

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**Н.Г. Волков**

# **КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Учебное пособие

Издательство  
Томского политехнического университета  
2010

УДК 621.31.031(075.8)

ББК 31.29-5я73

В67

**Волков Н.Г.**

В67

Качество электроэнергии в системах электроснабжения: учебное пособие / Н.Г. Волков; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 152 с.

В пособии рассматриваются вопросы качества электроэнергии (КЭ) в системах электроснабжения, изучаемые в курсах «Качество электроснабжения городских объектов» и «Электромагнитная совместимость силового электрооборудования»; анализируются основные причины и источники помех, ухудшающие показатели КЭ и приводящие к нарушению нормального функционирования систем электроснабжения; приводятся примеры последствий эксплуатации электроприемников с отклонениями показателей КЭ от нормативных; даются сведения по улучшению показателей качества электроэнергии до уровня электромагнитной совместимости работы объектов электроснабжения.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности 140211 «Электроснабжение».

УДК 621.31.031(075.8)

ББК 31.29-5я73

*Рецензенты*

Кандидат технических наук  
заместитель директора по научной работе  
НИИ автоматики и электромеханики, г. Томск  
*И.В. Целебровский*

Кандидат технических наук,  
доцент кафедры электротехники и автоматики ТГАСУ  
*Э.С. Астапенко*

© ГОУ ВПО «Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет», 2010

© Волков Н.Г., 2010

© Обложка. Издательство Томского  
политехнического университета, 2010

## ВВЕДЕНИЕ

Электроэнергия, как особый вид продукции, обладает определенными характеристиками, которые позволяют судить о ее пригодности в различных производственных процессах.

Совокупности характеристик, при которых приемники электроэнергии способны выполнять заложенные в них функции, объединены общим понятием качества электроэнергии (КЭ). Качество электроэнергии оценивается по технико-экономическим показателям, которые учитывают *технологический* (брак и ухудшение качества продукции, снижение производительности труда и механизмов, расстройство технологического процесса) и *электромагнитный* (увеличение потерь электроэнергии, повреждение электрооборудования, нарушение работы автоматики, телемеханики, связи) *ущерб*, причиненный народному хозяйству.

Стремление повысить производительность труда на современных промышленных предприятиях, а также усложнение технологических процессов обусловили широкое применение мощных регулируемых вентильных приводов и преобразовательных установок, мощных дуговых печей и сварочных установок. Характерной особенностью работы таких потребителей является существенное влияние их на качество электроэнергии питающих сетей. В свою очередь нормальная работа электрооборудования зависит от качества электроэнергии питающей системы.

Качество электроэнергии, наряду с надежностью, безопасностью и экономичностью, является одним из обязательных требований, предъявляемых к системам электроснабжения. Качество электроэнергии характеризуется совокупностью свойств и показателей качества энергии (ПКЭ), которые нормируются ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». Нормы КЭ, устанавливаемые данным стандартом, являются уровнями электромагнитной совместимости систем электроснабжения предприятий, электрооборудования и питающих электрических сетей. Под электромагнитной совместимостью понимается способность приборов, устройств автоматики и телемеханики, электрооборудования электрических сетей нормально функционировать в условиях воздействия на них электрических и электромагнитных полей и не создавать недопустимые помехи другим объектам.

Кроме требований электромагнитной совместимости в связи с выходом Постановления Правительства Российской Федерации № 1013 от 14.08.1997 г. о включении электрической энергии в перечень товаров, подлежащих обязательной сертификации, КЭ должно соблюдаться также с точки зрения Закона РФ «О защите прав потребителей».

Для обеспечения надлежащих технико-экономических показателей функционирования систем электроснабжения, необходимо ПКЭ поддерживать на уровне требований ГОСТ 13109-97, основные из которых представлены в табл. В.1

**Т а б л и ц а В.1**  
**Показатели качества энергии и их нормативы по ГОСТ 13109-97**

№ п/п	Наименование ПКЭ и его обозначение	Допустимые значения	
		нормальные	предельные
1	Установившееся отклонение напряжения $\delta U_y$ (%)	$\pm 5$	$\pm 10$
2	Размах изменения напряжения $\delta U_t$ (%)	–	кривые 1,2 на рис. 1
3	Доза фликера: – кратковременная $P_{st}$ (о.е.) – длительная $P_{lt}$ (о.е.)	– –	1,38; 1,0 1,0; 0,74
4	Коэффициент искажения синусоидальности напряжения $K_u$ (%)	по табл. 1	по табл. 1
5	Коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения $K_u(n)$ (%)	по табл. 2	по табл. 2
6	Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности $K_{2u}$ (%)	2	4
7	Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности $K_{0u}$ (%)	2	4
8	Отклонение частоты $\Delta f$ (Гц)	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$
9	Длительность провала напряжения $\Delta t_p$ (с)	–	30
10	Импульсное напряжение $U_{имп}$ (кВ)	–	–
11	Коэффициент временного перенапряжения $K_{пер.и}$ (о.е.)	–	–

Государственный стандарт не устанавливает нормы качества электроэнергии у приемников в аварийных режимах и в случае присоединения приемников к сетям не общего назначения (сеть передвижных или стационарных маломощных установок).

Для поддержания ПКЭ в заданных пределах необходимо регулярно контролировать КЭ для целей анализа и проведения мероприятий по улучшению ПКЭ. Задачами контроля КЭ является следующее:

- проверка соответствия ПКЭ требованиям ГОСТ 13109-97;
- выяснения причин несоответствия ПКЭ;
- определение ущерба от несоблюдения требований к КЭ;
- выявление виновных в нарушении требований к отдельным ПКЭ и предъявление к ним экономических штрафных санкций.

Согласно ГОСТ 13109-97 при контроле ПКЭ устанавливаются следующие основные правила:

- длительность контроля большинства ПКЭ – не менее суток;
- установлены два вида норм ПКЭ: нормально допустимые и предельно допустимые;
- ПКЭ считается соответствующим требованиям ГОСТ, если его усредненные (интегрированные) оценки не выходят за предельно допустимые нормы и в течение не менее 95 % времени каждых суток значения ПКЭ не выходят за пределы нормально допустимых значений.

В настоящем пособии рассматриваются основные показатели качества электроэнергии, отклонения от нормативных требований и влияние их на производственно-технологический процесс, на работу различных видов электроприемников и питающую сеть. Рассматриваются также причины, приводящие к ухудшению качества электроэнергии, методы и средства, позволяющие поддерживать ПКЭ в заданных пределах.

Пособие не претендует на полноту изложения всех вопросов, поэтому по тексту приводятся ссылки на литературу, по которой можно расширить знания по интересующим разделам.

# 1. ОТКЛОНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

## 1.1. Понятие и сущность вопроса

Одним из важнейших показателей качества электроэнергии является действующее значение напряжения – фазного или линейного в зависимости от схемы включения потребителей.

В пределах одной ступени трансформации значение напряжения сети изменяется в относительно небольших пределах, поэтому, с целью упрощения расчетов и достижения большей наглядности, на практике пользуются понятием отклонения напряжения.

Под отклонением напряжения  $\delta U$  понимают разность между действительным  $U$  и номинальным  $U_{\text{ном}}$  значениями напряжения для данной сети:

$$\left. \begin{aligned} \delta U &= U - U_{\text{ном}} \text{ (В, кВ);} \\ \delta U &= \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100 \%. \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

Действительное значение напряжения в электрических сетях однофазного тока определяют как действующее значение напряжения основной частоты  $U_{(1)}$  без учета гармонических составляющих, в сетях трехфазного тока – как действующее значение напряжения прямой последовательности основной частоты  $U_{1(1)}$ .

Согласно ГОСТу 13109-97 в условиях нормальной работы приемников электроэнергии отклонения напряжения от номинального значения допускаются в следующих пределах:

- -5 ... +10 % на зажимах электродвигателей и аппаратов для их пуска и управления;
- -2,5 ... +5 % на зажимах приборов рабочего освещения, установленных в производственных помещениях и общественных зданиях, где требуется значительное зрительное напряжение, а также в прожекторных установках наружного освещения;
- на зажимах остальных приемников электроэнергии допускается отклонение напряжения в пределах  $\pm 5$  % номинального.

В послеаварийных режимах допускается дополнительное понижение напряжения на 5 %.

Для выполнения отмеченных требований необходима, прежде всего, организация контроля и измерений отклонения напряжений, расчет и определение его показателей и проведение мероприятий по их стабилизации. Эти вопросы подробно рассмотрены в [1,2]. Там же рас-

смотрены и другие показатели КЭ. Для уяснения сути появления отклонения напряжения рассмотрим векторную диаграмму токов и напряжений простейшей электрической сети с сопротивлением  $Z = R + jx$ . Такая диаграмма приведена на рис. 1.1.

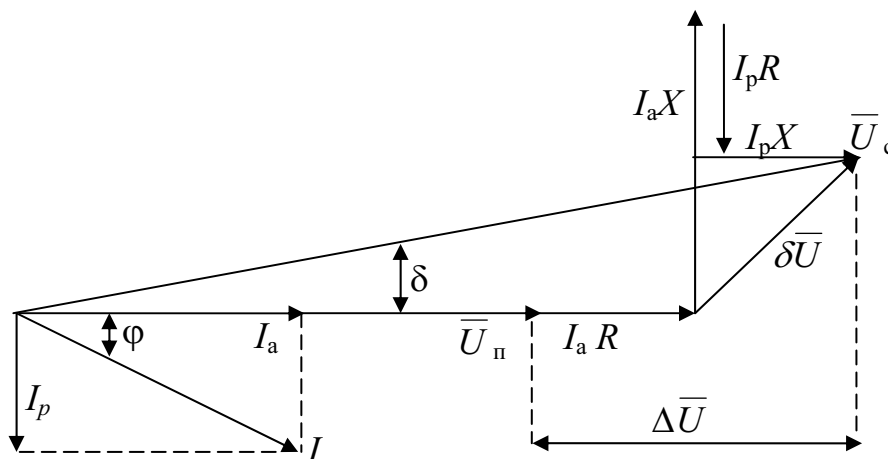


Рис. 1.1. Векторная диаграмма напряжения для простейшей электрической сети

Уравнения состояния данной сети будут иметь следующий вид [3]:

$$\bar{U}_c = \bar{U}_{II} + \delta\bar{U}; \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} \delta\bar{U} &= IZ = (I_a - jI_p)(R + jx) = \\ &= I_a R + I_p X - j(I_a X - I_p R) = \Delta\bar{U} - j\Delta\bar{U}, \end{aligned} \quad (1.3)$$

где  $\bar{U}_c$  – вектор напряжения питающей сети;  $\bar{U}_{II}$  – вектор напряжения на зажимах потребителя;  $\delta\bar{U}$  – падение напряжения в линии с сопротивлением  $Z = R + jx$ ;  $\Delta\bar{U}$ ,  $j\Delta\bar{U}$  – продольная и поперечная составляющие падения напряжения соответственно.

Поперечная составляющая падения напряжения при активно-индуктивной нагрузке мала, незначительны углы  $\delta$  между напряжением в узлах системы электроснабжения (на практике суммарный угол между напряжениями различных ступеней трансформации не превышает  $10^\circ$ ), поэтому для практических расчетов отклонений и колебаний напряжений промышленных сетей можно считать разницу между падением и потерей напряжения несущественной и потерю напряжения определять по формуле

$$\Delta U = I_a R + I_p X \approx |\delta\bar{U}|. \quad (1.4)$$

Учитывая, что в промышленных электрических сетях  $R/X = 0,03 \dots 0,1$ , выражение (1.4) можно записать в относительных единицах в следующем виде:

$$\Delta U_{\text{о.е.}} = \frac{\Delta U}{U_{\text{н}}} = \frac{I_{\text{а}}R + I_{\text{р}}X}{U_{\text{н}}} = \frac{PR + QX}{\sqrt{3}U_{\text{н}}^2} = \frac{P\frac{R}{X} + Q}{\sqrt{3}U_{\text{н}}\frac{U_{\text{н}}}{X}} \approx \frac{Q}{S_{\text{к}}}, \quad (1.5)$$

где  $S_{\text{к}}$  – мощность короткого замыкания;  $P$  – активная мощность на рассматриваемом участке;  $Q$  – реактивная мощность на рассматриваемом участке.

Из формулы (1.5) видно, что в наибольшей степени режим напряжения в электрических сетях определяется режимом реактивной мощности.

Для многоуровневых электрических сетей получаются аналогичные результаты. В этом можно убедиться на примере расчета отклонений напряжения в двух уровневой системе электроснабжения [4].

Важным моментом при определении параметров отклонения напряжения является построение гистограммы отклонений напряжения, которая считывается со специализированных приборов, либо строится по статистическим данным наблюдений. Гистограмма показывает вероятность попадания значения ПКЭ в интервал возможных изменений значений показателя за период его измерения. По данным гистограммы вычисляют вероятные числовые характеристики ПКЭ: математическое ожидание, дисперсию, среднеквадратическое отклонение. Знание этих параметров необходимо для проведения мероприятий по улучшению качества напряжения.

Графическое изображение гистограммы установившегося отклонения напряжения может иметь вид, представленный на рис. 1.2.

Математическое ожидание установившегося отклонения напряжения  $M(\delta U_y)$  характеризует средний уровень напряжения в рассматриваемом пункте электрической сети за контролируемый промежуток времени. Оно может быть определено из гистограммы по формуле

$$M(\delta U_y) = \sum_{i=1}^k \delta \bar{U}_{yi} \cdot P_i(\%), \quad (1.6)$$

где  $k$  – число разрядов гистограммы;  $\delta \bar{U}_{yi}$  – значение середины  $i$ -го интервала;  $P_i$  – вероятность попадания отклонения напряжения в  $i$ -й интервал.



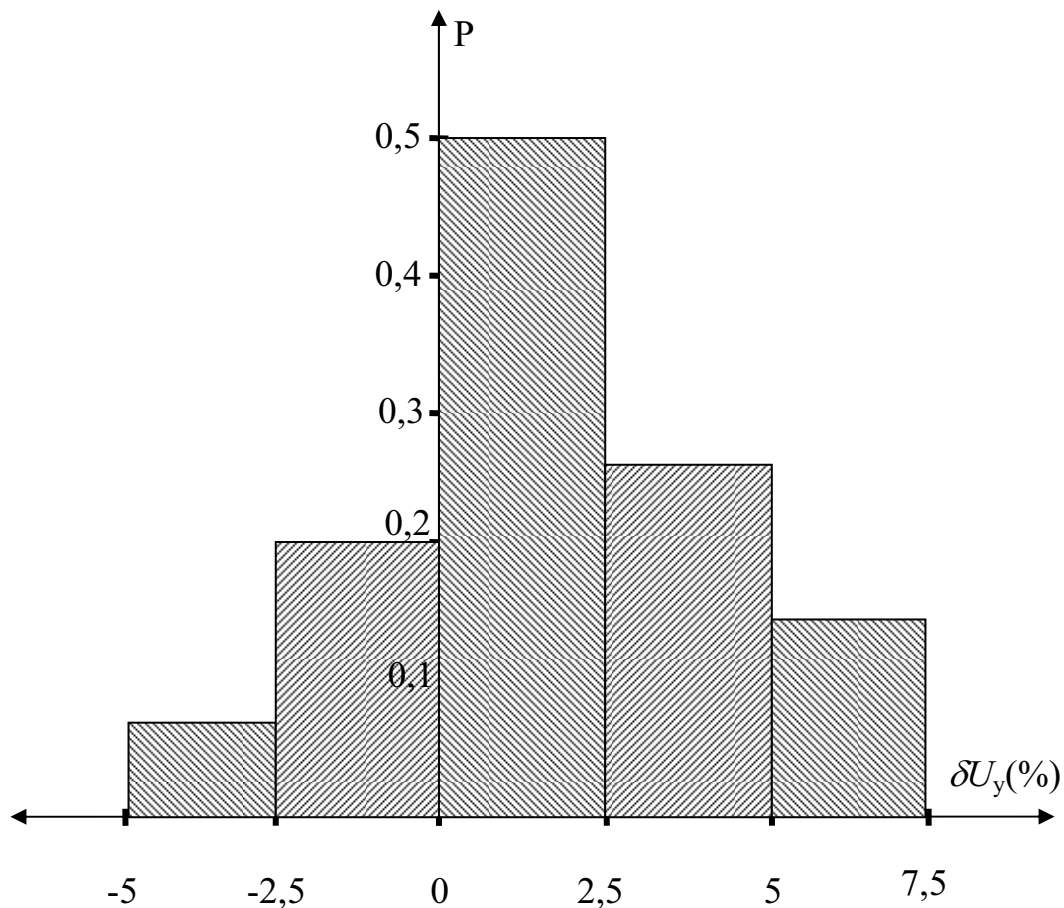


Рис. 1.2. Примерная гистограмма отклонений напряжения

Рассеяние отклонения напряжения относительно математического ожидания характеризуется дисперсией. Она равна математическому ожиданию квадрата отклонений случайной величины от ее среднего значения. По гистограмме дисперсия определяется по формуле

$$\begin{aligned}
 D(\delta U_y) &= \sigma^2(\delta U_y) = \sum_{i=1}^k [(\delta \bar{U}_{yi})^2 \cdot P_i] - [M(\delta U_y)]^2 = \\
 &= \sum_{i=1}^k [\delta \bar{U}_{yi} - M(\delta U_y)]^2 P_i \%,
 \end{aligned}
 \tag{1.7}$$

где  $\sigma(\delta U_y)$  – среднеквадратическое или стандартное отклонение.

Пример расчета указанных параметров по рассмотренной методике применительно приведенной гистограмме можно посмотреть в [1].

## 1.2. Влияние отклонений напряжения на работу электропотребителей и технологический процесс производства

Основными факторами, вызывающими отклонения напряжения в системах электроснабжения, являются изменения режимов работы приемников электроэнергии и источников питания, нерациональное подключение однофазных и ударных нагрузок к элементам системы электроснабжения.

Отклонение ПКЭ от нормативных или оптимальных значений проявляется в виде экономического ущерба у потребителей электрической энергии, который имеет электромагнитную и технологическую составляющие. Электромагнитная составляющая определяется в основном дополнительными потерями активной мощности и энергии и сокращением срока службы электрооборудования ввиду ускоренного старения изоляции. Технологическая составляющая ущерба связана с увеличением длительности производственного процесса, со снижением производительности электрооборудования, что приводит к увеличению удельного расхода электроэнергии на единицу производственной продукции.

Анализ зависимости энергетических характеристик системы электроснабжения целесообразно проводить путем изучения влияния качества напряжения на основные типы электроприемников: электродвигатели, осветительные и технологические установки.

Рассмотрим работу характерных приемников электроэнергии при различных отклонениях КЭ.

**Асинхронные двигатели.** Подавляющее большинство двигателей на промышленных предприятиях составляют асинхронные двигатели. Как показывают исследования [5] отклонения напряжения существенно влияют на энергетические показатели работы двигателей. К примеру, на рис. 1.3 показаны зависимости дополнительных потерь активной мощности  $\delta(\Delta P_H)$  и реактивной мощности  $\delta(\Delta Q_H)$  по отношению к номинальным ( $\Delta P_H, \Delta Q_H$ ) в зависимости от отклонений напряжения.

Как видно из иллюстраций изменение активных потерь в асинхронных двигателях при отклонениях напряжения в пределах  $\pm 10\% U_H$  относительно невелики (не более  $0,03 \Delta P_H$ ), однако они оказываются того же порядка, что и потери в питающих сетях.

На практике считают, что для электродвигателей серии А мощностью 20...100 кВт при допустимых пределах отклонений напряжения изменение напряжения на 1 % влечет за собой изменение потребляемой реактивной мощности на 3 %.

Изменение энергетических характеристик асинхронного двигателя, в зависимости от отклонений величины и частоты питающего напряже-

ния относительно номинальных значений, удобно анализировать по схеме замещения, представленной на рис. 1.4. Изменение напряжения питающей сети  $U$  вызывает соответствующее изменение намагничивающего тока [6]

$$I_0 = \frac{\dot{U}_1 - (\eta_1 + jx_1) \dot{I}_1}{r_0 + jx_0} \quad (1.8)$$

и соответственно изменение магнитного потока машины  $\Phi$ .

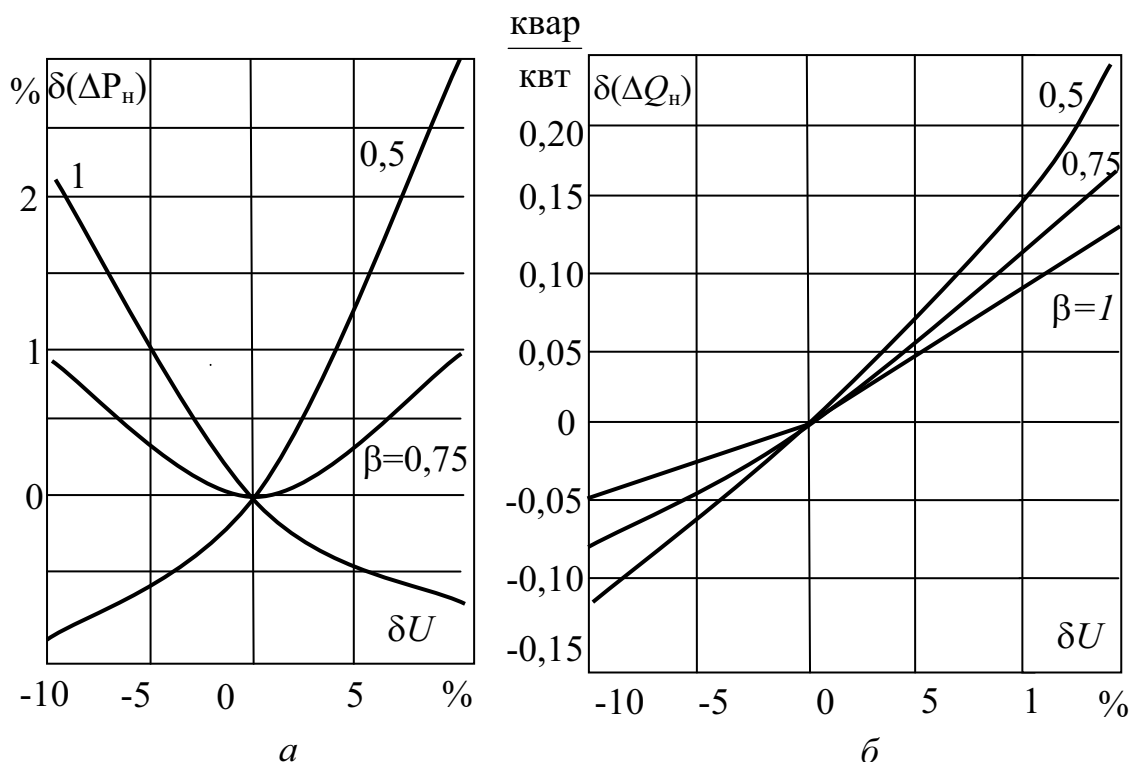


Рис. 1.3. Изменения потерь мощности в зависимости от отклонений напряжения при различных коэффициентах загрузки  $\beta$ : а – активной мощности; б – реактивной мощности

Пренебрегая потерей напряжения в сопротивлениях статорной обмотки при малых скольжениях  $S < S_{кр}$ , можно приближенно считать, что относительные изменения магнитного потока машины связаны с относительными изменениями напряжения и частоты соотношениями [7]:

$$\frac{\Phi}{\Phi_{\text{НОМ}}} = \frac{U}{U_{\text{НОМ}}} = K_u, \quad (1.9)$$

$$\frac{\Phi}{\Phi_{\text{НОМ}}} = \frac{f_{\text{НОМ}}}{f} = K_f,$$

где  $U_{\text{НОМ}}$ ,  $f_{\text{НОМ}}$  – номинальные значения напряжения и частоты;  $K_u, K_f$  – относительные значения напряжения и частоты.

