc} = \sqrt{3} \cdot 0,034 \cdot [1 + 0,5 \cdot (0,03 + 0,03^2)] / (1 + 0,03 + 0,034) = 0,056;$$

$$U_{13*ca} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{0,03^2 + 0,034^2} + 0,03 \cdot 0,034 / (1 + 0,03 + 0,034) = 0,09.$$

Остаточное напряжение 13-й гармоники будет равно

$$U'_{13*ab} = 4,9 \cdot 0,053 = 0,26\%;$$

$$U'_{13*bc} = 4,9 \cdot 0,056 = 0,27\%;$$

$$U'_{13*ca} = 4,9 \cdot 0,09 = 0,44\%.$$

что меньше 5%.

Доля тока, протекающего через каждое плечо фильтра (формула (8.44), (8.45))

$$\sigma_{1113*}^{ab} = [1 + 0,5 \cdot (0,034 + 0,034^2)] / (1 + 0,3 + 0,034) = 0,956;$$

$$\sigma_{1113*}^{bc} = [1 + 0,5 \cdot (0,03 + 0,03^2)] / (1 + 0,03 + 0,034) = 0,954.$$

Суммарный ток высших гармоник, протекающих через фильтр (формула 8.43)

$$I_{n\Sigma}^{ab} = \sqrt{145^2 + (122 \cdot 0,956)^2} = 186 \text{ А};$$

$$I_{n\Sigma}^{bc} = \sqrt{145^2 + (122 \cdot 0,954)^2} = 186 \text{ А}.$$

Мощность БК должна удовлетворять условию (8.42)

$$Q^{ab} \geq 1,2 \cdot 6 \cdot 0,186 = 1,34 \text{ Мвар};$$

$$Q^{bc} \geq 1,2 \cdot 6 \cdot 0,186 = 1,34 \text{ Мвар},$$

т.е. условие выполняются: $4,63 \text{ Мвар} > 1,34 \text{ Мвар}$; $4,01 > 1,34 \text{ Мвар}$.

Таким образом, перегрузка БК по току отсутствует.

8.4.3 Компенсация реактивной мощности в электрической сети с резкопеременными нагрузками

В сетях с резкопеременной нагрузкой особенности компенсации реактивной мощности (КРМ) заключаются в следующем:

а) из-за низкого коэффициента мощности потребителей и резкопеременного характера нагрузки необходимо осуществлять компенсацию как постоянной, так и переменной составляющей реактивной мощности. Компенсация постоянной составляющей реактивной мощности необходима для улучшения $\cos \varphi$ и для уменьшения отклонения напряжения в питающей сети. Компенсация переменной составляющей реактивной мощности преследует цель уменьшения колебаний напряжения в питающей сети;

б) из-за быстрых изменений потребляемой реактивной мощности необходимо применение быстродействующих компенсирующих устройств (КУ), способных изменять регулируемую реактивную мощность со скоростью, соответствующей скорости наброса и сброса потребляемой реактивной мощности. Необходимое быстродействие таких КУ можно ориентировочно определить как $dQ/dt = 100 \div 2000$ Мвар/с;

в) ограничивается применение батарей конденсаторов для компенсации постоянной составляющей реактивной мощности в сети с резкопеременной вентильной нагрузкой из-за наличия высших гармоник тока и напряжения при работе нелинейных нагрузок.

На стадии проектирования электроснабжения резкопеременных и вентильных нагрузок расчёт средств КРМ должен осуществляться на основании графиков потребляемой активной и реактивной мощностей, которые могут быть построены расчётным путём на стадии проектирования или по результатам замеров непосредственно на действующих объектах.

Выбор типа и мощности компенсирующих устройств [8]. В отдельных случаях, когда от источников реактивной мощности не требуется большого быстродействия, можно использовать специальные синхронные машины (ССК).