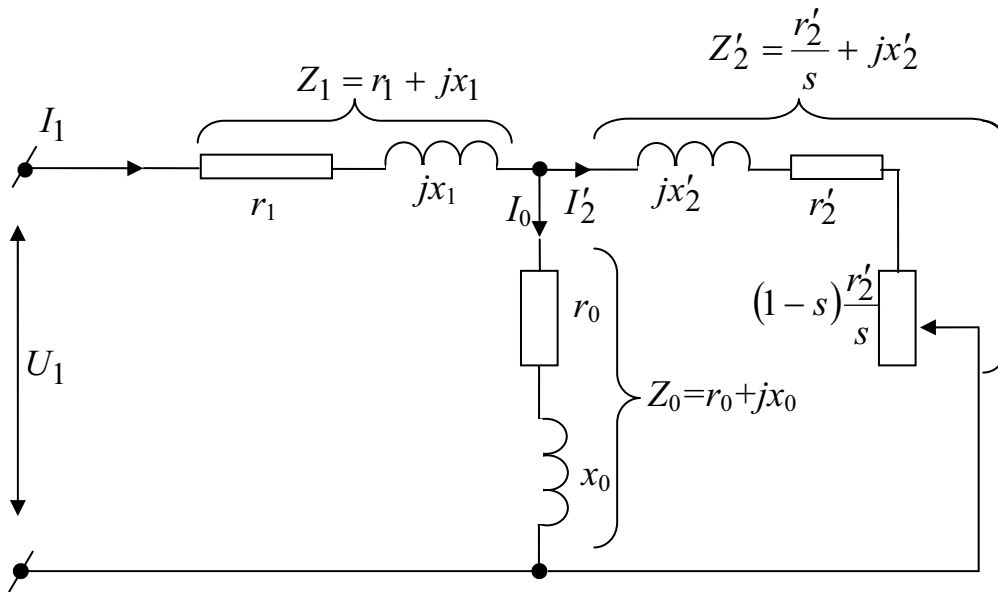


Рис. 1.4. Схема замещения асинхронной машины

Относительная величина вращающего момента при номинальной частоте ( $K_f = 1$ ) в зависимости от питающего напряжения определится как

$$M = \frac{2 \vartheta_{\text{НОМ}} \left( \frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2}{\frac{S_{\text{кр}}}{S} + \frac{S}{S_{\text{кр}}}}, \quad (1.10)$$

где  $\vartheta_{\text{НОМ}} = \frac{(M_{\text{max}})_{\text{НОМ}}}{M_{\text{НОМ}}}$ ,  $(M_{\text{max}})_{\text{НОМ}}$ ,  $M_{\text{НОМ}}$  – максимальное номинальное и номинальное значения вращающего момента;  $S_{\text{кр}}$  – критическое сколь-

жение, при котором двигатель развивает максимальный вращающий момент ( $S_{кр} = 5...15 \%$ ). Следовательно, при изменении напряжения  $U$  механическая характеристика двигателя изменится, что, при сохранении характеристики нагрузки  $M_c = \text{const}$ , приводит к изменению скольжения примерно обратно пропорционально квадрату напряжения [6]

$$\frac{S}{S_{НОМ}} \approx \frac{M_c U_{НОМ}^2}{M_{НОМ} U^2}, \quad (1.11)$$

при допущениях, что  $S_{НОМ} \approx \frac{S_{кр}}{2\beta_{НОМ}}$ ,  $\beta_{НОМ} > 1,6$ .

Графические зависимости скольжения от напряжения, при номинальной частоте и различных значениях  $\beta_{НОМ}$ , показаны на рис. 1.5 [6].

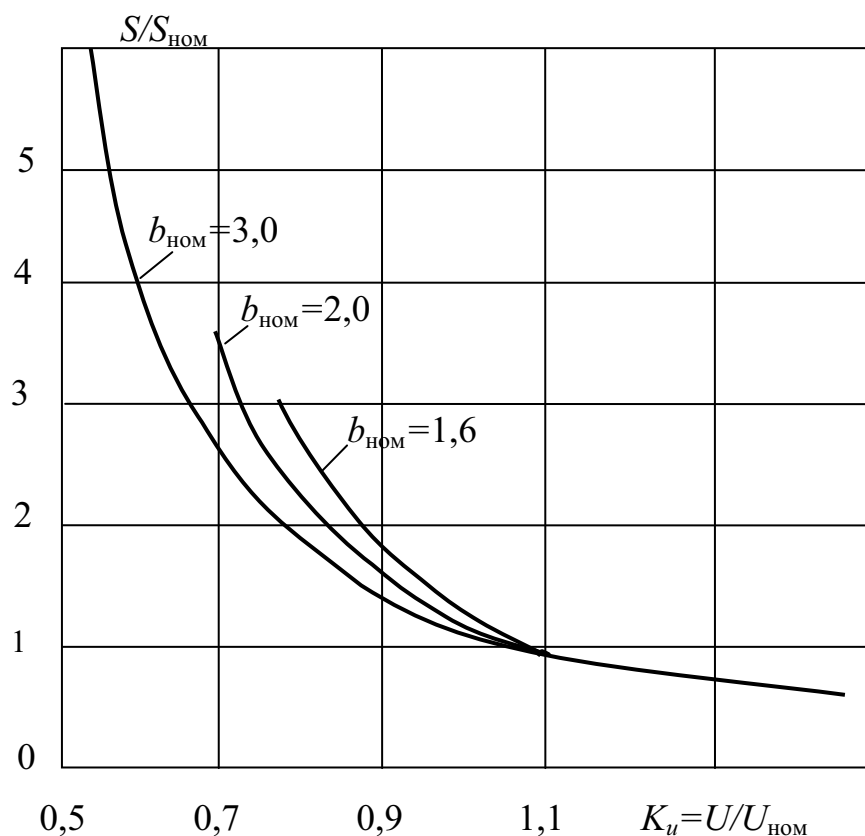


Рис. 1.5. Изменение скольжения в зависимости от напряжения

Вращающий момент асинхронного двигателя связан с величиной скольжения при различных значениях питающего напряжения графической зависимостью, показанной на рис. 1.6.

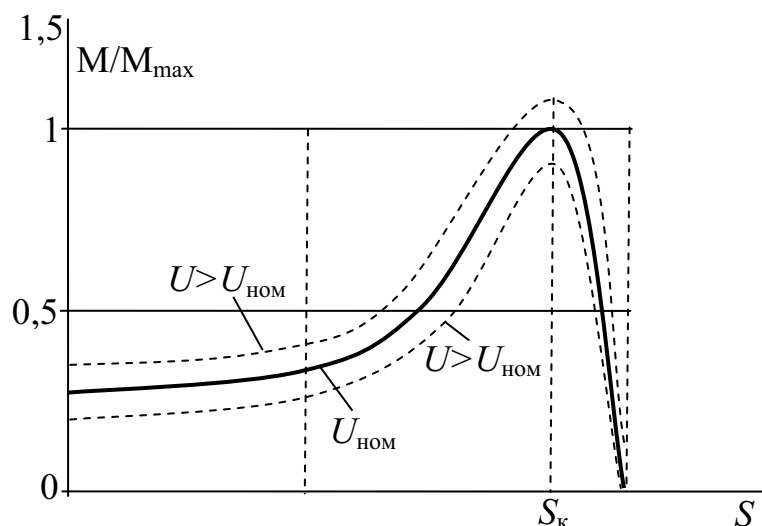


Рис. 1.6. Моментные характеристики асинхронного двигателя при различных питающих напряжениях

Ток ротора при отклонениях напряжения изменяется обратно пропорционально напряжению

$$I_2' \approx \frac{M_c I_{2\text{НОМ}}' U_{\text{НОМ}}}{M_{\text{НОМ}} U}. \quad (1.12)$$

Ток статора асинхронного двигателя без учета активных потерь холостого хода ( $\sin \varphi_0 = 1,0$ ) определяется геометрической суммой активной и реактивной составляющих

$$I_1 = \sqrt{(I_o + I_2' \sin \varphi')^2 + (I_2' \cos \varphi')^2}, \quad (1.13)$$

где  $\cos \varphi' = \sqrt{\frac{\mathfrak{e}_c + \sqrt{\mathfrak{e}_c^2 - 1}}{2 \mathfrak{e}_c}}, \quad \sin \varphi' = \frac{1}{2bc(bc + \sqrt{bc^2 - 1})},$

$$\mathfrak{e}_c = \mathfrak{e}_{\text{НОМ}} \frac{M_{\text{НОМ}}}{M_c} \left( \frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2.$$

Изменение тока статора двигателя, в зависимости от напряжения при номинальных значениях частоты и нагрузки ( $K_f = 1, M_c = M_{\text{НОМ}}$ ) и  $\mathfrak{e}_{\text{НОМ}} = 2$ , показано на рис. 1.7 [6].

Фаза тока статора приблизительно может быть определена как [6]

$$\varphi = \arctg \frac{I_0 + I_2' \sin \varphi'}{I_2' \cos \varphi'} \quad (1.14)$$

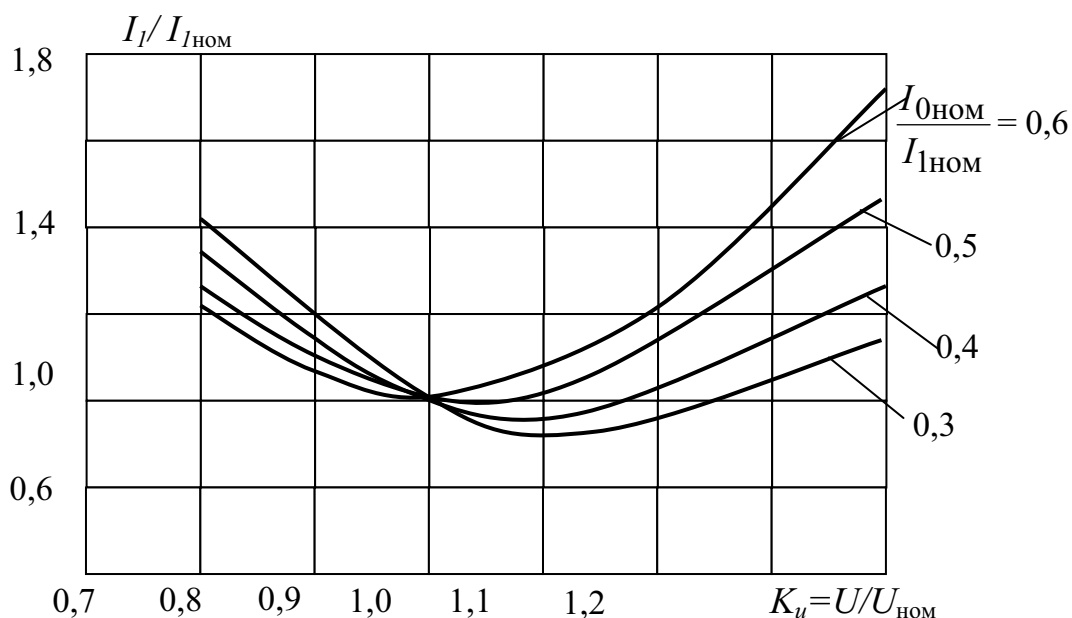


Рис. 1.7. Изменение тока статора двигателя в зависимости от напряжения для различных кратностей тока холостого хода

Таким образом, при уменьшении напряжения намагничивающий ток уменьшается, а ток статора, равный геометрической сумме приведенного тока ротора и тока холостого хода, в зависимости от загрузки асинхронного двигателя и соотношения между  $I_2$  и  $I_0$ , может увеличиваться или уменьшаться. Ток ротора увеличивается всегда.

Работа с пониженным напряжением более, чем на 5 % номинального допустима только при условии недогрузки двигателя. В противном случае возможен перегрев обмотки ротора.

При увеличении напряжения, увеличивается магнитный поток, а скольжение и ток ротора уменьшаются. Намагничивающий ток увеличивается, а ток статора может увеличиться или уменьшиться в зависимости от загрузки асинхронного двигателя и соотношения  $I_0$  и  $I_2$ .

Мощность, развиваемая двигателем, останется практически без изменений, так как частота вращения ротора изменяется незначительно.

Значительное влияние понижение напряжения оказывает на срок службы асинхронного двигателя. Это связано с ускоренным старением изоляции при увеличении тока двигателя. Так, при 10 % отклонениях

напряжения и номинальной загрузке двигателя, срок его службы сокращается вдвое.

Ориентировочные данные влияния отклонений напряжения питания асинхронных двигателей на их характеристики приведены в табл. 1.1 [8].

**Т а б л и ц а 1.1**

***Изменение параметров асинхронных двигателей  
при отклонении напряжения***

Характеристики двигателей	Изменение характеристик при изменении напряжения	
	-10 %	+10 %
Пусковой и максимальный вращающий момент	-19 %	21 %
Синхронная частота вращения	const	const
Скольжение	23 %	-17 %
Частота вращения при номинальной нагрузке	-1,5 %	1 %
Коэффициент полезного действия при нагрузке:		
- номинальной	-2 %	+1 %
- 75 %	const	const
- 50 %	-1...-2 %	1...2 %
Коэффициент мощности при нагрузке:		
- номинальной	1 %	-3 %
- 75 %	2...3 %	-4 %
- 50 %	4...5 %	-5...-6 %
Ток ротора при номинальной нагрузке	14 %	11 %
Ток статора при номинальной нагрузке	10 %	-7 %
Пусковой ток	-10...-12 %	10...12 %
Прирост температуры обмотки при номинальной нагрузке	5...6°	практически без изменений

Активная мощность, потребляемая двигателем из сети, при неизменной частоте ( $K_f = 1$ ) при отклонениях напряжения может быть определена по формуле [6]

$$P = \sqrt{3}U \left( I_0 \cos \varphi_0 + \frac{I'_{2\text{НОМ}} M_c U_{\text{НОМ}}}{M_{\text{НОМ}} U} \right) \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{НОМ}} + \sqrt{\epsilon_{\text{НОМ}}^2 - 1}}{2 \epsilon_{\text{НОМ}}}}, \quad (1.15)$$

где  $U$ ,  $U_{\text{НОМ}}$  – фактическое и номинальное линейные напряжения питающей сети.

Реактивная мощность, потребляемая двигателем, при номинальной частоте ( $K_f = 1$ ) и отклонениях напряжения равна [6]



$$Q \approx Q_{\text{НОМ}} \left[ C \left( \frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2 + (1-C) \left( \frac{M_c U_{\text{НОМ}}}{M_{\text{НОМ}} U} \right)^2 \right], \quad (1.16)$$

где 
$$C \cong 1 - \frac{1}{(\epsilon_{\text{НОМ}} + \sqrt{\epsilon_{\text{НОМ}}^2 - 1}) \operatorname{tg} \varphi_{\text{НОМ}}}.$$

График изменения реактивной мощности, потребляемой двигателем в зависимости от напряжения, показан на рис. 1.8 [7].

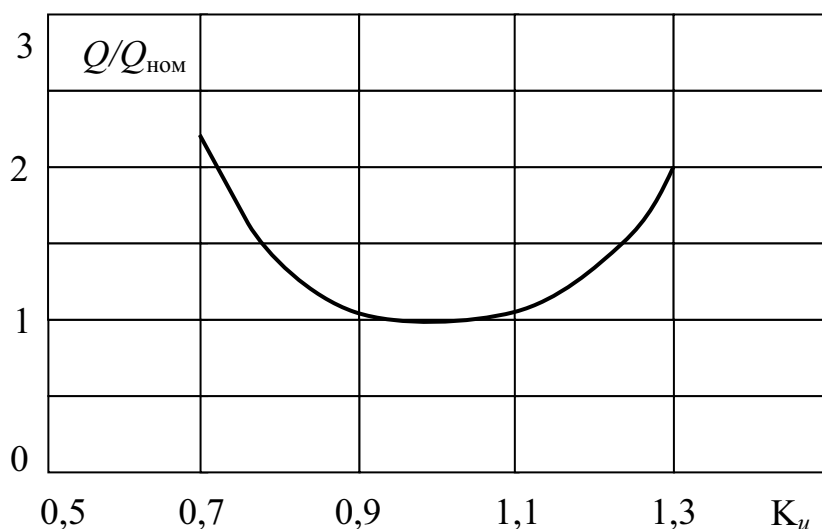


Рис. 1.8. Изменение реактивной мощности двигателя в зависимости от напряжения

Изменение частоты питающего напряжения вызывает изменение индуктивных сопротивлений асинхронного двигателя, что сказывается на его энергетических характеристиках. В частности, уменьшение частоты, при постоянной величине напряжения и постоянном моменте сопротивления, вызовет увеличение тока намагничивания  $I_0$  и, следовательно, магнитного потока машины  $\Phi$ , согласно зависимости [7]

$$\frac{\Phi}{\Phi_{\text{НОМ}}} = \frac{f_{\text{НОМ}}}{f}. \quad (1.17)$$

Большой магнитный поток увеличит вращающий момент обратно пропорционально квадрату частоты. Для сохранения равновесия между моментом сопротивления нагрузки и вращающим моментом двигателя скольжение уменьшается в соответствии с выражением

$$S = \frac{f_{\text{НОМ}} S_{\text{кр}}}{f(\epsilon_c + \sqrt{\epsilon_c^2 - 1})}. \quad (1.18)$$

Уменьшение величины скольжения вызывает уменьшение тока ротора. Ток статора при этом может измениться как в сторону уменьшения, так и увеличения, как и для случая повышения напряжения.

На рис. 1.9 показаны зависимости скольжения от частоты [6] при работе с номинальным напряжением и моментом.

На рис. 1.10 представлены зависимости тока статора от частоты при работе с номинальным моментом и напряжением [6].

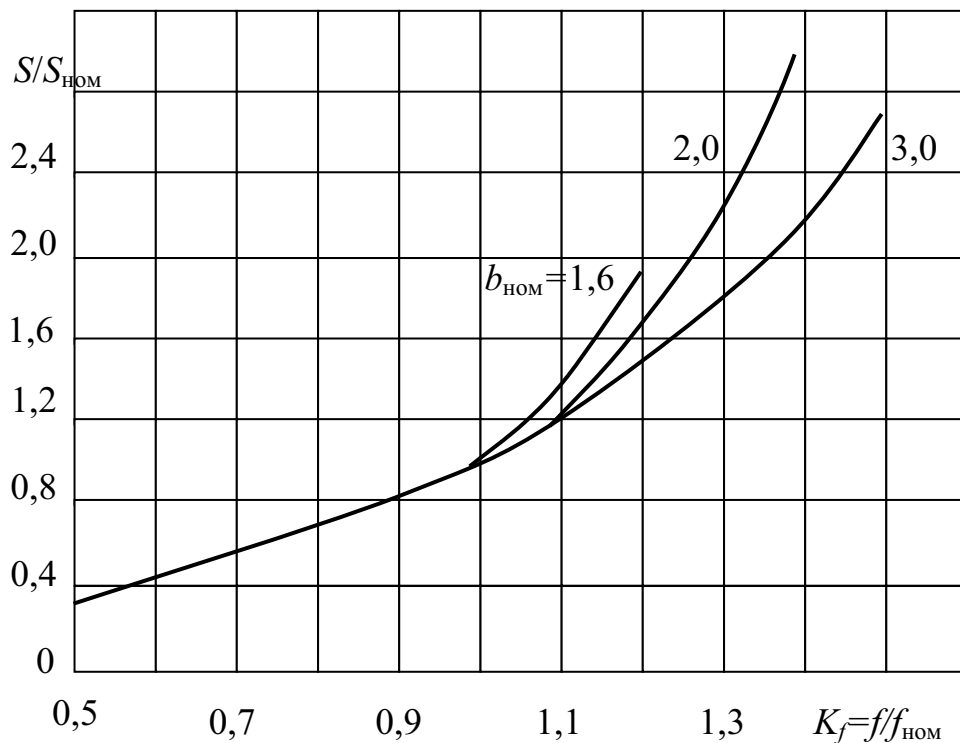


Рис. 1.9. Зависимость скольжения от частоты при работе двигателя с номинальными напряжением и моментом

Как видно из рис. 1.9 скольжение с понижением частоты при работе с постоянной нагрузкой изменяется пропорционально изменению частоты, а при повышении частоты скольжение изменяется в большей степени.

Ток статора при увеличении частоты и номинальных напряжений и моменте (рис. 1.10) увеличивается, причем это увеличение тем больше, чем меньше ток холостого хода. При уменьшении же частоты ток статора при небольших значениях тока холостого хода вначале уменьшается, а затем увеличивается, а при больших значениях тока холостого

хода он все время увеличивается благодаря резкому возрастанию намагничивающего тока с уменьшением частоты.

Таким образом, понижение частоты практически равнозначно повышению напряжения. Следовательно, если при понижении  $f$  соответственно уменьшить напряжение, то магнитный поток, а, следовательно, токи холостого хода, ротора и статора останутся такими же, как и при номинальной работе. Некоторые изменения потерь в стали и, соответственно, активной составляющей тока холостого хода практически не скажутся на токе статора.

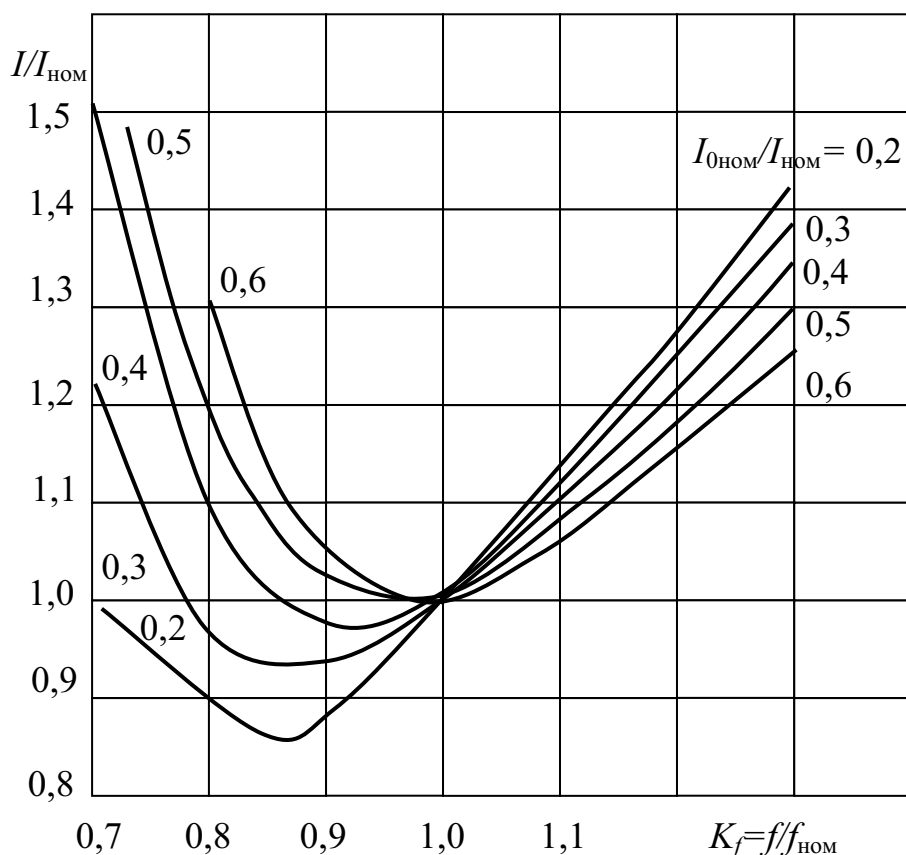


Рис. 1.10. Зависимость тока статора от частоты при работе с номинальным моментом для двигателя, имеющего  $b_{\text{НОМ}}=2$

Частота вращения двигателя изменяется практически пропорционально частоте питающей сети. Например, для асинхронного двигателя, имеющего кратность максимального момента  $\nu_{\text{НОМ}} = 2,0$ , критическое скольжение  $S_{\text{кр}} = 0,1$  и работающего с постоянным моментом сопротивления, равным номинальному, отклонение частоты на 10 % приводит к изменению частоты вращения ротора на 9,8 %.

**Технологическое оборудование.** В установках поточных линий, автоматизированных станках и т. д. отклонения напряжения могут существенно повлиять на производительность технологического оборудования. Рассмотрим это положение на примерах [8].

Экспериментальные исследования [8], проведенные на накатных автоматах метизно-металлургического завода, показали, что средняя минутная производительность этих автоматов составляет 0,275 кг при напряжении на зажимах двигателя  $U = 1,05U_{\text{ном}}$  и 0,236 кг при  $U = 0,9U_{\text{ном}}$ .

При трехсменной работе предприятия недоотпуск продукции на одном станке при  $U = 0,9U_{\text{ном}}$  составляет около 5000 кг за год. Повышение напряжения сверх  $1,05 U_{\text{ном}}$  приводит к снижению качества продукции.

Изменение напряжения в распределительной сети напряжением выше 1000 В на 1 % при выплавке 45 % ферросилиция приводит к изменению производительности рудно-термической печи на 1,717 т/сут.

Понижение напряжения на 1 % для перекачивающих насосов целлюлозно-бумажного комбината приводит к снижению производительности комбината на 0,1 %.

Исследования, проведенные на машинах ткацкого производства, позволили установить, что на каждый процент снижения напряжения производительность механизмов снижается на 0,2 %, причем при отклонениях напряжения выше 5 % снижение производительности на каждый процент отклонения увеличивается. При повышении напряжения рост производительности машин незначителен.

Снижение производительности машин и рост потерь мощности приводят к увеличению расхода электроэнергии на единицу выпускаемой продукции до 0,3 % на каждый процент отклонения напряжения. При положительных отклонениях напряжения удельный расход электроэнергии уменьшается до 0,2 % на каждый процент отклонения.

Значительное влияние оказывают отклонения напряжения на протекание технологических процессов в электротермии. При снижении напряжения увеличивается длительность технологического процесса, а в ряде случаев может иметь место полное его расстройство. Так при снижении напряжения на 8...10 % технологический процесс в печах сопротивления и индукционных печах нельзя довести до конца. Например, на одном из заводов при отжиге заготовок из цветного металла в печах сопротивления общей мощностью 675 кВ·А при снижении напряжения на 7 % технологический процесс длился 5 ч вместо 3 ч при номинальном напряжении. При снижении напряжения на 10 % и более технологический процесс был невозможен. Задержка отжига в электри-

ческих печах приводит к удлинению технологического процесса, повышенному расходу электроэнергии и повышению себестоимости продукции.

Экономичность работы системы электроснабжения, узла нагрузки и технологического оборудования при изменениях показателей качества напряжения принято оценивать убытком, выраженным в рублях.

Убыток определяют как разницу между затратами при выработке определенного количества продукции в режиме номинального напряжения и напряжения отличного от номинального. Методика расчета подробно изложена в [8].

**Осветительные установки.** Мощность осветительных установок на предприятиях характеризуется плотностью нагрузки порядка  $10 \dots 100 \text{ Вт/м}^2$  и выше, в зависимости от требований производства.

Распространенными источниками света, используемыми в осветительных установках, в настоящее время являются лампы накаливания (ЛН) и газоразрядные лампы: люминесцентные ртутные низкого давления (ЛЛ), ртутные лампы высокого давления (ДРЛ, ДРИ), натриевые лампы высокого давления (ДНаТ, дуговые ксеноновые трубчатые лампы (ДКсТ).

Характерными особенностями ламп накаливания являются простота схемы включения, нечувствительность к изменениям условий внешней среды, коэффициент мощности, практически равный единице. Световая отдача ЛН основной серии лежит в пределах  $7 \dots 19 \text{ лм/Вт}$ . Срок службы данного типа ламп не превышает 1000 часов. Невысокая световая отдача и сравнительно небольшой срок службы ограничивают применение ламп накаливания в производственных помещениях.

Газоразрядные лампы имеют существенно лучшие характеристики светоотдачи. Например, лампы типа ДРЛ характеризуются светоотдачей порядка  $40 \dots 60 \text{ лм/Вт}$ , а лампы типа ДНаТ –  $140 \text{ лм/Вт}$ . Срок службы газоразрядных ламп на порядок и более превосходит срок службы ламп накаливания. Эти обстоятельства определяют практически повсеместное применение газоразрядных ламп для освещения производственных помещений и наружного освещения территории предприятий.

Недостатками газоразрядных ламп являются: необходимость в пуско-регулирующей аппаратуре, в состав которой должны входить компенсирующие конденсаторы для повышения коэффициента мощности до  $0,9 \dots 0,95$ ; существенные пульсации светового потока; длительный, до  $5 \dots 7$  минут, процесс разгорания лампы.

Важной характеристикой источника света является зависимость световой отдачи от величины питающего напряжения и соответственно потребляемой лампой мощности. Относительные характеристики ламп

накаливания и газоразрядных ламп, на примере лампы типа ДРЛ, приведены на рис. 1.11, 1.12. На рисунках показаны зависимости относительных значений светотдачи  $B/B_n$  (кривые 1), потребляемой мощности  $P/P_n$  (кривая 2), срока службы  $T/T_n$  (кривая 3) в функции относительного значения напряжения  $U/U_n$  [7].

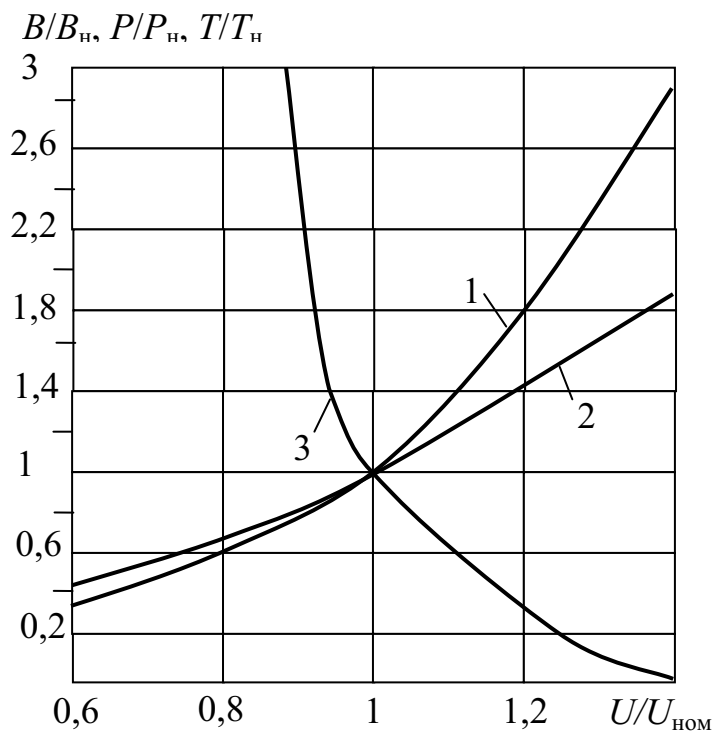


Рис. 1.11. Относительные характеристики ЛН

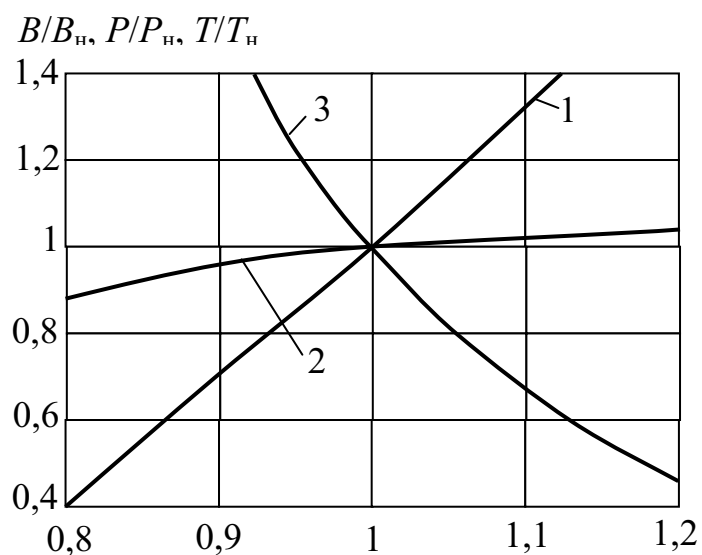


Рис. 1.12. Относительные характеристики ламп ДРЛ

Кривые на рис. 1.11, рис. 1.12 наглядно отражают зависимость энергетических и светотехнических параметров ламп от подводимого к ним напряжения, что, в свою очередь, существенно изменяет их срок службы. Так, лампы накаливания наиболее чувствительны к изменению питающего напряжения. Снижение напряжения даже в допустимом по ГОСТу 13109-95 пределе -2,5 % ведет к потере светового потока. Повышение напряжения всего на 5 % приводит к сокращению срока службы лампы в 2 раза. Газоразрядные лампы менее чувствительны к уровню питающего напряжения по светотехническим характеристикам. Однако мощность, потребляемая лампой при повышении питающего напряжения, существенно возрастает. Увеличение мощности, потребляемой лампами различных типов, в процентном отношении к номинальной приведено в таблице 1.2 [7].

**Т а б л и ц а 1.2**

***Рост мощности, потребляемой лампами***

Тип лампы	Превышение напряжения, %					
	1	2	3	5	6	10
Лампы накаливания	1,6	3,2	4,7	8,1	11,5	16,4
Ртутные лампы типа ДРЛ	2,4	4,9	7,2	12,2	17	24,3
Натриевые лампы типа ДНаТ	2	8	11	18	23	34

Кроме существенного увеличения потребляемой электроэнергии на освещение, при увеличении питающего напряжения возрастает количество ламп, необходимых для эксплуатации осветительных установок, а значит – и эксплуатационные расходы. Соотношения между превышением питающего напряжения, относительным сроком службы и количеством необходимых для эксплуатации ламп различных типов показаны в табл. 1.3 [13].

**Т а б л и ц а 1.3**

***Необходимое количество ламп***

Параметр	Превышение напряжения, %						
	0	1	2	3	4	5	6
Относительный срок службы ламп, %:							
накаливания	100	87,1	75,8	66,2	50,5	38,7	7,8
разрядных	100	95	93	90	85	80	73
Количество ламп, необходимых для эксплуатации, %:							
накаливания	100	114	132	151	198	258	1284
разрядных	100	105	108	111	118	125	137

Приведенные данные убедительно показывают, что для рационального использования электроэнергии для целей освещения и снижения эксплуатационных затрат необходимо эффективно стабилизировать напряжение на зажимах источников света.

### 1.3. Методы и средства ограничений отклонений напряжения

Основными факторами, влияющими на величину отклонения напряжения в системах электроснабжения, являются соблюдение баланса реактивной мощности в узлах нагрузок, оптимальное регулирование напряжения в центре питания, применение местного регулирования напряжения, рациональное распределение по фазам ударных и однофазных нагрузок.

Одним из основных условий уменьшения потерь электроэнергии и улучшения ее качества является повышение номинального уровня напряжения. Как правило, превышения отклонений напряжения выше допустимых свидетельствуют о нерациональном уровне напряжения на данной ступени электроснабжения.

**Регулирование напряжения в центре питания.** Наиболее эффективным методом снижения отклонений напряжения является регулирование напряжения. Под регулированием напряжения следует понимать комплекс мероприятий с применением технических средств по ограничению отклонений напряжения у потребителей электроэнергии в допустимых пределах. Регулирование напряжения на предприятиях может осуществляться следующими способами [4]:

- изменением добавочного напряжения  $U_d$  включением последовательно регулировочных трансформаторов или изменением коэффициента трансформации трансформаторов;
- изменением продольной и поперечной составляющих падения напряжения (изменение реактивной составляющей полного тока нагрузки и индуктивного сопротивления сети) за счет регулирования потоков реактивной мощности в питающих и распределительных линиях с помощью устройств компенсации (батарей конденсаторов, синхронных машин и компенсаторов);
- изменением напряжения в питающей сети энергосистемы путем изменения тока возбуждения генераторов;
- изменением схемы электрической сети и другими средствами.

Изменение добавочного напряжения с помощью включения последовательно регулировочных трансформаторов (вольтдобавочных трансформаторов или линейных регуляторов) вследствие большой



стоимости их применяется в основном на подстанциях энергосистем. На предприятиях этим методом пользуются лишь в преобразовательных установках большой мощности.

Изменение напряжения на шинах источников питания (централизованное регулирование) осуществляется по «закону встречного регулирования»: в режимах максимальных нагрузок напряжение повышается не менее чем на 5 % номинального напряжения сети, а в режимах минимальных нагрузок поддерживается номинальное напряжение.

Трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН) имеют достаточно большой диапазон регулирования – от  $\pm 10$  до  $\pm 16$  %. Количество ступеней регулирования зависит от напряжения одной ступени, которое может иметь значение от 1,25 до 2,5 % с регулированием напряжения вручную или автоматически.

Трансформаторы с регулированием напряжения со снятием нагрузки (переключение без возбуждения – ПБВ) имеют диапазон регулирования  $\pm 5$  (10) % номинального напряжения. Регулирование таким способом осуществляется в основном при сезонном изменении нагрузки (при переходе на зимний и летний графики).

Трансформаторы с РПН значительно дороже трансформаторов с ПБВ, поэтому в основном устройствами РПН оборудуются трансформаторы с высшим напряжением 35 кВ и более. Применение трансформаторов с РПН на напряжение 6...10 кВ определяется технико-экономическим обоснованием (например, на электролизных, электро-термических установках).

Экономическая эффективность применения специальных технических средств оценивается сравнением приведенных годовых затрат на регулирующее устройство с убытком  $У$  от низкого качества напряжения:

$$З_{\text{py}} = K_{\text{py}}(K_{\text{нэ}} + K_{\text{а}}) + c_0 \Delta \mathcal{E} < У,$$

где  $K_{\text{py}}$  – капитальные вложения на регулирующее устройство;  $c_0$  и  $\Delta \mathcal{E}$  – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии и потери энергии в устройствах соответственно;  $K_{\text{нэ}}$  – нормативный коэффициент эффективности;  $K_{\text{а}}$  – коэффициент отчисления на амортизацию, ремонт и оборудование.

Одновременное регулирование напряжения на зажимах всех приемников электроэнергии целесообразно, если они однородны (электродвигатели насосных станций, цеха электролиза). В других случаях проводят анализ графиков нагрузки и объединяют приемники электроэнергии в однородные группы, которые подключаются к отдельному трансформатору с РПН. Если сгруппировать приемники электроэнергии не удастся, регулирование производится по закону, определяемому преобладающей нагрузкой.

Уменьшение отклонения напряжения можно получить за счет уменьшения активного  $R$  (увеличение сечения проводов и жил электрической сети) и реактивного  $X$  сопротивлений элементов системы электроснабжения. Уменьшение  $X$  достигается расщеплением фаз токопроводов, применением продольной емкостной компенсации. В последнем случае происходит уменьшение реактивного сопротивления линии ( $X = X_L - X_C$ ) и уменьшаются потери напряжения. Отрицательными последствиями продольной компенсации являются: возрастание токов короткого замыкания в питающих линиях, появление перенапряжений на конденсаторных батареях при замыканиях за конденсаторами и возможность возникновения низкочастотных колебаний в последовательной цепи «индуктивность – емкость».

Изменения потерь напряжения можно достичь также путем регулирования потоков реактивной мощности в питающих и распределительных линиях электрической сети предприятия с помощью компенсирующих устройств.

Выражение для определения напряжения  $U_1$  на шинах ГПП, учитывающее указанные выше способы регулирования в общем виде можно представить формулой [9]

$$U_1 = U_c \pm U_{\text{доб.}} - \frac{P_{\text{п}}R + (Q_{\text{п}} - Q_{\text{к.у.}})(X_L - X_C)}{U_{1\text{ном}}}, \quad (1.20)$$

где  $U_c$  – напряжение питающей сети, подведенное к ГПП предприятия (приведенное к  $U_1$ );  $U_1$  и  $U_{1\text{ном}}$  – текущее и номинальные значения напряжения в распределительной сети 6-10 кВ предприятия;  $R$ ,  $X_L$  и  $X_C$  – эквивалентные сопротивления питающей сети от системы до узла нагрузки;  $R$  – активное,  $X_L$  – индуктивное,  $X_C$  – емкостное сопротивление установок продольной компенсации (если таковые предусмотрены);  $U_{\text{доб.}}$  – добавка напряжения, обеспечиваемая переключением ответвлений обмотки трансформатора или последовательно регулируемого трансформатора;  $Q_{\text{к.у.}}$  – регулируемая мощность компенсирующих устройств;  $P_{\text{п}}$  и  $Q_{\text{п}}$  – расчетная активная и реактивная нагрузки предприятия с учетом потерь.

Для регулирования напряжения  $U_1$  согласно (1.20) можно осуществить регулирование подводимого от энергосистемы напряжения  $U_c$ . Это возможно, например, путем изменения возбуждения генераторов при оперативном управлении диспетчера системы. Этот способ централизованного по району регулирования не вполне и не всегда соответствует режиму работы конкретного предприятия.

Наиболее эффективным является комплексное регулирование, когда вместе с изменением коэффициента трансформации трансформатора согласованно изменяется мощность компенсирующих устройств предприятия.