Для специального быстродействующего синхронного компенсатора условие оптимального регулирования реактивной мощности имеет вид:

$$Q_{ССК} \approx Q_- \cdot K_- + Q_{ср} \cdot K_{ср}, \quad (8.48)$$

где $Q_- = \sqrt{Q_{эф}^2 - Q_{ср}^2}$ – переменная составляющая реактивной мощности нагрузки;

$Q_{эф} = \sqrt{1/T \int_0^T Q^2(t) dt}$ – эффективное значение потребляемой реактивной мощности;

$Q_{ср} = 1/T \int_0^T Q(t) dt$ – среднее значение реактивной мощности нагрузки за время цикла T ;

$K_- \geq (\delta Q - \delta Q_{доп}) / \delta Q = 1 - \delta U_{t, доп} \cdot S_K / 100 \delta Q_{экс}$ – доля компенсации реактивной составляющей потребляемой реактивной мощности;

$\delta Q = Q_{max} - Q_{min}$ – максимальный размах колебаний;

$\delta U_{t, доп}$ – допустимое значение размаха колебаний напряжения;

$\delta Q_{экс} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta Q_i^2 / n}$ – значение эквивалентного размаха колебаний потребляемой реактивной мощности;

$K_{ср} = 1 - tg \varphi_{доп} / tg \varphi_{ср}$ – доля компенсации постоянной составляющей (средней) реактивной мощности;

$tg \varphi_{доп}; tg \varphi_{ср}; Q_{доп}; Q_{ср}$ – соответственно допустимое и среднее значение коэффициента реактивной мощности резкопеременной нагрузки.

Для определения среднего и эффективного значений реактивной мощности рекомендуется исходный график нагрузки, например ДСП, представить в виде отрезков по методу трапеций, где начальные и конечные координаты соответственно обозначают Q_{li} и Q_{2i} . При общем количестве отрезков n формулы для вычисления имеют вид:

$$Q_{ср} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \frac{Q_{li} + Q_{2i}}{2} \cdot t_i; \quad (8.49)$$

$$Q_{эф} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \frac{(Q_{li}^2 + Q_{2i}^2 + Q_{li} + Q_{2i})}{3} \cdot t_i}, \quad (8.50)$$

где t_i – длительность i -го участка графика.

Искомая реактивная мощность ССК равна

$$Q_{ССК} = \sqrt{(Q_- \cdot K_-)^2 + (Q_{ср} \cdot K_{ср})^2}, \quad (8.51)$$

При выборе средств КРМ в узле сети с резкопеременными нагрузками рекомендуется предусматривать быстродействующие источники реактивной мощности (статические компенсаторы СТК), основанные на принципе прямой и косвенной компенсации.

При использовании принципа прямой компенсации ступенчатым подключением к сети конденсаторов фильтров с тиристорными ключами мощность КУ для компенсации переменной составляющей реактивной мощности нагрузки определяют по формуле:

$$Q_{КУ} \geq \delta Q_{экс} \cdot K_-, \quad (8.52)$$

Значение реактивной мощности каждой ступени определяют из условия

$$Q_{ст} \leq \delta U_{t, доп} \cdot S_K / 100. \quad (8.53)$$

При использовании принципа косвенной компенсации по схеме с управляемыми тиристорами мощность группы равна;

$$Q_{тир} \geq \delta Q_{экс} \cdot K_-. \quad (8.54)$$

Мощность, генерируемая нерегулируемой частью БК (фильтра), равна

$$Q_{БК} \geq (Q_{ср} + Q_{тир}) \cdot K_{ср}. \quad (8.55)$$

Параметры СТК косвенной компенсации для ДСП при отсутствии графиков потребляемой реактивной мощности рекомендуется определять:

- для группы одинаковых ДСП

$$\begin{aligned} Q_{тир} &\geq S_{ПТ} \sqrt[4]{N} - \delta U_{t, доп} \cdot S_K / 100; \\ Q_{БК} &\geq (S_{ПТ} \sqrt[4]{N} - \delta U_{t, доп} \cdot S_K / 200) \cdot K_{ср}. \end{aligned} \quad (8.56)$$

- для группы печей разной мощности:

$$\begin{aligned} Q_{тир} &\geq S_{ПТ, max} \sqrt[4]{\sum_{i=1}^m S_{ПТ, i} / S_{ПТ, max}} - \delta U_{t, доп} \cdot S_K / 100; \\ Q_{БК} &\geq \left(S_{ПТ, max} \sqrt[4]{\sum_{i=1}^m S_{ПТ, i} / S_{ПТ, max}} - \delta U_{t, доп} \cdot S_K / 100 \right) \cdot K_{ср}. \end{aligned} \quad (8.57)$$

Пример 8.5. Выбрать КУ для схемы с двумя ДСП. Исходные данные указаны на рис 8.8. Шинами общего назначения являются шины 220 кВ, $\delta U_{t, доп} = 1\%$.