В электрических сетях промышленных предприятий реактивное сопротивление в 10...30 раз больше активного [4], следовательно, значение напряжения на шинах нагрузки  $U_1$  (рис. 1.13) существенно зави-

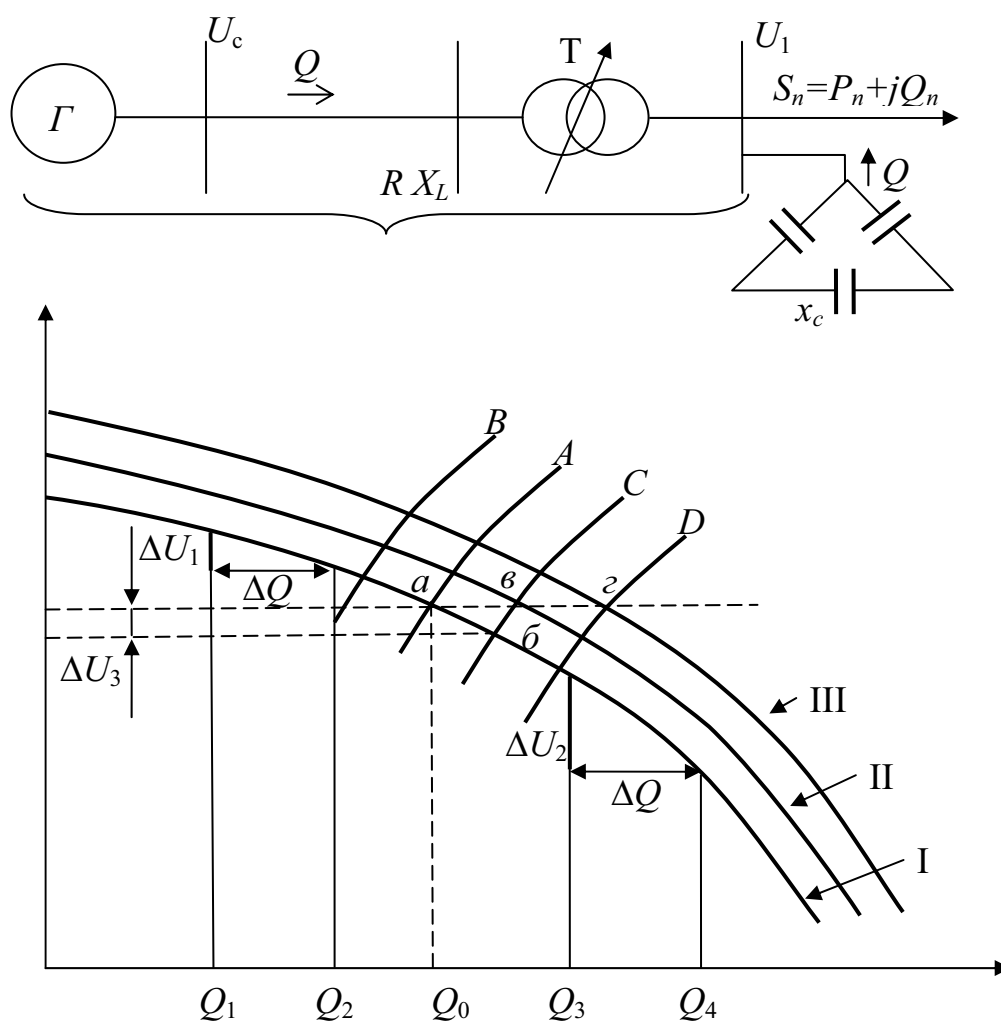


Рис. 1.13. Зависимости напряжения и потока реактивной мощности в узле нагрузки

сит от реактивной мощности  $Q$ , получаемой из системы, то есть от произведения  $QX$ . Кривая I представляет собой нелинейную зависимость  $U_1 = f(Q)$ , так как с увеличением потребления реактивной мощности из системы нелинейно увеличивается  $X_L$  (реактивная мощность берется от все более удаленных электростанций). За счет устройства РПН трансформатора  $T$  можно изменить напряжение  $U_1$  (кривые II, III), не изменяя реактивной мощности  $Q$ , получаемой из системы.

При изменении реактивной нагрузки отношение, называемое коэффициентом крутизны  $K_K$ , будет разным на различных участках кривой зависимости  $U_1 = f(Q)$ , т. е. если  $(Q_2 - Q_1) / \Delta U_1 = 10$ , то  $(Q_4 - Q_3) / \Delta U_2$  имеет  $K_K \gg 1$ . Это обстоятельство необходимо учитывать в устройствах автоматики РПН так как на одно и то же изменение реактивной мощности добавка напряжения может быть разной.

Потребление реактивной мощности  $Q_{\Pi}$  (нагрузки) изменяется по статическим характеристикам  $Q_{\Pi} = f(U_1)$ . Например, кривая А представляет статическую характеристику нагрузки при заданном значении  $Q_0$ .

При понижении  $Q$  (включении БК) характеристика займет положение В, при росте  $Q$  (отключение части БК) – положение С, Д и т. д.

Пусть первоначально баланс потребления и генерации реактивной мощности устанавливается в точке  $a$  пересечения характеристик I и А. При росте нагрузки  $Q_{\Pi}$  (кривая С) пересечение характеристик произойдет в точке  $b$ , напряжение понизится на величину  $\Delta U_3$ . Устройством РПН трансформатора Т можно характеристику I перевести в положение II, а точку пересечения – в точку  $c$ , напряжение в этом случае повысится в соответствии с изменением ступени трансформации Т. Аналогичен переход и в точку  $z$ .

Таким образом, регулируя  $Q_{\Pi}$  на предприятии одновременно с изменением  $U_{\text{доб.}}$  трансформатора, можно добиться постоянства напряжения  $U_1$  при оптимальном значении перетока мощности от системы к рассматриваемому узлу нагрузки.

**Местное регулирование напряжения в распределительных сетях.** Отдельные потребители электроэнергии имеют различную удаленность от центров питания, различные графики нагрузок, что приводит к несовпадению требований к регулированию напряжения. Поэтому применяется индивидуальное регулирование напряжения в отдельных точках сети или непосредственно на зажимах потребителей, так называемое местным регулированием. Для этих целей применяются управляемые источники реактивной мощности (СД, КБ), устройства, создающие добавку напряжения  $U_{\text{доб.}}$  (линейные регуляторы и стабилизаторы напряжения). Рассмотрим связь между реактивной мощностью и напряжением в узле нагрузки, позволяющую осуществить местное регулирование напряжения [9].

При включении или отключении компенсирующих устройств напряжение в точке подключения изменится согласно (1.20) на значение (на ступень)

$$V = \frac{Q_{\text{к.у.}} X}{U}, \quad (1.21)$$

где  $Q_{\text{к.у.}}$  – мощность компенсирующего устройства;  $X$  – реактивное сопротивление цепи системы – точка подключения компенсирующего устройства;  $U$  – напряжение в точке подключения.

Если положить, что напряжение  $U$  в точке подключения КУ равно  $U_{\text{ном}}$ , то значение повышения напряжения  $V$ , %,

$$V = \frac{Q_{\text{к.у.}} X}{U_{\text{ном}}^2} 100 = \frac{Q_{\text{к.у.}}}{S_{\text{к}}} 100. \quad (1.22)$$

Реактивная мощность компенсирующего устройства, необходимая для повышения напряжения на требуемую ступень  $V_{\text{рег.}}$ , определяется из (1.21)

$$Q_{\text{рег.}} = V_{\text{рег.}} U / X. \quad (1.23)$$

Если напряжение и  $V_{\text{рег.}}$  заданы в относительных единицах  $V_{\text{р*}}$ , то

$$Q_{\text{рег.}} = V_{\text{р*}} U_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}}^2}{X}. \quad (1.24)$$

При подключении БК напряжением 380 В к шинам трансформаторной подстанции повышение напряжения в момент включения БК можно определить как

$$V_{\text{рег.}} = \frac{Q_{\text{БК}}}{S_{\text{ном.т}}} U_{\text{к}}, \quad (1.25)$$

где  $S_{\text{ном.т}}$  – номинальная мощность трансформатора;  $U_{\text{к}}$  – напряжение КЗ трансформатора, %, которое в относительных единицах равно сопротивлению трансформатора и сопротивлению цепи КЗ за трансформатором (без учета  $X_{\text{сист.}}$ ).

В распределительных сетях предприятий линии 6-10 кВ обычно имеют небольшую длину и малое сопротивление. Поэтому регулированием мощности БК не удастся получить эффективное местное регулирование напряжения. Требуется централизованное регулирование за счет РПН на ГПП. Необходимость в местном регулировании возникает в сетях до 1000 В, где рациональным сочетанием отключаемых и неотключаемых БК можно обеспечить и заданный уровень напряжения, и его регулирование.

Следующим важным средством улучшения качества напряжения у потребителей является изменение коэффициента трансформации цеховых трансформаторов (ЦТ).

ЦТ находятся на разном расстоянии от ГПП и, следовательно, потери напряжения до них будут различными. Чтобы отклонения напряжения на зажимах электроприемников не выходили за допустимые пределы, необходимо правильно выбрать коэффициент трансформации ЦТ в зависимости от величины отклонения напряжения на высшей стороне трансформатора и его нагрузки.

Обычно у цеховых трансформаторов нет устройств для переключения ответвлений под нагрузкой. Такие трансформаторы называются трансформаторами с ПБВ – с переключением без возбуждения. Поскольку переключения ответвлений трансформатора с ПБВ проводятся при его отключении от сети (они производятся редко, практически при сезонном изменении нагрузки), очень важно правильно выбрать коэффициент трансформации ЦТ с тем, чтобы отклонения напряжения на зажимах приемников в момент максимальной и минимальной нагрузок не превышал допустимых значений.

Местное регулирование напряжения за счет создания дополнительной э.д.с. осуществляется установкой вольто-добавочных трансформаторов в необходимых точках сети [9].

Индивидуальное регулирование напряжения применяют лишь тогда, когда другие способы регулирования не дают должного эффекта.

***Нормализация отклонений напряжения в сетях освещения.*** Нормативные требования к качеству напряжения источников питания осветительных установок [2] более жесткие по сравнению с требованиями других электропотребителей. Это обусловлено нормируемой освещенностью и сроком службы ламп.

Питание электрического освещения, как правило, производится от общих для осветительных и силовых нагрузок, имеющих переменный график, трансформаторов напряжением 380/220 В. Сети электроосвещения характеризуются большой разветвленностью и протяженностью. Поэтому важнейшим требованием к расчету сетей освещения является выбор таких сечений проводников, при которых отклонения напряжения на зажимах источников света находились бы в допустимых пределах.

Допустимый уровень напряжения у наиболее удаленных светильников должен быть не менее 97,5 % от номинального значения. Снижение напряжения более 10 % от номинального не гарантирует даже надежного зажигания и горения газоразрядных ламп.

Располагаемая потеря напряжения определяется с учетом потери в трансформаторе [10]

$$\Delta U_{\text{д}} = U_{\text{хх}} - \Delta U_{\text{Т}} - U_{\text{л}}, \quad (1.26)$$

где  $U_{\text{х.х}}$  – напряжение холостого хода трансформатора, соответствующее номинальному напряжению на зажимах вторичной обмотки трансформатора и равное 105 % от номинального напряжения лампы;  $\Delta U_{\text{Т}}$  – потеря напряжения в трансформаторе, %;  $U_{\text{л}}$  – минимально допустимое напряжение лампы в процентах от номинального.

Считая, что  $U_{\text{хх}} = 105 \% U_{\text{н}}$ ,  $U_{\text{л}} = 97,5 \% U_{\text{н}}$ ,

$$\Delta U_{\text{д}} \% = 105 - \Delta U_{\text{Т}} - 97,5 = 7,5 - \Delta U_{\text{Т}}. \quad (1.27)$$

Потеря напряжения во вторичной обмотке трансформатора зависит от его загрузки и параметров, а также от коэффициента мощности сети

$$\Delta U_{\text{Т}} = \beta \cos \varphi (U_{\text{а}} + U_{\text{р}} \operatorname{tg} \varphi) \quad (1.28)$$

где  $\beta = S / S_{\text{н}}$  – коэффициент загрузки трансформатора с номинальной мощностью  $S_{\text{н}}$  (кВ·А) и расчетной мощностью сети  $S$  (кВ·А);  $U_{\text{а}} = (\Delta P_{\text{к}} / S_{\text{н}}) 100$  – активная составляющая напряжения КЗ, %;  $\Delta P_{\text{к}}$  – потери мощности в режиме короткого замыкания, кВт;  $U_{\text{р}} = \sqrt{U_{\text{к}}^2 - U_{\text{а}}^2}$  – реактивная составляющая напряжения КЗ, %;  $U_{\text{к}}$  – напряжение КЗ, %;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности в сети вторичного напряжения и соответствующий ему  $\operatorname{tg} \varphi$ .

**Пример 1.1.** Определить допустимую потерю напряжения у наиболее удаленного светильника сети рабочего освещения при напряжении на лампе 97,5 % от номинального, если номинальная мощность трансформатора 400 кВ·А,  $\beta = 0,8$ ,  $\cos \varphi = 0,85$ .

**Решение.** По каталогу для трансформатора 400 кВ·А находим  $\Delta P_{\text{к}} = 5,5$  кВт и  $U_{\text{к}} = 5,5$  %, откуда

$$U_{\text{а}} = 5,5 \cdot 100 / 400 = 1,37 \% ; \quad U_{\text{р}} = \sqrt{5,5^2 - 1,37^2} = 4,25 \%$$

Потеря напряжения во вторичной обмотке трансформатора составляет (1.28)

$$\Delta U_{\text{Т}} = 0,8 \cdot 0,85 (1,37 + 4,25 \cdot 0,62) = 2,72 \%$$

Принимая, что  $U_{\text{хх}} = 105$  %, допустимая потеря напряжения

$$U_{\text{д}} = 7,5 - 2,72 = 4,8 \%$$

Сети освещения обычно выполняются проводниками с одинаковым сечением, единичные мощности светильников и значения их коэффициента мощности одинаковы. Пренебрегая индуктивностью сети потерю напряжения для однофазной линии переменного тока можно определить по формуле [10]

$$\Delta U \% = \frac{2 \cdot 10^5}{U_{\phi}^2 \gamma \cdot F} \sum PL = \frac{2 \cdot 10^5}{U_{\phi}^2 \gamma} \cdot \frac{M}{F}. \quad (1.29)$$

Обозначим коэффициентом  $C$  величину, зависящую от материала проводника ( $\gamma$ ), номинального напряжения ( $U_{\phi}$ ), рода тока и системы сети. Тогда приняв  $\Delta U = \Delta U_{\text{д}}$  из (1.29) находим необходимое сечение,  $\text{мм}^2$

$$F = M / (C \Delta U_{\text{д}}), \quad (1.30)$$

где  $M$  – момент нагрузки данного участка сети,  $\text{кВт}\cdot\text{м}$ ;  $\Delta U_{\text{д}}$  – допустимая потеря напряжения, %;  $C$  – коэффициент, значение которого принимается по [10].

Так как осветительная нагрузка распределена обычно равномерно по длине сети, сумму моментов нагрузки можно заменить суммарной нагрузкой, подключенной в середине линии, т. е.

$$\sum PL = 0,5L \sum P.$$

По мере удаления от источника питания нагрузка в сети уменьшается. Экономически целесообразно осветительную сеть выполнять проводниками с убывающим сечением от источника питания. Наименьший расход проводникового материала в разветвленной сети освещения (питающей и групповой) вычисляется для каждого ее участка по величине приведенного момента, исходя из располагаемой потери напряжения на участке [10]

$$F = (\sum M + \alpha \sum m) / C \Delta U_{\text{д}}, \quad (1.31)$$

где  $\sum M + \alpha \sum m$  – приведенный момент,  $\text{кВт}\cdot\text{м}$ ;  $\sum M$  – сумма моментов данного и всех последующих по направлению тока участков с тем же числом проводов, что и на данном участке,  $\text{кВт}\cdot\text{м}$ ;  $\sum m$  сумма моментов линий, питаемых через данный участок, с другим числом проводов, чем на данном участке,  $\text{кВт}\cdot\text{м}$ ;  $\alpha$  – коэффициент приведения моментов, зависящий от числа проводов в основной линии и ответвлении, значение которого принимается по [10].



При выборе сечений нулевых проводов осветительной сети необходимо учитывать неравномерность загрузки по фазам питающей сети, возникающую при одновременном включении светильников в групповой сети.

В трехфазных сетях с газоразрядными лампами даже при равномерной загрузке фаз в нулевом проводе протекает уравнивающий ток. Его появление связано с несинусоидальностью кривой тока и высшими гармониками, причинами которых являются нелинейность вольт-амперной характеристики люминесцентных ламп и наличие в их цепи катушки индуктивности со сталью и емкости.

Поэтому для осветительных сетей с лампами накаливания сечение нулевого провода в питающей сети принимается равным половине фазного, а для питающих линий с газоразрядными лампами – равным фазному. Для двухпроводных линий сечения нулевого и фазного проводов должны быть одинаковы.

**Пример 1.2.** Определить сечение алюминиевых проводов осветительной сети 380/220 В. Допустимая потеря напряжения 3,2 %. Схема линии с нагрузками приведена на рис. 1.14. Четырехпроводными

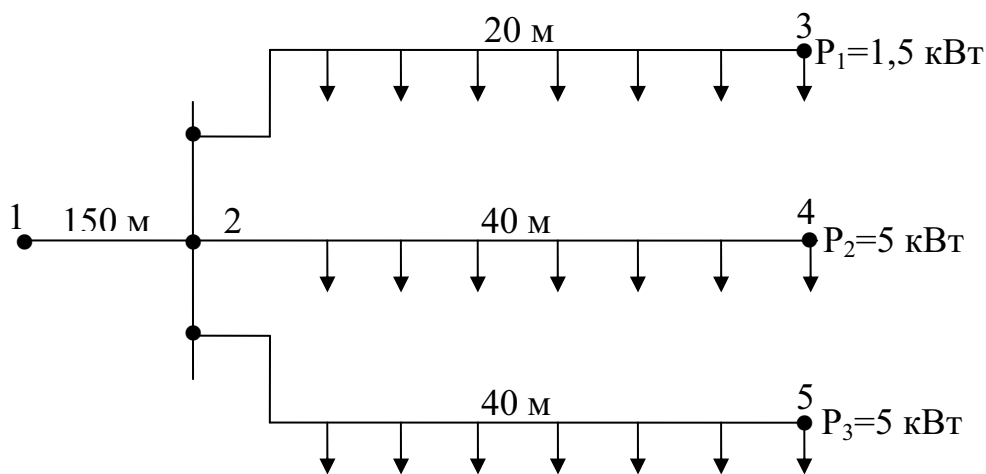


Рис. 1.14. Схема осветительной сети

выполнены питающая линия 1-2 длиной 150 м и распределительные линии 2-4 и 2-5 длиной по 40 м; линия 2-3 длиной 20 м – двухпроводная.

**Решение.** Для четырехпроводной сети 380/220 В коэффициент  $C = 44$ , для двухпроводной сети  $C = 7,4$ . Для линии 2-3 коэффициент  $\alpha = 1,85$ .

Определим моменты всех участков. Для линий 2-3, 2-4 и 2-5 заменим равномерно распределенную по длине нагрузку сосредоточенной в середине линии:

$$M_{12} = (P_1 + P_2 + P_3) L_{12} = 11,5 \cdot 150 = 1720 \text{ кВт}\cdot\text{м};$$

$$M_{23} = 0,5 L_{23} \cdot P_1 = 10 \cdot 1,5 = 15 \text{ кВт}\cdot\text{м};$$

$$M_{24} = 5 \cdot 20 = 100 \text{ кВт}\cdot\text{м};$$

$$M_{25} = 5 \cdot 20 = 100 \text{ кВт}\cdot\text{м}.$$

Для линии 1-2 сечение определим по (1.31)

$$F_{12} = \frac{(1720 + 100 + 100) + 1,85 \cdot 15}{44 \cdot 3,2} = 13,8 \text{ мм}^2.$$

Принимая стандартное сечение  $16 \text{ мм}^2$ , находим по (1.30) потерю напряжения в линии 1-2

$$\Delta U_{12} = 1720/44 \cdot 16 = 2,34 \text{ \%}.$$

Для участков 2-3, 2-4 и 2-5 располагаемая потеря напряжения

$$\Delta U_{23} = \Delta U_{24} = \Delta U_{25} = \Delta U_{\text{д}} - \Delta U_{12} = 3,2 - 2,34 = 0,86 \text{ \%}.$$

Сечения по участкам следующие:

$$F_{23} = 15/(7,4 \cdot 0,86) = 2,36 \text{ мм}^2, \text{ принимаем } 2,5 \text{ мм}^2;$$

$$F_{24} = F_{25} = 100/(44 \cdot 0,86) = 2,52 \text{ мм}^2, \text{ принимаем } 2,5 \text{ мм}^2.$$

В производственных условиях иногда не удается получить удовлетворительного качества напряжения на зажимах осветительных приборов отмеченными выше средствами. В этом случае рекомендуется применение вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ). В качестве которых в простейших схемах могут быть использованы одно- или трехфазные трансформаторы 220/12 В или 220/24 В.

Вольтодобавочный трансформатор позволяет создавать дополнительную э.д.с., которая суммируется с основным вектором напряжения сети от трансформаторной подстанции (ТП). Такой трансформатор имеет две обмотки: одну из них (вторичную) включают последовательно в линию с нагрузкой, в которой регулируется напряжение, а первичную подключают к источнику питания. Добавочная э.д.с., создаваемая ВДТ, зависит от напряжения питания первичной обмотки и его коэффициента трансформации. Величину добавочного напряжения можно изменять за счет изменения: а) коэффициента трансформации ВДТ (рис. 1.15, а); б) напряжения, подведенного к первичной обмотке ВДТ при помощи вспомогательного регулирования трансформатора или автотрансформатора (АТ) (рис. 1.15, б); в) фазы напряжения в первичной обмотке ВДТ.

В зависимости от схемы подключения первичной обмотки ВДТ могут создавать вольтодобавку, совпадающую или сдвинутую по фазе относительно основного напряжения. Подключая первичную обмотку

регулирующего трансформатора или АТ в разные фазы (рис. 1.15, б), можно получить различные значения напряжения на выходе ВДТ, т. е. на зажимах осветительных приборов.