Решение.

1. Колебания напряжения на шинах 220 кВ равны

$$\delta U_{t, экс} = S_{ПТ} \sqrt[4]{N} / S_K = 60 \sqrt[4]{2} / 4000 = 0,18 = 18\%,$$

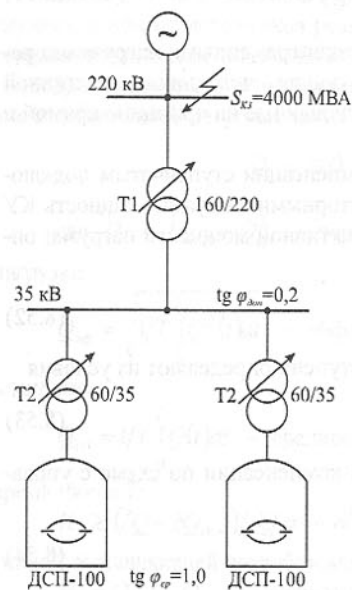


Рисунок 8.8 — Расчетная схема к примеру 8.5.

Вопросы для самопроверки

- 1 Как характеризуются ЭТУ с точки зрения потребления реактивной мощности?
- 2 Как выбрать необходимую мощность конденсаторных батарей для поперечной компенсации реактивной мощности?
- 3 Дать анализ различным схемам подключения конденсаторных батарей при поперечной компенсации.
- 4 Как выбрать необходимую мощность конденсаторных батарей для продольной компенсации реактивной мощности?
- 5 Дать анализ различным схемам подключения конденсаторных батарей при продольной компенсации.
- 6 Как выбираются и рассчитываются параметры силовых резонансных фильтров?
- 7 Как рассчитать параметры филтросимметрирующего устройства?
- 8 Как рассчитать мощность компенсирующих устройств в электрических сетях с резкопеременными нагрузками?

Приложение А

Технические данные трансформаторов, шинопроводов и кабелей.

Таблица П.А1 — Сопротивления понижающих трансформаторов с вторичным напряжением 0,4 кВ

| Номинальная мощность, кВА | Схемы соотношения обмоток | U _k , % | Значение сопротивлений, мОм | | |
|---------------------------|---------------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| | | | прямой последовательности | | |
| | | | Г _{ГТ} | X _{ГТ} | Z _{ГТ} |
| 25 | Y/Y _H | 4,5 | 154 | 244 | 287 |
| 40 | Y/Y _H | 4,5 | 88 | 157 | 180 |
| 63 | Y/Y _H | 4,5 | 52 | 102 | 114 |
| 100 | Y/Y _H | 4,5 | 31,5 | 65 | 72 |
| 160 | Y/Y _H | 4,5 | 16,6 | 41,7 | 45 |
| 250 | Y/Y _H | 4,5 | 9,4 | 27,2 | 28,7 |
| 400 | Y/Y _H | 4,5 | 5,5 | 17,1 | 18 |
| 630 | Y/Y _H | 5,5 | 3,1 | 13,6 | 14 |
| 1000 | Y/Y _H | 5,5 | 1,7 | 8,6 | 8,8 |
| 1600 | Y/Y _H | 5,5 | 1 | 5,4 | 5,5 |
| 2500 | Y/Y _H | 5,5 | 0,64 | 3,46 | 3,52 |

Примечания: 1. Указанные в таблице значения сопротивления масляных трансформаторов приведены к напряжению 0,4 кВ.

2. Для трансформаторов с вторичным напряжением 0,23 кВ данные таблицы следует уменьшить в 3 раза, а для трансформаторов со вторичным напряжением 0,69 кВ — увеличить в 3 раза.

Таблица П.А2 — Технические данные шинопроводов переменного тока напряжением до 1000 В

| жением до 1000 В | | | | | | |
|--------------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------------|------------------|---------------|------------------|
| Тип шинопровода | Номиналь- ный ток, А | Номиналь- ное напря- жение, В | Сопротивление, Ом/км | | | |
| | | | фазного | | нулевого | |
| | | | актив- ное | индук- тивное | актив- ное | индук- тивное |
| <i>Магистральные:</i> | | | | | | |
| ШМА-73 | 1600 | 660 | 0,031 | 0,017 | 0,072 | 0,098 |
| ШМА-68 | 2500 | 660 | 0,027 | 0,023 | 0,26 | 0,45 |
| | 4000 | 660 | 0,013 | 0,02 | 0,07 | 0,046 |
| ШЗМ-16 | 1600 | 660 | 0,017 | 0,02 | - | - |
| | | | | | | |
| <i>Распределительный</i> | | | | | | |
| ШРА-73 | 250 | 380/220 | 0,20 | 0,10 | 0,18 | 0,15 |
| | 400 | 380/220 | 0,13 | 0,10 | 0,17 | 0,13 |
| | 630 | 380/220 | 0,085 | 0,075 | 0,1 | 0,129 |

Таблица П.А3 – Значение сопротивления кабелей

| Сечение жилы | Активное сопротивление при 20 °С жилы, мОм/м | | Индуктивное сопротивление, мОм/м | |
|--------------|---|--------|-------------------------------------|--------|
| | алюминиевой | медной | алюминиевой | медной |
| 1,0 | - | 18,5 | - | 0,133 |
| 1,5 | - | 12,3 | - | 0,126 |
| 2,5 | 12,5 | 7,4 | 0,104 | 0,116 |
| 4,0 | 7,81 | 4,63 | 0,095 | 0,107 |
| 6,0 | 5,21 | 3,09 | 0,090 | 0,10 |
| 10,0 | 3,12 | 1,84 | 0,073 | 0,099 |
| 16,0 | 1,95 | 1,16 | 0,0675 | 0,095 |
| 25,0 | 1,25 | 0,74 | 0,0662 | 0,091 |
| 35,0 | 0,894 | 0,53 | 0,0637 | 0,088 |
| 50,0 | 0,625 | 0,37 | 0,0625 | 0,085 |
| 70,0 | 0,447 | 0,265 | 0,0612 | 0,082 |
| 95,0 | 0,329 | 0,195 | 0,0602 | 0,081 |
| 120,0 | 0,261 | 0,154 | 0,0602 | 0,080 |
| 150,0 | 0,208 | 0,124 | 0,0596 | 0,079 |
| 185,0 | 0,169 | 0,1 | 0,0596 | 0,078 |
| 240,0 | 0,130 | 0,077 | 0,0587 | 0,077 |

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК:

1. Борисов Б.П., Вагин В.Я. Электроснабжение электротехнических установок. – Киев: Наук. думка, 1985. – 248 с.
2. Волобрийский С.Д., Каялов Г.М., Клейн П.Н., Мешаль Б.С. Электрические нагрузки промышленных предприятий. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1971. – 264с.
3. Гордеев В.И. Регулирование максимума нагрузки промышленных электрических сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 184с.
4. ГОСТ 13109-97. Международный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. в Украине с 01.01.2000. – 32с.
5. Данцис Я.Б., Жилов Г.М. Емкостная компенсация реактивных нагрузок мощных электроприемников промышленных предприятий. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980. – 176с.
6. Жежеленко И.В., Рабинович М.Л., Божко В.М. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. – Киев: Техніка, 1981. – 160с.
7. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261с.
8. Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336с.
9. Кузнецов В.Г., Куренный Э.Г., Лютый А.П. Электромагнитная совместимость. Несимметрия и несинусоидальность напряжения. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 250с.
10. Минесев Р.В., Михеев А.П., Рыжнев Ю.Л. Повышение эффективности электроснабжения электропечей. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208с.
11. Миронов Ю.М., Миронова А.Н. Электрооборудование и электроснабжение электротермических, плазменных и лучевых установок: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 376с.
12. Правила устройства электроустановок. – 6-е. изд. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 648с.
13. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий: Проектирование и расчет/А.С. Овчаренко, М.Л. Рабинович, В.И. Мозырский, Д.И. Розинский. – К.: Техніка, 1985. – 279с.

6,00

Составитель: Муха Валентин Павлович

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ

УСТАНОВОК

(КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ)

Подписано к печати 01.03.2007 г. Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 9,5. Печать лазерная. Заказ № 779. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии ООО «Цифровая типография».

Адрес: г.Донецк, ул. Р.Люксембург, 60в. Телефон: (062) 381-15-22