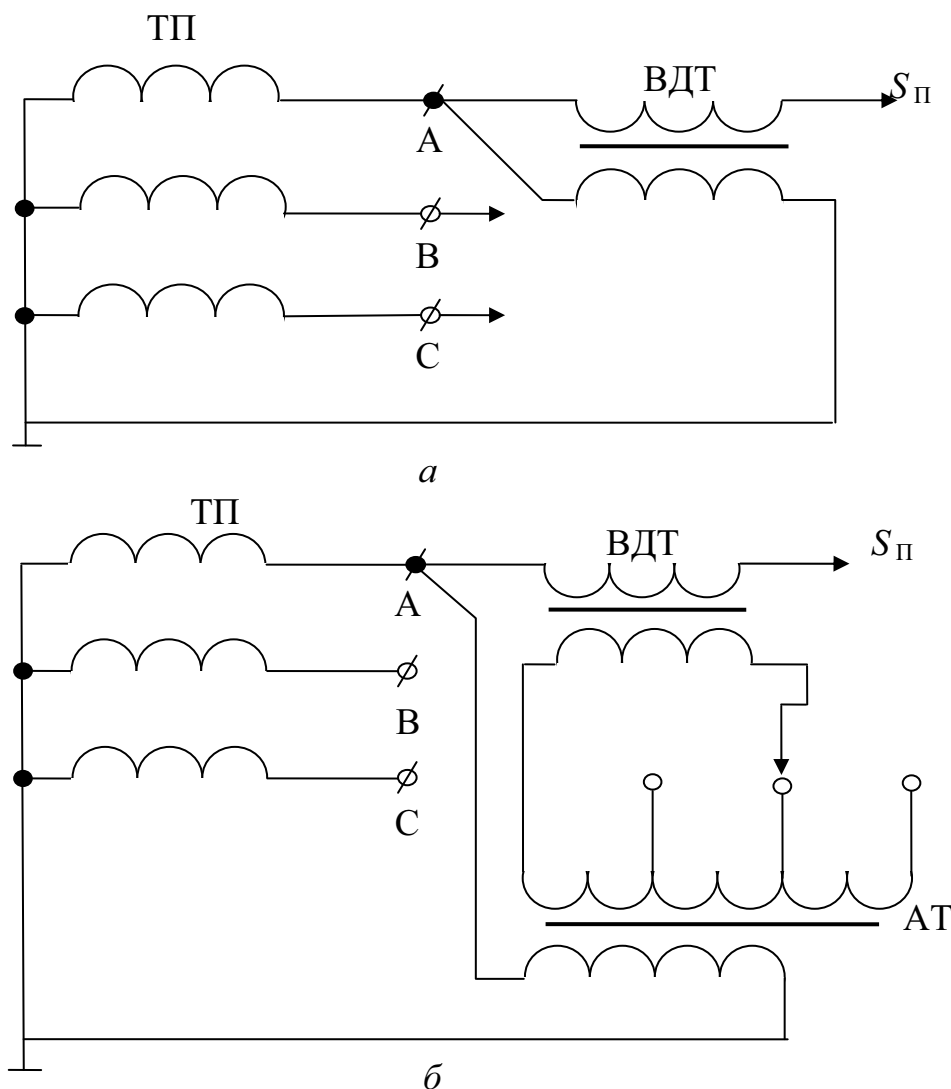


Рис. 1.15. Схемы подключения ВДТ: а – непосредственно в сеть; б – через автотрансформатор АТ

Собственная сущность ВДТ зависит от величины добавки напряжения  $U_{доб}$ , создаваемой ВДТ, и мощности, передаваемой по линии потребителям  $S_{П}$

$$S_T = \frac{U_{доб.}}{100} S_{П} . \quad (1.32)$$

Обычно мощность ВДТ составляет 10...15 % мощности нагрузки, питающей по линии, в которой установлен ВДТ. Таким методом можно существенно подкорректировать отклонение напряжения на зажимах осветительных приборов.

Для объектов освещения с повышенными требованиями к освещению и ее стабильности применяются специальные устройства ограничения и стабилизации напряжения на уровне  $U_{ном}$ . Наибольшее распространение получили тиристорные ограничители напряжения (ТОН), у которых в зависимости от напряжения на входе осветительных приборов меняется угол управления  $\alpha$  тиристорами таким образом, чтобы поддерживать напряжение на заданном уровне [11].

По вопросам измерения отклонений напряжения на производстве необходимо обратиться к [1] и [12], в которых подробно описан необходимый инструментарий, методика измерений и обработки данных.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Какие показатели качества электрической энергии Вы знаете?
2. Как можно произвести проверку показателей качества электрической энергии на соответствие их ГОСТ 13109-97?
3. Что понимается под электромагнитной совместимостью систем электроснабжения и электрооборудования?
4. Какие причины обуславливают изменение отклонений напряжения?
5. Как определяют отклонения напряжения на зажимах потребителей?
6. Каково влияние отклонений напряжения на энергетические характеристики асинхронных двигателей?
7. Влияние качества электрической энергии на технологический процесс производственных установок?
8. Каковы особенности осветительных установок в сравнении с другими электропотребителями предприятия?
9. Какие методы и средства регулирования напряжения применяются в сетях промышленных предприятий?
10. Когда применяют местное и индивидуальное регулирование напряжения?
11. Как выбирают ответвления трансформаторов с ПБВ?
12. Объясните физический процесс уменьшения отклонений напряжения с помощью продольной и поперечной компенсаций реактивной мощности.
13. В чем заключается смысл нормализации отклонений напряжения на зажимах световых приборов путем расчета питающих линий?
14. Как осуществляется нормализация отклонений напряжения с помощью вольто-добавочных трансформаторов?

## 2. КОЛЕБАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Колебания напряжения представляют собой кратковременные изменения напряжения, вызванные включениями мощных резкопеременных нагрузок: электродуговых сталеплавильных печей, сварочных агрегатов, вентильных преобразователей и др.

ГОСТ 13109-97 ограничивает значение и частоту колебаний напряжения только на зажимах осветительных ламп и радиоприборов [8], однако они отрицательно сказываются и на работе других потребителей.

### 2.1. Определение показателей колебания напряжения

Колебания напряжения характеризуются следующими показателями: размахом изменения напряжения, частотой изменения напряжения, интервалом между следующими друг за другом изменениями напряжения, а также дозой фликера.

Размах изменения напряжения  $\delta U_t$  вычисляют по формуле

$$\delta U_t = \frac{|U_i - U_{i+1}|}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

где  $U_i, U_{i+1}$  – значения следующих один за другим экстремумов или экстремума и горизонтального участка огибающей среднеквадратичных значений напряжений основной частоты, определенных на каждом полупериоде основной частоты (рис. 2.1).

Допускается при коэффициенте искажения синусоидальности напряжения, не превышающем 5 % определять  $\delta U_t$  по формуле

$$\delta U_t = \frac{|U_{Ai} - U_{Ai+1}|}{\sqrt{2}U_{\text{ном}}} \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

где  $U_{Ai}$  и  $U_{Ai+1}$  – значения следующих один за другим экстремумов или экстремума и горизонтального участка огибающей амплитудных значений напряжений на каждом полупериоде основной частоты.

Частоту повторения изменений напряжения при периодических колебаниях напряжения вычисляют по формуле

$$F_{\delta U_t} = \frac{m}{T} (\text{с}^{-1}, \text{мин.}^{-1}), \quad (2.3)$$

где  $m$  – число изменений напряжения за время  $T$ ;  $T$  – интервал времени измерения, принимаемый равным 10 мин.

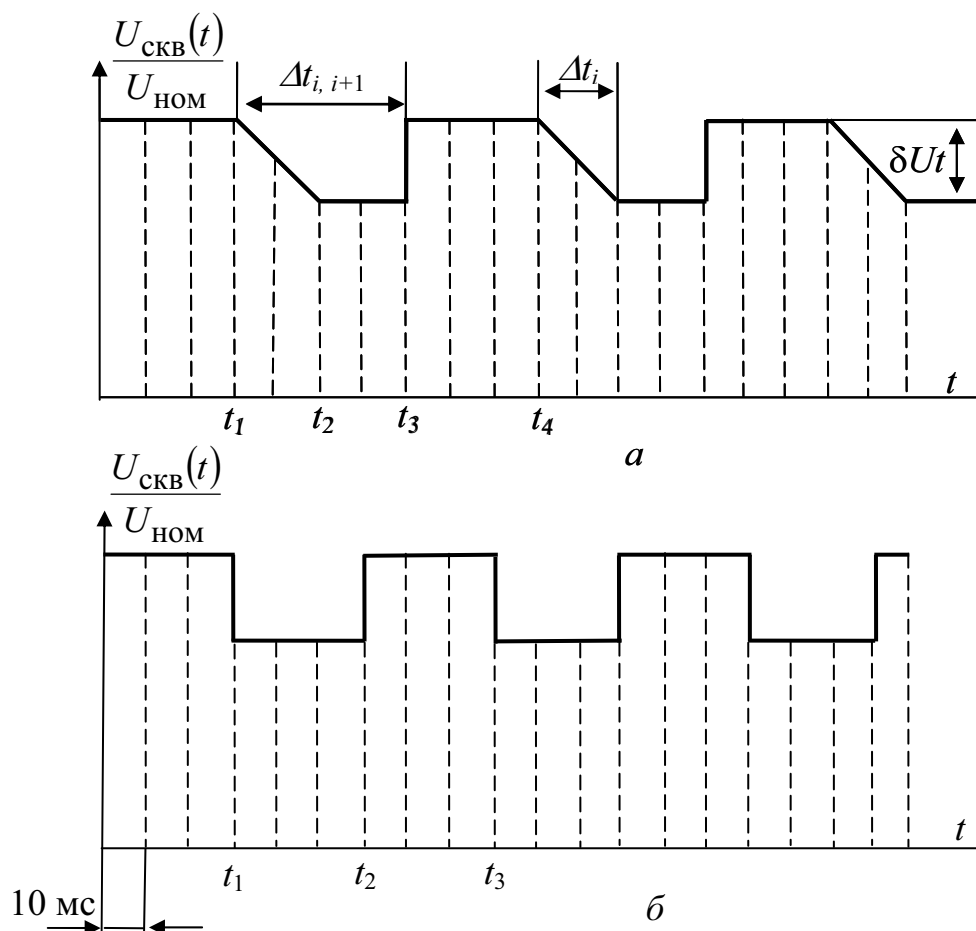


Рис. 2.1. Колебания напряжения произвольной формы (а) и имеющие форму меандра (б)

Интервал времени между изменениями напряжения  $\Delta t_{i,i+1}$  в секундах или минутах в соответствии с приведенным рисунком (рис. 2.1) вычисляют по формуле

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

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

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

Предельно допустимые значения размаха изменения напряжения  $\delta U_t$  в точках общего присоединения к электрическим сетям при колебаниях напряжения, огибающая которых имеет форму меандра (рис. 2.1), в зависимости от частоты повторений изменения напряжения  $F_{\delta U_t}$  или интервала между изменениями напряжения  $\Delta t_{i,i+1}$  равны значениям,

определяемым по кривой 1 (рис. 2.2) [2]. Для потребителей электроэнергии с лампами накаливания в помещениях, где требуется значительное зрительное напряжение, предельные значения  $\delta U_t$  определяются по кривой 2 (рис. 2.2) [2].

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

Предельно допустимое значение для кратковременной дозы фликера  $P_{st}$  при колебаниях напряжения равно 1,38, а для длительной дозы фликера  $P_{lt}$  при тех же колебаниях напряжения равно 1,0. Кратковременную дозу фликера определяют на интервале времени наблюдения 10 мин. Длительную дозу фликера определяют на интервале времени наблюдения, равном 2 часам.

**Фликер** – субъективное восприятие человеком колебаний светового потока ламп, вызванных колебаниями напряжения в электрической сети, питающей источник.

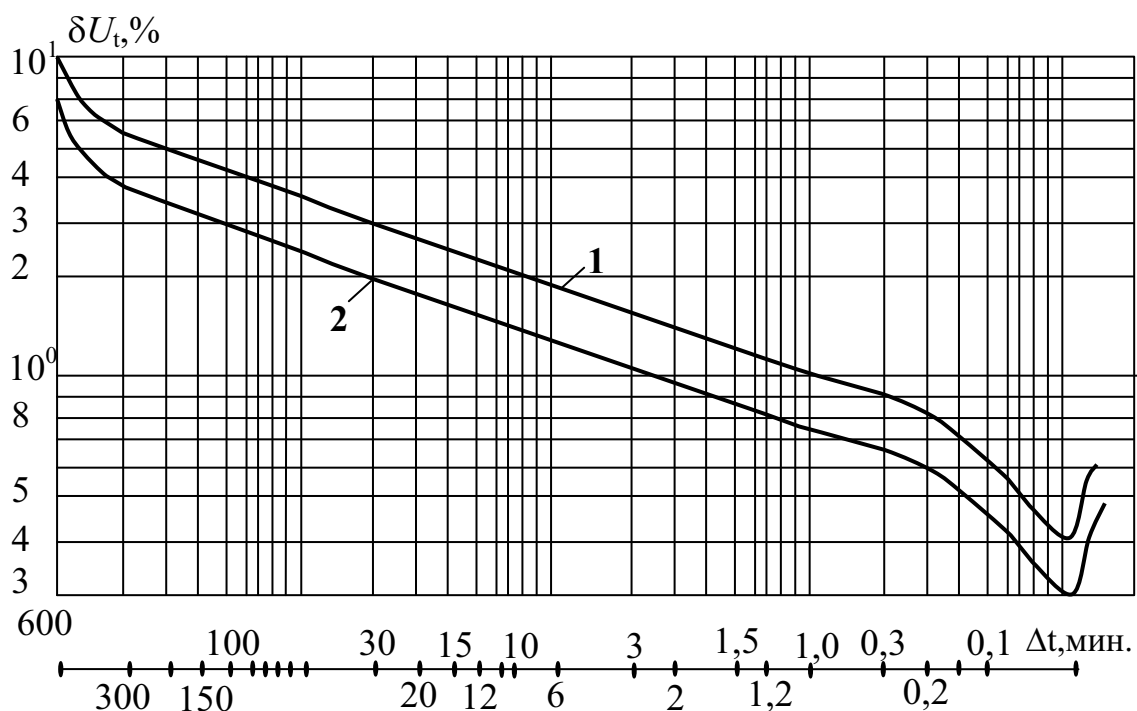


Рис. 2.2. Предельно допустимые размахи изменений напряжения в зависимости от интервала между изменениями напряжения  $\Delta t$

**Доза фликера** – мера восприимчивости человека к воздействию фликера за установленный промежуток времени.

Предельно допустимые дозы фликера для потребителей с лампами накаливания в помещениях, где требуется значительное зрительное напряжение, равны 1,0 и 0,74 для кратковременной и длительной доз соответственно.

## 2.2. Влияние колебаний напряжения на работу электроприемников

Как отмечалось выше ГОСТ 13109-97 ограничивает значение и частоту колебаний напряжения только на зажимах осветительных ламп и радиоприборов. Это вызвано, прежде всего, тем, что колебания напряжения негативно воздействуют на зрение человека. Мигание ламп освещения (фликер-эффект) вызывает неприятный психологический эффект, утомление зрения и организма в целом, вследствие чего снижается производительность труда. Степень раздражения органов зрения зависит от величины и частоты мигания света.

Исследование показали [9], что глаз человека наиболее чувствителен к мерцаниям света ламп накаливания с частотой, находящейся в пределах 3...10 Гц. При этом глаз начинает ощущать эти мерцания, начиная с 0,25 % номинального напряжения, а неприятные ощущения возникают при напряжении, равном 0,4 % номинального.

Степень воздействия колебаний напряжения на зрение зависит и от типа источника света. Например, при одинаковых колебаниях напряжения лампы накаливания оказывают значительно большее воздействие на зрение, чем газоразрядные лампы, т. к. последние менее чувствительны к колебаниям напряжения при указанных выше частотах, но более чувствительны при частотах свыше 20 Гц [9].

Колебания напряжения более 10 % могут привести к погасанию газоразрядных ламп. Зажигание их в зависимости от типа ламп происходит через несколько секунд и даже минут.

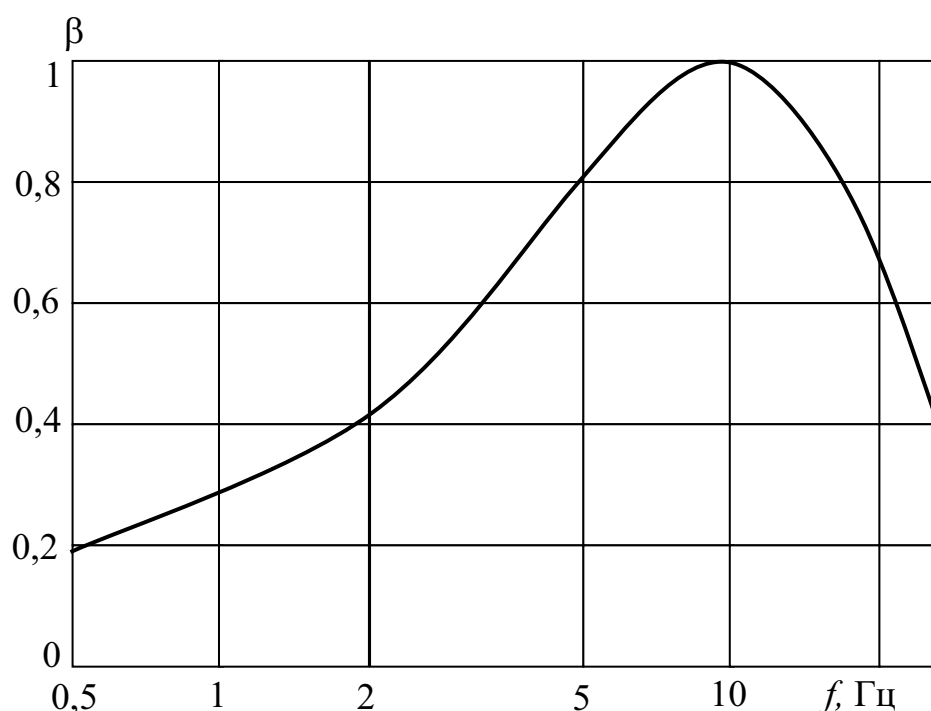
Существуют различные способы оценки допустимых значений колебаний напряжения, обусловленных работой электроприемников, в зависимости от воздействия на человека мерцаний, вызванных этими колебаниями.

В России, например, предельно допустимые размахи изменений напряжения  $\delta U_t$  оцениваются по кривой 2 (рис. 2.2) и предельно допустимыми дозами фликера  $P_{st}$  и  $P_{lt}$  [2].

В Японии для этой цели в качестве эталона приняты колебания напряжения с частотой 10 Гц [9]. Исследованиями установлено, что при эффективном значении напряжения 100 В колебания напряжения с час-



тотой 10 Гц не должны превышать 0,32...0,45 В (0,32 В – среднее значение  $\Delta U_{10\text{ср}}$  и 0,45 В – максимальное значение  $\Delta U_{10\text{мах}}$ , что соответствует 0,32 и 0,45 %). При этом под  $\Delta U_{10}$  понимается амплитуда переменной составляющей напряжения (эффективное значение). Колебания напряжения других частот приводят к частоте 10 Гц с помощью экспериментальной кривой (рис. 2.3), показывающей зависимость относительной чувствительности глаза к колебаниям напряжения от частоты колебаний. При этом чувствительность к колебаниям с частотой 10 Гц принята за единицу. Из кривой следует, что по степени воздействия на зрение человека колебания 1 % при частоте 1 Гц эквивалентны колебаниям 0,26 % при частоте 10 Гц.



*Рис. 2.3. Зависимость относительной чувствительности зрения от частоты колебаний напряжения*

Если имеются колебания разных частот, то уровень колебаний напряжения, приведенный к частоте 10 Гц, определяется по формуле

$$\Delta U_{10} = \sqrt{(\beta_{f1}\Delta U_{f1})^2 + \dots + (\beta_{fn}\Delta U_{fn})^2}, \quad (2.5)$$

где  $\beta_f$  – относительная чувствительность (рис. 2.3);  $\Delta U_f$  – колебания частоты;  $\Delta U_{10}$  – эквивалентное колебание напряжения, приведенное к частоте 10 Гц.

Кроме воздействия на зрение человека колебания напряжения отрицательно сказываются и на работе других потребителей. При глубоких колебаниях напряжения (более 15 %) могут отпасть контакты магнитных пускателей, вызвав тем самым нарушения технологического процесса. Колебания напряжения с размахом 10...15 % могут привести к выходу из строя конденсаторов, а также вентильных выпрямительных агрегатов. Колебания напряжения в сети, питающей дуговые сталеплавильные печи, приводят к увеличению длительности плавки.

На металлургических заводах к числу приемников, чувствительных к колебаниям напряжения, относятся также станы непрерывной прокатки. Для получения качественной продукции недопустимы растяжение или сжатие металла при прокатке. Это требование обеспечивается постоянным соотношением скоростей клетей стана. Колебания напряжения (более 5 %) приводят к рассогласованию скоростей работы приводов клетей стана. Рассогласование приводит к нарушению работы стана, браку и недовыработке продукции.

Заметное влияние оказывают колебания напряжения на асинхронные двигатели небольшой мощности. Колебания не допустимы для текстильного, бумагоделательного и других производств, предъявляющих особенно высокие требования к точности поддержания частоты вращения электроприводов, в качестве которых обычно используются асинхронные двигатели.

Подробно исследовано влияние колебаний напряжения на электролизные установки [9]. При производстве хлора и каустической соды колебания напряжения с размахом  $\pm 5\%$  вызывают 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. Колебания напряжения на заводах химического волокна приводят к колебанию частоты вращения асинхронных двигателей намоточных устройств. В результате чего капроновые нити рвутся или становятся разной толщины – это приводит к браку и недоотпуску продукции.

Колебания напряжения оказывают существенное влияние на контактную сварку. Это воздействие сказывается как на качестве самого сварочного процесса, так и на надежности работы схемы управления сваркой. На качество напряжения в сетях контактной сварки накладываются жесткие ограничения по размаху изменений напряжения:  $\pm 5\%$  для сварки обычных сталей и  $\pm 3\%$  для сварки титановых и других жаропрочных сталей и сплавов. Продолжительность допустимых колеба-

ний 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.

К электроприемникам, чувствительным к колебаниям напряжения, относятся также вычислительные машины, рентгеновские установки, радиостанции, телестанции и т. д. При работе ЭВМ в режиме управления иногда оказывается достаточным одного, двух колебаний с размахом 1...1,5 %, чтобы возник сбой в какой-либо ячейке машины и, как следствие, возникли ошибки в командах управления. Подобный сбой в ЭВМ при производстве расчетов приводит к неадекватным результатам. Поэтому в отечественной и зарубежной практике часто для питания ЭВМ предусматривают автономные источники питания или статические преобразователи-стабилизаторы напряжения.

По вопросу контроля колебаний напряжения согласно ГОСТу 13109-97 необходимо обратиться к литературе [1, 2, 12].

### 2.3. Средства и способы снижения колебаний напряжения

Для снижения влияния резкопеременных нагрузок, вызывающих колебания напряжения, используются различные методы. Наиболее просто цель достигается путем питания электроприемников с резкопеременной нагрузкой от отдельных линий, подключаемых непосредственно к источнику питания, минуя цеховые подстанции.

Совместное питание спокойной  $I_c$  и ударной  $I_y$  нагрузок от одного источника возможно при применении сдвоенного реактора. При этом нагрузки подключают к различным секциям реактора в соответствии с рис. 2.4.

Секции спокойной нагрузки 1 и ударной 2 включены встречно друг другу. Падение напряжения в каждой из них от токов  $I_c$  и  $I_y$  определяется по выражениям:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U} &= j X_L \left( \dot{I}_c - K_M \dot{I}_y \right); \\ \Delta \dot{U} &= j X_L \left( \dot{I}_y - K_M \dot{I}_c \right), \end{aligned} \tag{2.6}$$

где  $X_L$  – индуктивное сопротивление секции реактора;  $K_M = M/L$  – коэффициент взаимоиндукции, равный 0,5...0,6. Как следует из (2.6), применение сдвоенного реактора позволяет снизить колебания напряжения.

Для резкопеременных и спокойных нагрузок в сетях напряжением 6...10 кВ применяют силовые трансформаторы с расщепленными обмотками. При этом к одной ветви обмотки низшего напряжения трансформатора подключают спокойную нагрузку, к другой ветви – резкопеременную.

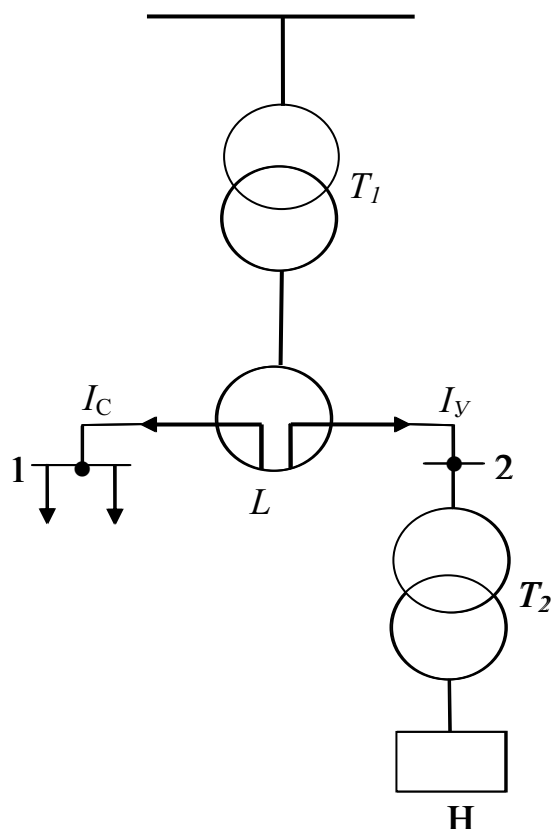


Рис. 2.4. Схема с использованием двойного реактора

Эффективным средством снижения колебаний напряжения является применение синхронных двигателей и синхронных компенсаторов, обладающих естественным регулирующим эффектом.

Снижение колебаний напряжения  $K_u$  за счет естественного регулирующего эффекта электродвигателя приближенно оценивается по выражению

$$K_u = \frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X''_d}, \quad (2.7)$$

где  $X'_d$  и  $X''_d$  – относительные значения переходного и сверхпереходного реактивного сопротивления двигателя по продольной оси.

Применение синхронных машин в режиме перевозбуждения позволяет повысить коэффициент мощности и уровень напряжения в сети, а также снизить уровень несимметрии и несинусоидальности напряжения, что объясняется уменьшением эквивалентного сопротивления обратной последовательности и сопротивлений на частотах гармоник.

Колебания напряжения из-за толчков активной и реактивной нагрузок могут быть ориентировочно рассчитаны по формуле [10]

$$\delta U = (\Delta P R + \Delta Q X) / U^2, \quad (2.8)$$

где  $\Delta P$  и  $\Delta Q$  – изменения (набросы) активной и реактивной мощности, МВт и МВар;  $R$  и  $X$  – активное и реактивное сопротивления на фазу, Ом;  $U$  – линейное напряжение, кВ.

Приведенная формула может быть преобразована к виду [10]

$$\Delta U = \left( \Delta P \frac{R}{X} + \Delta Q \right) / S_k \frac{Z}{X}, \quad (2.9)$$

где  $S_k$  – мощность КЗ (МВ·А) в точке сети, в которой проверяются колебания напряжения;  $Z$  – полное сопротивление, Ом.

Учитывая, что активные сопротивления элементов системы электроснабжения значительно меньше, чем реактивные сопротивления (за исключением кабельных линий) приведенную формулу (2.9) можно существенно упростить

$$\delta U = \pm \Delta Q / S_k. \quad (2.10)$$

Таким образом, как следует из формулы (2.10), величина колебаний напряжения определяется толчком реактивной мощности и мощностью КЗ сети. Следовательно, для ограничения колебаний напряжения приемники с ударной (резкопеременной) нагрузкой надо подключать к сети с наибольшей мощностью КЗ.

При совместном питании дуговой сталеплавильной печи и общецеховой нагрузки колебания напряжения на шинах 6...35 кВ пониженного трансформатора могут быть с достаточной для практики точностью определены по формуле

$$\delta U = \sqrt{3} \Delta I (R \cos \varphi + X \sin \varphi), \quad (2.11)$$

где  $\Delta I$  – бросок тока дуговой печи, А;  $R$  и  $X$  – активное и реактивное сопротивления (Ом) на участке между источником питания и шинами 6...35 кВ.

Пренебрегая активным сопротивлением и принимая  $\varphi = 90^\circ$ , имеем

$$\delta U\% = \frac{\sqrt{3}\Delta IX}{U} \cdot 100. \quad (2.12)$$

Принимая за расчетный размах тока  $100\% I_n$ , получим

$$\Delta I = I_n = S_T / (\sqrt{3}U_n) \cong S_T / (\sqrt{3}U),$$

тогда (2.12), с учетом  $X = U^2 / S_K$ , примет более простой вид

$$\delta U\% = \frac{S_T}{S_K} \cdot 100. \quad (2.13)$$

Как видно, формула (2.13), определяющая колебания напряжения при работе дуговой печи, аналогична формуле (2.10) и показывает, что эти колебания обуславливаются в основном мощностью КЗ.

При совместной работе нескольких дуговых печей необходимо вводить поправочный коэффициент  $k$ , учитывающий возрастание колебаний напряжения при совместной их работе. Для печей одинаковой емкости  $k = \sqrt[4]{n}$ .

В сетях с вентильными преобразователями колебания напряжения могут быть вычислены непосредственно по формуле (2.10). Для таких преобразователей, питающих электроприводы, характерен широкий диапазон изменения напряжения и тока. В связи с этим набросы реактивной мощности  $\Delta Q$  определяются режимом работы преобразователя, т. е. кратностью тока  $I_d / I_{dн}$ , потребляемого преобразователем, и его коэффициентом регулирования по напряжению  $e_d = U_d / E_{do}$  (где  $I_{dн}$  – номинальный выпрямленный ток;  $U_d$  – выпрямленное напряжение преобразователя;  $E_{do}$  – ЭДС преобразователя в режиме холостого хода. С учетом сказанного на основании формулы (2.10) можно оценить необходимую мощность КЗ сети при допустимых колебаниях напряжения по ГОСТ 13109-97.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Какие основные показатели характеризуют колебания напряжения в сети и нормативные требования к ним?
2. Как определяются колебания напряжения по форме напряжения?
3. Каково воздействие фликер-эффекта на зрение человека?
4. Влияние колебаний напряжения на работу потребителей?
5. Назовите основные причины появления колебаний напряжения в сети.
6. Назовите основные средства и способы снижения колебаний напряжения.

### 3. НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В результате интенсификации производственных процессов, совершенствования и внедрения новой технологии на предприятиях все в большей степени применяют вентильные преобразователи, установки однофазной и трехфазной электросварки, мощные электродуговые печи, вольт-амперные характеристики которых нелинейны. Такими же характеристиками обладают и силовые трансформаторы, мощные магнитные усилители, газоразрядные лампы. Характерной особенностью этого оборудования является потребление из сети несинусоидальных токов при подведении к их зажимам синусоидального напряжения.

Несинусоидальные кривые токов можно рассматривать как сложные гармонические колебания, состоящие из совокупности простых гармонических колебаний различных частот. Токи высших гармоник, проходя по элементам сети, вызывают падения напряжения в сопротивлениях этих элементов, которые, накладываясь на основную синусоиду напряжения, приводят к искажению формы кривой напряжения, к нарушению качества электроэнергии в питающей сети, т. е. возникает проблема электромагнитной совместимости электроприемников с питающей их сетью.

#### 3.1. Нормирование показателей несинусоидальных режимов электроснабжения

*Несинусоидальность напряжения* характеризуется следующими показателями:

- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_u$ ;
- коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения  $K_{u(n)}$ .

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения определяется как отношение действующего значения гармонического содержания несинусоидального напряжения к напряжению основной частоты:

$$K_u = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \cdot 100\% \approx \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n U_n^2}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100\%,$$

где  $U_n$  – действующее значение напряжения  $n$ -й гармоники;  $n$  – номер последней из учитываемых гармоник.

При подсчете  $K_u$  допускается не учитывать гармоники, величина которых менее 0,1 %.

Нормально допустимые и предельно допустимые значения [13] коэффициента искажения синусоидальной кривой напряжения в сетях с разными напряжениями приведены в табл. 3.1 в процентах.

**Т а б л и ц а 3.1**

**Коэффициенты искажения синусоидальности напряжения  $K_u$**

Нормально допустимые значения при $U_{ном}$ , кВ				Предельно допустимые значения 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

Нормально допустимые значения коэффициента  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения в точках общего присоединения к электрическим сетям с разными номинальными напряжениями  $U_{ном}$  приведены в табл. 3.2 (в процентах).

Нормально допустимые значения, приведенные для  $n = 3$  и 9, относятся к однофазным сетям. В трехфазных сетях эти значения принимают вдвое меньшими приведенных в табл. 3.2.

Предельно допустимые значения величины коэффициента  $n$ -ой гармонической составляющей принимаются в 1,5 раза большими, чем приведенные в табл. 3.2.

**Т а б л и ц а 3.2**

**Коэффициенты  $n$ -й гармонической составляющей напряжения  $K_{u(n)}$**

Нечетные гармоники, не кратные 3 при $U_{ном}$ , кВ					Нечетные гармоники, кратные 3 при $U_{ном}$ , кВ					Четные гармоники при $U_{ном}$ , кВ				
$n$	0,38	6...20	35	110...330	$n$	0,38	6...20	35	110...330	$n$	0,38	6...20	35	110...330
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						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										
25	1,5	1,0	1,0	0,4										



### 3.2. Влияние высших гармоник на системы электроснабжения

Высшие гармоники приводят к появлению дополнительных потерь в электрических машинах, трансформаторах и сетях; затрудняется компенсация реактивной мощности с помощью батарей конденсаторов; сокращается срок службы изоляции электрических машин и аппаратов; ухудшается работа устройств автоматики, телемеханики, связи [13].

**Потери от высших гармоник в электрических машинах.** Высшие временные гармоники тока вызывают дополнительные потери в обмотках электрических машин. Добавочные потери в стали машин малы и обычно ими пренебрегают.

Основная часть добавочных потерь в синхронных машинах приходится на обмотку статора и демпферную систему. В асинхронных двигателях высокого напряжения потери в обмотках статора и ротора примерно одинаковы. Расчет потерь от высших гармоник достаточно сложен. Поэтому может быть рекомендована оценка потерь по кривым, представленным на рис. 3.1, 3.2. На этих рисунках приведены от-

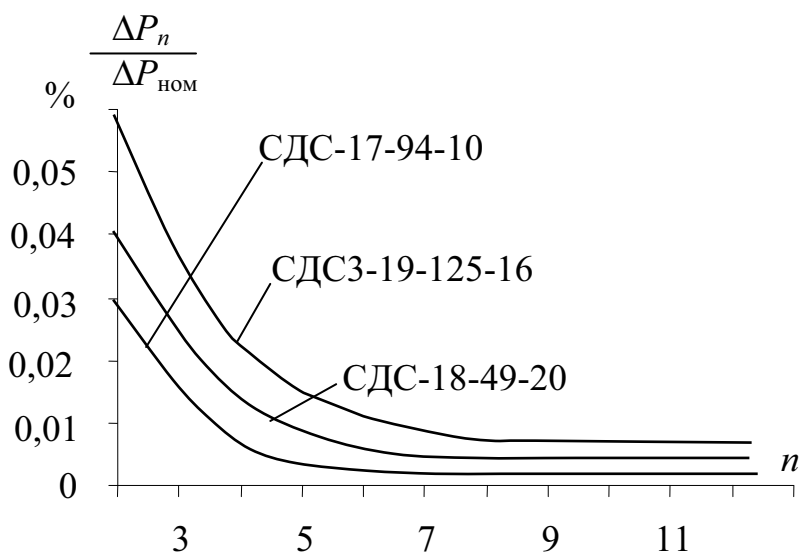


Рис. 3.1. Кривые относительных потерь от высших гармоник в синхронных двигателях

ношения мощности потерь  $\Delta P_n$  при напряжении, равном 1 % напряжения основной гармоники, к суммарным номинальным потерям  $\Delta P_{\text{ном}}$ . Значения  $\Delta P_{\text{ном}}$  приводятся в паспортных данных электродвигателей.

Удельные потери для одной гармоники будут различны для прямовращающегося поля этой гармоники или обратновращающегося. На рисунках даны удельные потери для средних потерь от прямого и обратного следования фаз векторов напряжений высших гармоник.

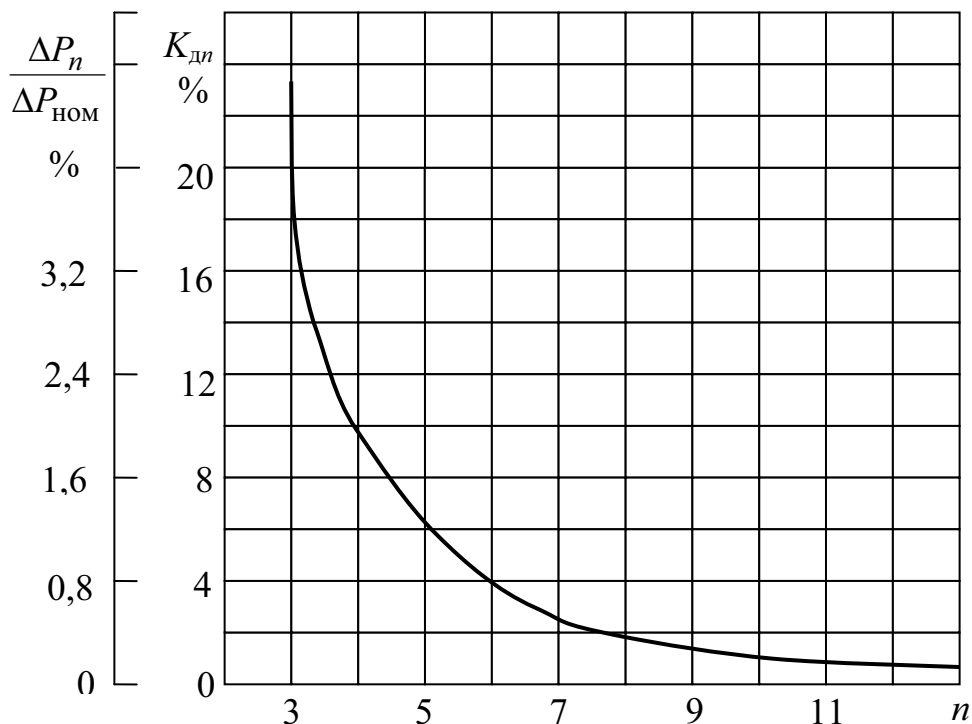


Рис. 3.2. Относительные потери от высших гармоник в АД

Анализируя кривые относительных потерь, нетрудно заметить, что отношение  $\Delta P_n / \Delta P_{НОМ}$  имеет наибольшее значение для гармоник низкого порядка, в первую очередь, второго и третьего. Потери от гармоник выше 13-й малы и ими можно пренебречь.

Суммарные потери  $\Delta P_{\Sigma n}$ , определяемые всеми гармониками напряжения, определяются как

$$\Delta P_{\Sigma n} = \sum_{n=2} \Delta P_n \left( \frac{U_n}{U_1} \right)^2. \quad (3.1)$$

Расчеты показывают, что даже в случаях недопустимых искажений ( $K_u = 10 \dots 15 \%$ ), добавочные потери от временных гармоник в СД с шихтованным статором и ротором не превосходят нескольких процентов номинальных потерь. Поэтому перегрев явнополюсных синхронных двигателей с шихтованными полюсами на практике не наблюдается.

Потери от высших гармоник в СД с массивными полюсами оказываются значительно большими. То же самое относится к синхронным компенсаторам. Работа машин с массивными полюсами от несинусоидального напряжения опасна, так как может перегреться и выйти из строя обмотка возбуждения.

Добавочные потери в асинхронном двигателе от тока  $n$ -й гармоники

$$\Delta P_n = 3 I_n^2 (R_{стn} + R'_{ротn}), \quad (3.2)$$

где  $R_{стn}$  и  $R'_{ротn}$  – активное сопротивление статора и приведенное активное сопротивление ротора на частоте гармоники  $n$ .

При повышенных частотах в обмотках статора и ротора резко проявляется поверхностный эффект и сопротивления увеличиваются, поэтому

$$R_{стn} = R_{ст} \sqrt{n}; \quad R'_{ротn} = R'_{рот} \sqrt{n}. \quad (3.3)$$

Для асинхронных двигателей высокого напряжения можно считать, что  $R_{ст} \cong R'_{рот}$ .

Расчетную формулу для определения суммарных потерь от высших гармоник можно представить в виде

$$\Delta P_{\Sigma n} = \Delta P_{м.ном} K_{\Pi}^2 \sum \left( \frac{U_n}{U_1} \right)^2 (\sqrt{n} + \sqrt{n \pm 1}) = \Delta P_{м.ном} \sum K_{дн}, \quad (3.4)$$

где  $K_{\Pi}$  – кратность пускового тока;  $\Delta P_{м.ном}$  – номинальные потери в меди статора;  $K_{дн}$  – коэффициент, учитывающий возрастание потерь в меди статора за счет  $n$ -й временной гармоники [13].

График зависимости  $K_{дн} = f(n)$  представлен на рис. 3.2. По оси ординат отложены средние значения  $K_{дн}$  для случаев, когда  $n$ -я гармоника тока образует системы прямой и обратной последовательности. При построении кривой принято среднее значение кратности пускового тока  $K_{\Pi} = 5,5$ .

Номинальные потери в меди статора крупных электрических машин в среднем составляют 20 % от общей суммы потерь в двигателе  $\Delta P_{ном}$ . С учетом этого на рис. 3.2 дана вторая ось ординат, на которой представлены дополнительные потери мощности от высших гармоник в соотношении к общим номинальным потерям двигателя  $\Delta P_n / \Delta P_{ном}$ . Использование этих кривых весьма удобно для определения потерь в асинхронных двигателях, обусловленных высшими гармониками.

На предприятиях, как показали обследования [13], перегрев асинхронных электродвигателей в сетях даже с большим уровнем высших гармоник ( $K_u = 10...15\%$ ) не наблюдался ни при номинальной нагрузке, ни при пониженной.

**Потери мощности в трансформаторах.** Потери активной мощности от токов высших гармоник в трансформаторах подсчитываются

по формуле

$$\Delta P_{\Sigma n} = 3 \sum_{n=2} I_n^2 R_k K_{nm}, \quad (3.5)$$

где  $I_n$  – ток  $n$ -й гармоники, проходящий через трансформатор;  $R_k$  – сопротивление к. з. трансформатора при номинальной частоте;  $K_{nm}$  – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления к. з. для высших гармоник за счет поверхностного эффекта и эффекта близости. Для силовых трансформаторов можно принять  $K_{5m} = 2,1$ ;  $K_{7m} = 2,5$ ;  $K_{11m} = 3,2$ ;  $K_{13m} = 3,7$ .

**Потери мощности в конденсаторах.** В диэлектрике конденсаторов от несинусоидального напряжения появляются дополнительные активные потери

$$\Delta P_{\Sigma} = \omega C \operatorname{tg} \delta \sum_{n=1}^{13} n U_n^2, \quad (3.6)$$

где  $\operatorname{tg} \delta$  – коэффициент диэлектрических потерь, принимается одинаковым для всех гармоник до  $n = 13$ ;  $U_n$  – напряжение  $n$ -ной гармоники на шинах после подключения батареи конденсаторов емкостью  $C$ .

Потери в фильтре  $L$ - $C$  слагаются из потерь в реакторе и потерь в конденсаторах на частотах гармоник, на которые настроен фильтр, и 1-й гармоники. Величина потерь от тока  $n$ -ной гармоники может быть подсчитана по формуле

$$\Delta P_{\phi n} = 3 I_n^2 X_p \left( n \operatorname{tg} \delta + \sqrt{n} \operatorname{ctg} \varphi_p \right), \quad (3.7)$$

где  $X_p$  – индуктивное сопротивление реактора для основной гармоники;

$$\operatorname{ctg} \varphi_p = \frac{R}{X_p}.$$

Потери на основной частоте в батарее и реакторе

$$\Delta P_{\phi 1} = U^2 \omega C a^2 \operatorname{tg} \delta + 3 I^2 R_p, \quad (3.8)$$

где  $U$  и  $I$  – линейное напряжение сети и ток в ветви фильтра;  $a = n/(n^2 - 1)$ ;  $n$  – номер гармоники, на которую настроен фильтр.

**Влияние высших гармоник на изоляцию.** Искажение формы кривой напряжения заметно сказывается на возникновении и протекании ионизационных процессов в изоляции электрических машин и трансформаторов. При наличии газовых включений в изоляции возникает ионизация, сущность которой заключается в образовании объемных зарядов и последующей их нейтрализации. Нейтрализация зарядов связана с рассеянием энергии, следствием которого является электрическое, механическое и химическое воздействие на диэлектрик. В результате чего развиваются местные дефекты в изоляции, что приводит к снижению ее

электрической прочности, возрастанию диэлектрических потерь и, в конечном счете, к сокращению срока службы.

Количество разрядов в газовых включениях зависит от формы кривой напряжения, приложенного к изоляции.

Исследования [13] показывают, что при одинаковых амплитудах кривых напряжения  $\text{tg}\delta$  будет большим для кривой заостренной формы и меньшим для уплощенной кривой (в сравнении с синусоидальной). Эти различия будут не столь велики, если произвести сравнения с одинаковыми действующими значениями тех же кривых напряжения.

Практика показывает, что за счет высших гармоник кривые напряжения в промышленных сетях чаще всего принимают более заостренную форму, поэтому наличие высших гармоник приводит к ускоренному старению изоляции электрических машин и трансформаторов.

При наличии высших гармоник в питающей сети процесс старения диэлектрика конденсаторов протекает также более интенсивно по сравнению с работой их при синусоидальном напряжении. Это объясняется тем, что физико-химические процессы в диэлектриках, обуславливающие их старение, значительно ускоряются при высоких частотах. Аналогично влияет дополнительный нагрев, вызванный протеканием высших гармоник тока.

Исследования [13] показали, что, например, при коэффициенте несинусоидальности напряжения 5 %, что допустимо, согласно ГОСТ 13109-97, через 2 года эксплуатации  $\text{tg}\delta$  конденсаторов увеличивается в 2 раза.

При несинусоидальном напряжении сети происходит также ускоренное старение изоляции силовых кабелей. Для подтверждения этого были сопоставлены результаты замеров токов утечки кабелей, работающих практически в одинаковых окружающих условиях. Часть обследованных кабелей работала при практически синусоидальном напряжении, другая – при уровне гармоник в кривой напряжения в пределах 6...8,5 % (преобладали 5-я и 7-я гармоники). Токи утечки во втором случае через 2,5 года эксплуатации оказались в среднем на 36 %, через 3,5 года на 43 % выше, чем в первом [13].

***Влияние высших гармоник на учет электроэнергии.*** Приборы учета электроэнергии при несинусоидальных токах и напряжениях дают большую погрешность. В частности, распространенные индукционные счетчики имеют отрицательную частотную погрешность на частотах высших гармоник (рис. 3.3).

Результирующая погрешность учета электроэнергии, обусловленная несинусоидальностью, равна

$$\gamma_{\Sigma} = \sum_{n=2}^n \Delta P_n^* \gamma_n, \quad (3.9)$$

где  $\Delta P_n^* = \frac{\Delta P_n}{P_1}$ ;  $\gamma_n$  – погрешность для  $n$ -й гармоники;  $P_1, \Delta P_n$  –

мощность на частотах первой и  $n$ -й гармоник соответственно.

Таким образом, при наличии нелинейных электроприемников происходит «переучет» электроэнергии. Например, при больших искажениях напряжения  $K_{нсU} = 7...10\%$ , погрешность измерения может достигать  $4...6\%$ . Наибольшее влияние на погрешность индукционных счетчиков имеют 11 и 13 гармоники. Погрешности учета приводят к нарушению баланса потребляемой электроэнергии ввиду учета электроэнергии различного качества.

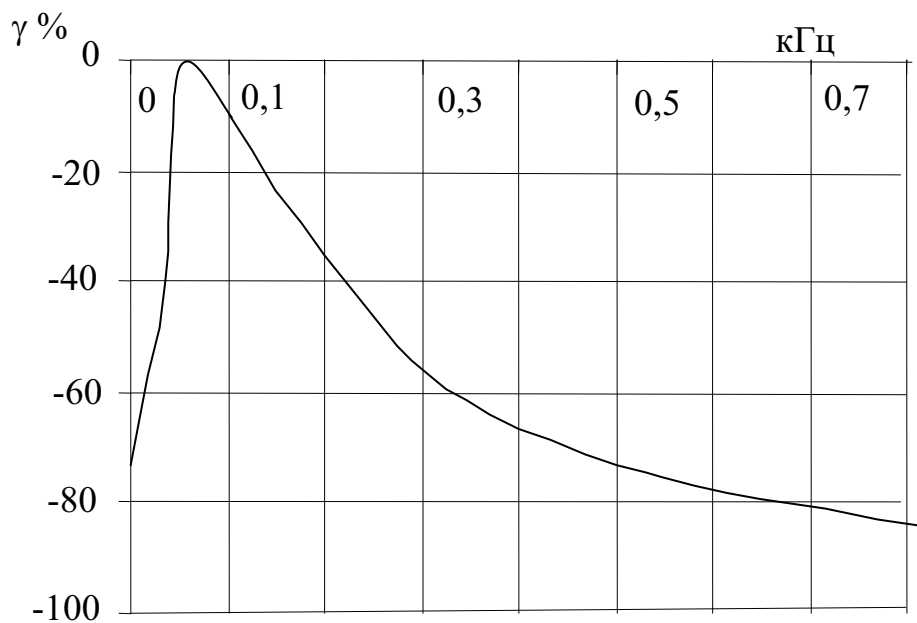


Рис. 3.3. Частотные характеристики счетчика

Большую точность измерения электроэнергии в условиях несинусоидальных режимов обеспечивают электронные счетчики.

Измерение напряжения и тока при наличии высших гармоник также приводит к дополнительным погрешностям.

Высшие гармоники ухудшают работу систем автоматики, телемеханики.

Надежность систем электроснабжения уменьшается.

### 3.3. Основные источники высших гармоник в системах электроснабжения предприятий

**Вентильные преобразователи.** Источниками высших гармоник в системах электроснабжения являются электроприемники с нелинейными характеристиками. Типичной нелинейной нагрузкой являются вентильные преобразователи.

Наиболее распространены вентильные преобразователи, представляющие собой трехфазную мостовую схему (схему Ларионова) (рис. 3.4). Мостовые схемы широко применяются ввиду их хороших энергетических характеристик, а также служат основой для построения более сложных многомостовых преобразователей.

Эта схема выпрямления позволяет осуществить так называемую шестифазную или шестиимпульсную схему выпрямления. Соединение последовательно или параллельно нескольких выпрямительных мостов при питании их напряжением, сдвинутым на соответствующий угол, позволяет получить 12, 18, 24, 48, ...-фазные схемы выпрямления (кратные шести). Сдвиг угла напряжения осуществляется применением соответствующих схем соединения первичных или вторичных обмоток трансформатора.

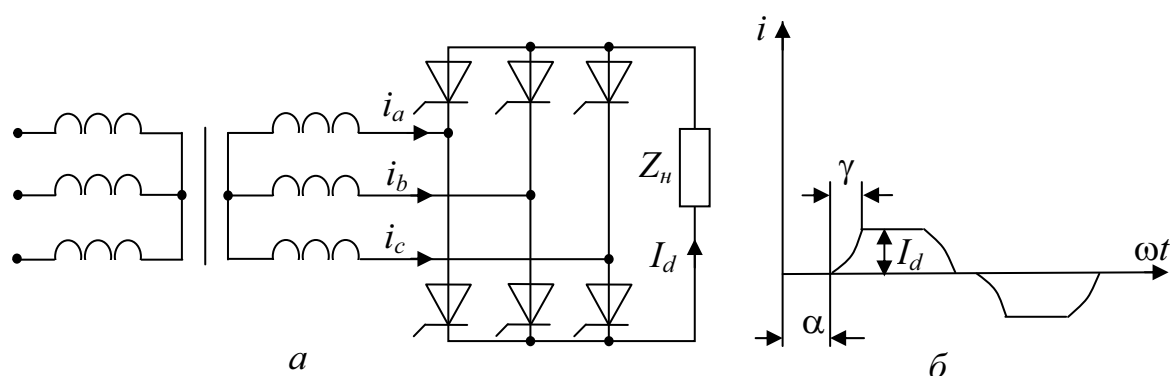


Рис. 3.4. Трехфазная мостовая схема: а – схема; б – диаграмма тока фазы

Кривая фазного тока преобразователя, работающего на активно-индуктивную нагрузку, представляет собой криволинейную трапецию. Форма кривой зависит от углов коммутации  $\gamma$  и управления  $\alpha$  (рис. 3.4, б). Угол коммутации определяется по выражению [13]

$$\gamma = \arccos(\cos \alpha - I_{d*} X_{k*}), \quad (3.10)$$

где  $I_{d*}$  – относительное (в долях номинального) значение выпрямленного тока;  $X_{k*}$  – относительное значение индуктивного сопротивления контура коммутации, приведенное к мощности трансформатора пре-

образователя. Для неуправляемого преобразователя, очевидно,  $\alpha = 0$ ;  $\cos \alpha = 1$ .

В кривой напряжения в процессе коммутации появляются коммутационные искажения, форма, величина и количество которых зависит от схемы выпрямления, количества фаз выпрямления, мощности преобразователей, параметров питающей сети, угла управления преобразователей.

Искаженные кривые напряжения и тока питающей сети в процессе работы преобразователя имеют периодический характер, что позволяет производить их гармонический анализ наличием гармоник кратных основной частоте [9]. Порядок высших гармоник определяется выражением

$$n = mk \pm 1, \quad (3.11)$$

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

Для мостового преобразователя при симметричном управлении, у которого  $m = 6$ , в кривой питающего напряжения имеются нечетные гармоники, не кратные трем:  $n = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, \dots$ ; для 12-фазной схемы  $n = 11, 13, 23, 25, 35, 37, \dots$ ; для 24-фазной схемы  $n = 23, 25, 47, 49, 71, 73$  и т. д.

Амплитуда  $n$ -й гармоники определяется выражением [13]

$$I_n = \sqrt{I_{na}^2 + I_{np}^2}, \quad (3.12)$$

где активная составляющая тока гармоники

$$I_{na} = \frac{2\sqrt{3}E_m}{n\pi X_K} \sin \frac{n\pi}{3} \left\{ \frac{1}{n+1} \sin \left[ (n+1) \frac{\gamma}{2} \right] \sin [(n+1)\Psi] - \right. \\ \left. - \frac{1}{n-1} \sin \left[ (n-1) \frac{\gamma}{2} \right] \sin [(n-1)\Psi] \right\}; \quad (3.13)$$

реактивная составляющая тока гармоники

$$I_{np} = \frac{2\sqrt{3}E_m}{n\pi X_K} \sin \frac{n\pi}{3} \left\{ -\frac{1}{n+1} \sin \left[ (n+1) \frac{\gamma}{2} \right] \cos [(n+1)\Psi] + \right. \\ \left. + \frac{1}{n-1} \sin \left[ (n-1) \frac{\gamma}{2} \right] \cos [(n-1)\Psi] \right\}; \quad (3.14)$$



$E_m$  – амплитуда ЭДС питающей сети;  $\Psi = \alpha + \gamma / 2$  – угол сдвига по фазе между кривыми ЭДС и 1-й гармоники сетевого тока;  $X_k$  – сопротивление контура коммутации.

Для первой гармоники [13]

$$I_{1a} = \frac{3E_m}{2\pi X_k} \sin \gamma \sin 2\Psi; \quad I_{1p} = \frac{3E_m}{2\pi X_k} (\gamma - \sin \gamma \cos 2\Psi).$$

Заметим [13], что действующее значение сетевого тока незначительно (не более чем на 2 %) отличается от соответствующего значения 1-й гармоники.

На рис. 3.5 представлены кривые относительных значений токов гармоник  $I_{n*} = I_n / I_1$  для различных  $n$ . Начальная фаза  $n$ -й гармоники определяется достаточно точно по формуле

$$\Psi_n = n\Psi. \quad (3.15)$$

В практических расчетах  $\Psi$  удобно находить по выражению

$$\Psi = \arccos \frac{U_d}{U_{do}}, \quad (3.16)$$

где  $U_d$  и  $U_{do}$  – средние значения выпрямленного напряжения преобразователя соответственно в режимах нагрузки и холостого хода.

Если пренебречь коммутационными процессами ( $\gamma \approx 0$ ), например, когда мостовой преобразователь подключается без трансформатора к шинам, к которым присоединены также батареи конденсаторов, то кривая сетевого тока приобретает прямоугельно-ступенчатую форму. В этом случае оказывается

$$I_{n*} \approx 4n. \quad (3.17)$$

Эта формула имеет практическое распространение и для случая, когда имеется трансформатор вентильного преобразователя, но значения  $I_{n*}$  оказываются завышенными: для  $n = 5; 7$  погрешность может достигать 10...15 %, для  $n = 11; 13$  – до 20 %. Пользоваться упрощенной формулой для  $n > 13$  не рекомендуется [13].

При работе преобразователя на активную нагрузку (например, печи сопротивления) значения  $I_{n*}$  будут несколько меньшими: при  $\alpha = 0$  оказывается  $I_{5*} = 0,186$ ,  $I_{7*} = 0,113$ ,  $I_{11*} = 0,085$ ,  $I_{13*} = 0,065$ .

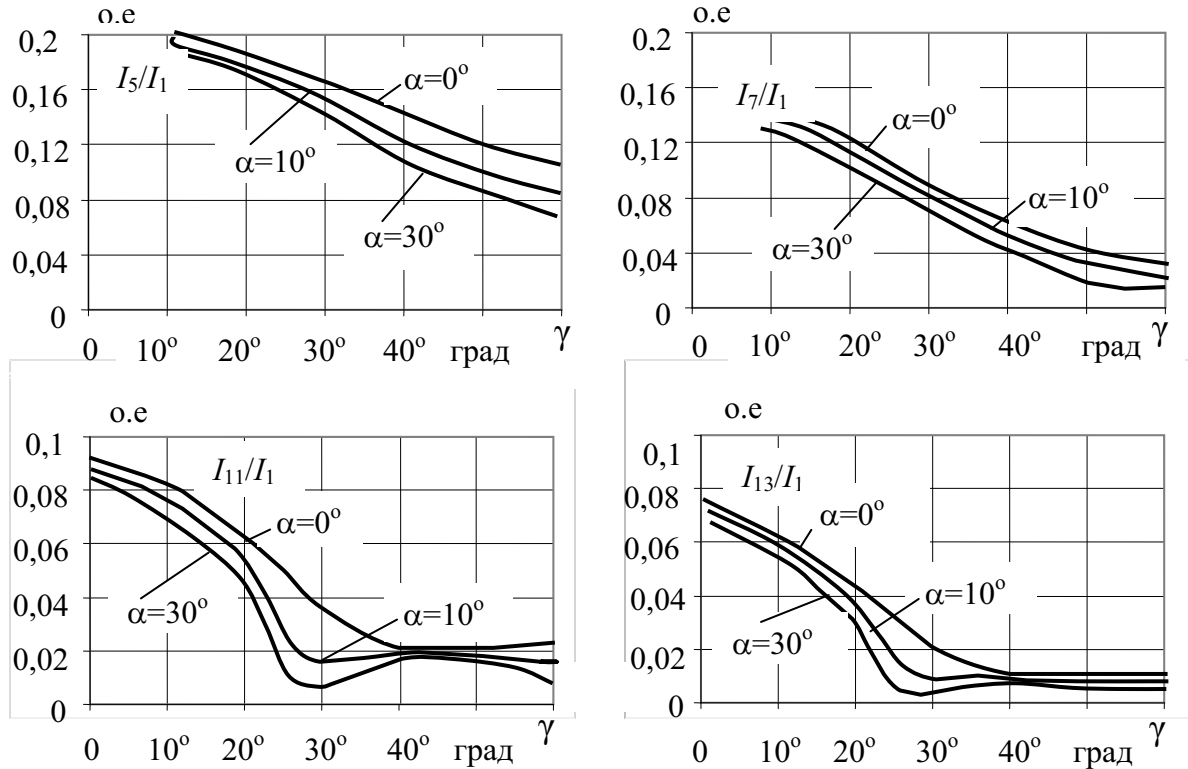


Рис. 3.5. Кривые относительных значений высших гармоник тока трехфазного мостового преобразователя

Относительное (в долях номинального фазного напряжения сети) значение ЭДС  $n$ -й гармоники преобразователя  $E_{n*}$  согласно [13]

$$E_{n*} = \kappa_{\text{пр}} \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{к}}} \xi(n), \quad (3.18)$$

где  $S_{\text{пр}}$  и  $S_{\text{к}}$  – номинальное значение мощности преобразователя и мощности короткого замыкания за его трансформатором;  $\kappa_{\text{пр}}$  – коэффициент загрузки преобразователя до полной мощности. Коэффициент  $\xi(n)$  находится по значению  $I_{n*}$ , определяемым по кривым на рис. 3.5

$$\xi(n) = \frac{nI_{n*}}{1 - nI_{n*}}. \quad (3.19)$$

Значения ЭДС гармоник при  $n = 11; 13$  могут достигать нескольких десятков процентов, а при  $n = 30 \dots 40$  – 2 %.

В переходных режимах работы преобразователя сохраняется то же соотношение между значениями высших гармоник сетевых токов, что и в установившемся [13]. Однако появляются гармоники, кратные

трем, с амплитудой до 0,5 % амплитуды тока основной частоты, и четные гармоники, в первую очередь 2-я и 4-я с амплитудой до 2 %.

Кроме гармонического спектра фазных токов выпрямителя, определяемого схемой выпрямления, существуют так называемые «анормальные» или неканонические высшие гармоники с порядками, не соответствующими числу пульсаций выпрямления.

Причинами возникновения неканонических гармоник являются:

- отклонение углов управления вентилями от номинального значения;
- питание вентильного преобразователя от сети с искаженной формой кривой напряжения;
- питание вентильного преобразователя от сети с несимметрией напряжений.

Обычно неканонические гармоники объясняются случайными явлениями и определяются вероятностными величинами. Распределение их амплитудных значений подчиняется закону Релея, а фаз – закону равной вероятности.

В качестве примера количественной зависимости содержания этих гармоник от погрешности углов управления вентилями можно указать, что погрешность  $\Delta\alpha \leq 3^\circ$  вызывает появление неканонических гармоник на уровне 2...3 % [13]. Так как они малы по сравнению с каноническими, то в дальнейших расчетах их не учитываем.

***Мостовой преобразователь с несимметричным управлением.***

На основе трехфазной мостовой схемы строятся различные преобразователи с улучшенными характеристиками. Например, полууправляемый мостовой преобразователь обеспечивает уменьшение в два раза фазового угла сдвига первой гармоники сетевого тока относительно напряжения  $\varphi_1 \cong \alpha/2$ , где  $\alpha$  – угол управления вентилями. Такие преобразователи находят применение в нереверсивных электроприводах, в системах возбуждения синхронных машин, в сварочных агрегатах и др.

Несимметричное управление вентилей анодной и катодной групп вызывает появление в фазных токах как нечетных, так и четных гармоник. Пренебрегая коммутационными процессами, амплитуды высших гармоник фазных токов можно подсчитать по формулам [13]

$$I_{n*} = \frac{1}{n} \frac{\left| \sin \frac{n\alpha}{2} \right|}{\cos \frac{\alpha}{2}} \quad \text{для } n = 2, 4, 6; \quad (3.20)$$

$$I_{n^*} = \frac{1}{n} \frac{\left| \cos \frac{n\alpha}{2} \right|}{\cos \frac{\alpha}{2}} \quad \text{для } n = 5, 7, 11. \quad (3.21)$$

Следует отметить, что при питании от общих шин двух одинаковых несимметричных мостовых преобразователей, целесообразно включать управляемые вентили в одном преобразователе в анодную группу, в другом – в катодную. Четные гармоники в сетевом токе в этом случае компенсируются.

Другим распространенным вариантом специальной схемы выпрямления является двухмостовая схема с последовательным включением управляемого и неуправляемого мостов. Такая схема характеризуется уменьшением коэффициента несинусоидальности питающего напряжения в два раза по сравнению с управляемым мостом.

При расчете высших гармоник токов двенадцатифазных преобразователей следует учитывать сдвиг фаз одноименных гармоник в частях вентильных обмоток, имеющих разные схемы соединения (треугольник и звезда): токи гармоник с номерами [7]

$$n = 12q \pm 1 \quad (q = 0, 1, 2, \dots)$$

совпадают по фазе, а с номерами

$$n = 6q \pm 1 \quad (q = 1, 3, 5, \dots)$$

находятся в противофазе и взаимно компенсируются. Следовательно, многомостовые преобразователи улучшают гармонический состав токов за счет компенсации 5, 7 гармоник.

**Тиристорные регуляторы мощности.** Они находят широкое применение для регулирования режимов работы нагревательных печей. Мощность установок изменяется в широких пределах, а мощность трансформаторов достигает 2,5 МВ·А [13]. Внедрение тиристоров и их фазовое управление сопровождаются ухудшением энергетических показателей установок и качества электроэнергии.

Рассмотрим работу простейшей схемы питания электропечи сопротивления с тиристорным регулятором мощности, состоящей из последовательно включенных активного сопротивления и управляемых встречно-параллельно включенных тиристоров. На рис. 3.6 представлены однофазная электрическая цепь рассматриваемой установки и диаграммы напряжения и тока. Как видно из диаграммы, ток в цепи пред-

ставляет собой несинусоидальную периодическую функцию в зависимости от времени и определяется углом управления  $\alpha$ .

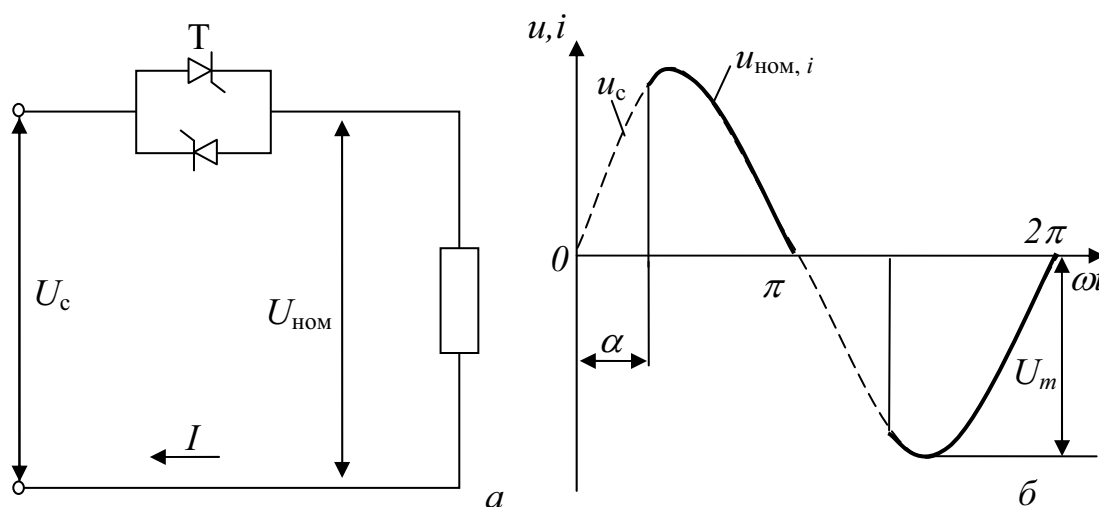


Рис. 3.6. Цепь с ключами и активным сопротивлением:  
а – схема электроснабжения; б – диаграмма напряжения и тока

Гармонический анализ таких функций осуществляется путем представления этих функций тригонометрическим рядом Фурье. Разложение в ряд Фурье является трудоемкой процедурой и поэтому рационально в этом случае воспользоваться упрощенными формулами.

На основании статистической обработки экспериментальных данных предлагаются формулы для приближенного расчета высших гармоник тока, потребляемого печью с тиристорным регулированием режимов [13]

$$I_n = \frac{0,7 S_{\text{ПТ}}}{\sqrt{3} U_{\text{НОМ}} n} \quad \text{для } n = 5, 7, 11, 13;$$

$$I_n = \frac{0,1 S_{\text{ПТ}}}{\sqrt{3} U_{\text{НОМ}} n} \quad \text{для } n = 2, 3, 4,$$
(3.22)

где  $S_{\text{ПТ}}$  – мощность печного трансформатора, кВ·А;  $U_{\text{НОМ}}$  – номинальное напряжение сети.

**Высшие гармоники установок контактной и электродуговой сварки.** Приближенный расчет гармоник тока сварочных машин с тиристорным регулированием режимов работы с помощью симметричной биполярной ячейки возможен по формуле [13]:

$$I_n = \frac{S_{\text{п}} K_3 K_n}{n^2 U_{\text{ном}}} \text{ — для одноточечных машин;} \quad (3.23)$$

$$I_n = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m \frac{S_{\text{п}} K K_3 K_n}{n^2 U_{\text{ном}}} \text{ — для мнооточечных,}$$

где  $S_{\text{п}}$  – паспортная мощность одной сварочной машины или трансформатора многоточечной машины;  $K_3$  – коэффициент загрузки по полной мощности;  $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение машины;  $K$ ,  $m$  – число трансформаторов в одной группе и число групп;  $K_n$  – коэффициент гармоник ( для  $n = 1, 3, 5, 7$ ;  $K_1 = 0,97$ ;  $K_3 = 2,0$ ;  $K_5 = 2,3$ ;  $K_7 = 1,4$ ).

Погрешность расчета по этим формулам не превышает 15 %, гармоники выше 7 можно не учитывать.

В настоящее время распространена сварка на постоянном токе. Сварочные выпрямители выполняются по трехфазной мостовой схеме на неуправляемых вентилях. Рабочим режимом сварочного выпрямителя является трех-трехвентильный режим. Для этого режима высшие гармоники тока могут быть приближенно подсчитаны по формуле [13]

$$I_n = \frac{100}{n^2} \%, \text{ для } n = 5, 7, 11, 13. \quad (3.24)$$

Погрешность такого расчета лежит в пределах 1 %.

Для однофазных сварочных трансформаторов приближенно высшие гармоники тока могут быть подсчитаны как [13]

$$\frac{I_n}{I_1} \approx \frac{0,3}{n^2}. \quad (3.25)$$

Наибольший удельный вес имеет третья гармоника, седьмая и высшие гармоники не превышают 1 %.

**Силовые трансформаторы** являются источниками высших гармоник намагничивающего тока. За счет несимметрии магнитопровода трехфазных трехстержневых трансформаторов действующие значения намагничивающих токов крайних фаз в 1,3...1,35 раза больше намагничивающего тока средней фазы. Поэтому в намагничивающих токах имеются все нечетные гармоники. Наибольшие, кроме первой, – это 3, 5, 7 гармоники.

Действующие значения гармоник намагничивающих токов фаз  $I_{\text{пф}}$  находят как [13]

$$I_{\text{пф}} = I_{\mu} K_{\text{пф}}, \quad (3.26)$$

где  $I_{\mu}$  – номинальное значение намагничивающего тока. Значения коэффициента  $K_{\text{пф}}$  приведены в табл. 3.3.

Т а б л и ц а 3.3

Значение коэффициента  $K_{нф}$ 

№ гармоники	Крайняя фаза	Средняя фаза
3	0,1	0,2
5	0,29	0,22
7	0,12	0,1

При отклонениях напряжения на зажимах трансформатора от номинального на  $\Delta V$  (%) гармоники намагничивающего тока пересчитывают  $I'_{пф} = I_{пф}(1 + \Delta V \cdot \lambda)$ .

Значения коэффициентов  $\lambda$  при  $\Delta V = 1$  % приведены в табл. 3.4.

Т а б л и ц а 3.4

Значение коэффициента  $\lambda$ 

$n$	$U < U_{ном}$	$U > U_{ном}$
1	-0,05	0,12
3	-0,05	0,14
5	-0,05	0,16
7	-0,05	0,2

При возрастании напряжения сверх номинального на 3...5 % уровень гармоник намагничивающего тока возрастает в 1,5...2 раза. При большой установленной мощности трансформаторов цеховых подстанций это может привести к заметному увеличению напряжения высших гармоник в сети.

**Электродуговые сталеплавильные печи** (ЭДСП) представляют собой резкопеременные нагрузки, которые особенно в период расплавления шихты генерируют высшие гармоники тока. Однако по сравнению с вентильными преобразователями уровень гармоник печей в 2...4 раза ниже. Поскольку нелинейность дуги печи зависит от многих факторов: мощности печи, материалов электродов, состава и особенностей подготовки шихты, системы управления режимом горения дуг и др., то прогнозирование уровней высших гармоник расчетными методами весьма затруднено. Поэтому для оценки высших гармоник тока печей рекомендуется пользоваться результатами измерений, приведенными в табл. 3.5 [13].

**Т а б л и ц а 3.5**

**Процентное содержание высших гармоник тока печей**

<i>n</i>	ДСП-5	ДСП-10	ДСП-25	ДСП-50	ДСП-100	ДСП-200
2	7	8	9,5	6,1	5,1	6,8
3	11,2	9,2	4,8	4,4	7,2	5,1
4	2,7	2	4,8	2,9	2,3	4,2
5	8,9	2,8	6	5,4	5,5	2,6
7	4,9	1,6	1,3	5,7	2,1	0,7
9	1,3	0,7	0,2	1,4	1	0,3

**Газоразрядные лампы** находят широкое применение в промышленных и городских осветительных сетях. Их удельный вес достигает 75...80 %. Нелинейность ВАХ цепи дугового разряда ламп является причиной искажения кривой тока, потребляемого из сети. Величина высших гармоник тока приведена в табл. 3.6 [13] в процентах от тока 1-й гармоники.

**Т а б л и ц а 3.6**

**Процентное содержание высших гармоник тока ламп**

<i>n</i>	Люминесцентные светильники с балластным сопротивлением		Светильники с лампами	
	индуктивным	индуктивно-емкостным	ДРЛ с компенс.	ДНаТ с компенс.
3	4	16...21	18	19
5	0,6	0,4...3	5,8...7,2	9,5
7	0,2	0,5...1,2	1...5,2	1...1,4
9	0,2	0,1...0,6	1...1,4	2,4...3
11		0,3...1,1	5,4...8,8	11
13		0,2...0,3	2,6...8,8	4,5...5,9
15		0,2	0,2...0,4	0,4...0,7
17		0,4	1...4,4	6,6...7,4
19		0,5	0,1...1	2,2...3,4
21		0,7	0,8...0,9	0,7...7,2
23			5...9,4	7...10
25			0,1...1	3...10

Тиристорные светорегуляторы для ламп накаливания также обуславливают появление в осветительных сетях высших гармоник. Наибольшую величину имеют гармоники  $n = 3, 5, 7$ , относительные значения которых лежат в пределах 1,5...6 % [13]. В целом, как и для дуговых сталеплавильных печей, гармонический состав тока люминесцентных ламп нестабилен.



### **3.4. Расчет коэффициентов несинусоидальности напряжения в электрической сети**

В настоящее время проблема высших гармоник является одной из важных частей общей проблемы электромагнитной совместимости приемников электроэнергии с питающей электрической сетью.

Перед проектными и эксплуатационными организациями стоят задачи достоверного определения несинусоидальности напряжения, спектрального состава и уровня гармоник тока и напряжения с целью их ограничения.

Ограничение несинусоидальности напряжения с наибольшей эффективностью может быть достигнуто на стадии проектирования электроснабжения предприятий, но требует дополнительных затрат. Поэтому такое ограничение является и технико-экономической проблемой, которую нельзя решать в отрыве от задачи компенсации реактивной мощности. Это объясняется тем, что компенсирующие устройства с емкостной схемой замещения (например, конденсаторные батареи, фильтры высших гармоник) в сочетании с индуктивным сопротивлением питающей сети могут приводить к резонансу в сети на высокой частоте, а следовательно, к увеличению отдельных гармоник тока и напряжения до недопустимой величины.

На практике широкое распространение получил метод непосредственного определения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_u$  при работе преобразователей, основанный на гармоническом анализе коммутационных импульсов (провалов и выбросов) [9, 13]. Наиболее обстоятельно с примерами этот метод изложен в [9], материалами которого и воспользуемся в дальнейшем.

#### **3.4.1. Метод расчета несинусоидальности напряжения по коммутационным искажениям при работе вентильных преобразователей**

В настоящее время, как отмечалось выше, самой распространенной схемой выпрямления для мощных преобразователей является трехфазная мостовая схема (схема Ларионова). Эта схема выпрямления позволяет осуществить так называемую шестифазную или шестиимпульсную схему выпрямления. Соединение последовательно или параллельно нескольких таких мостов при питании их напряжением, сдвинутым на соответствующий угол, позволяет получить многофазные (кратные шести) схемы выпрямления.

Схема питания мощного вентиляльного преобразователя и схема замещения питающей сети показаны на рис. 3.7. В зависимости от последовательности чередования фаз, угла управления, мощности, потреб-

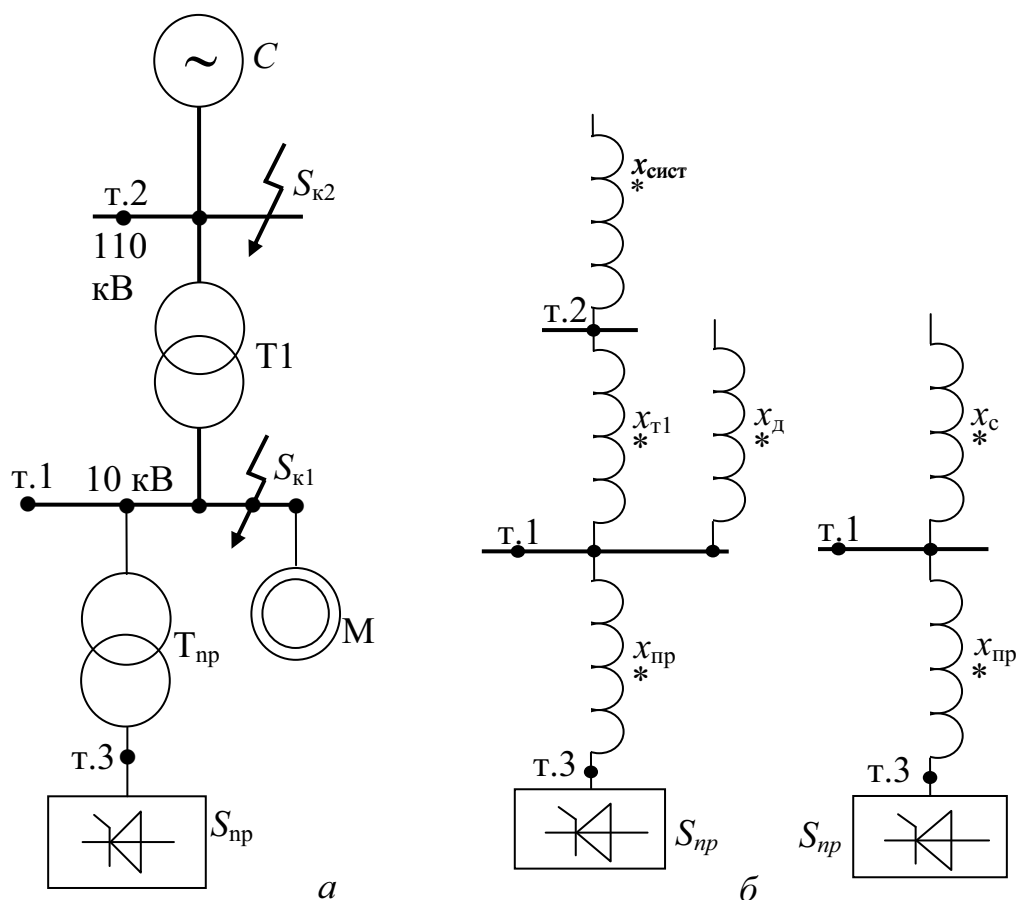


Рис. 3.7. Однолинейная схема питания мощного вентиляльного преобразователя (а) и схема замещения (б)

ляемой преобразователем  $S_{пр}$  и параметров питающей сети коммутационные искажения имеют вполне определенный вид и расположение на кривой напряжения питающей сети. Коммутационные искажения, например, для шестифазной мостовой схемы выпрямления показаны на рис. 3.8. Питание преобразователя осуществлено от трансформаторов со схемой соединения  $\lambda/\lambda$  и  $\lambda/\Delta$ .

Методика расчета коэффициента несинусоидальности  $K_u$  основывается на вычислении в любой точке питающей сети действующих значений коммутационных искажений напряжения, что равносильно учету всех высших гармоник. Следовательно, для определения  $K_u$  при работе вентиляльных преобразователей нет необходимости определять уровни отдельных гармоник. Кроме того, при несимметричном

управлении преобразователем из-за несимметрии гармоник сетевых токов оценка  $K_u$  по выражениям, основным на значениях гармоник тока, сопряжена со значительными погрешностями.

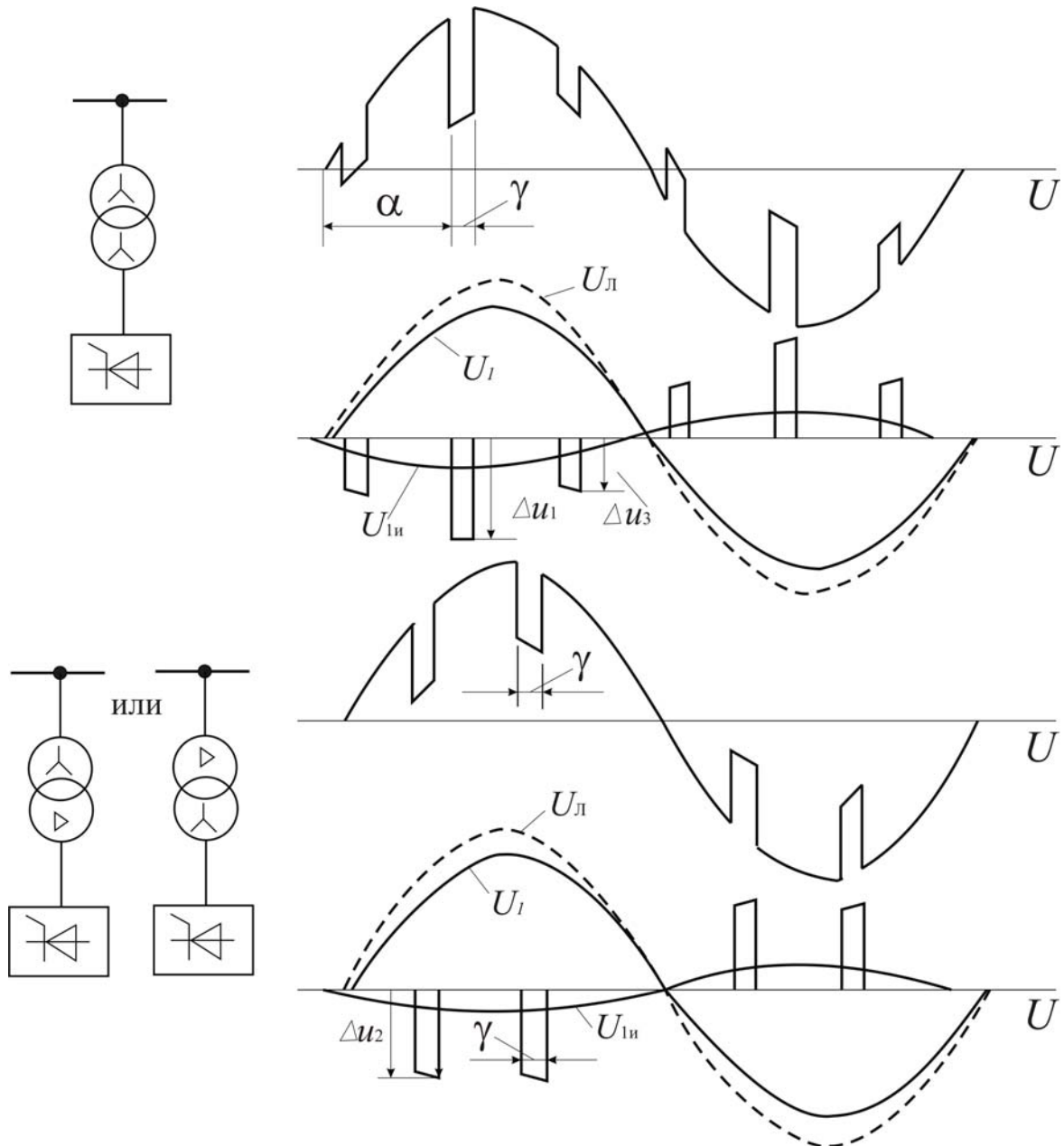


Рис. 3.8. Коммутационные искажения в кривой напряжения при 6-фазной схеме выпрямления

Использование данного метода позволяет избежать ошибки, возникающей при учете только определенного числа высших гармоник. На рис. 3.9 и рис. 3.10 приведены кривые, наглядно иллюстрирующие ошибку, которая получается при вычислении  $K_u$

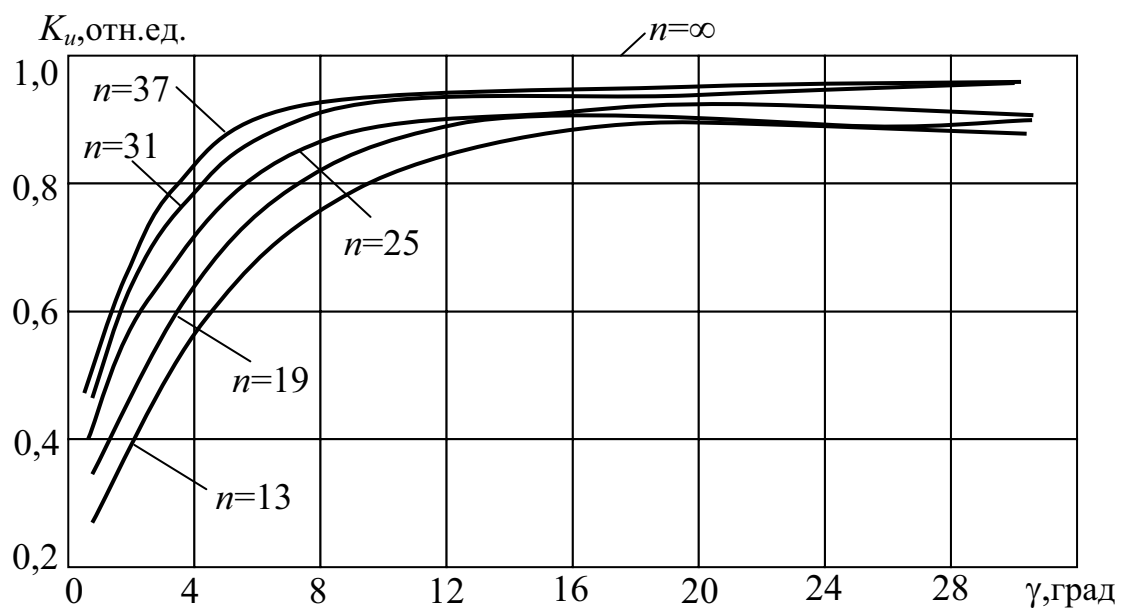


Рис. 3.9. Зависимость  $K_u=f(\gamma)$  при учете различного числа высших гармоник для 6-фазной схемы выпрямления преобразователя

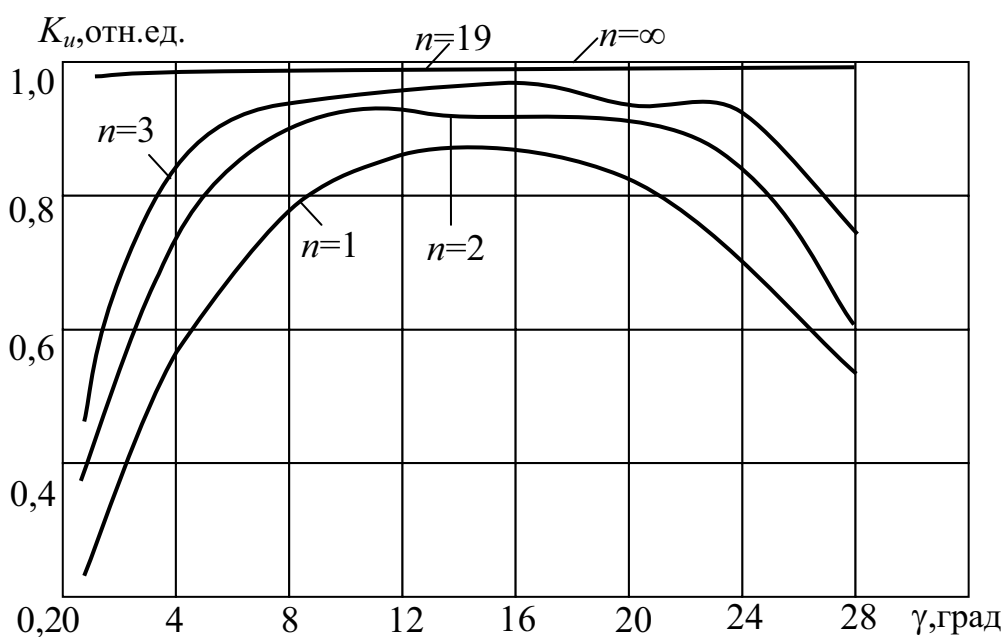


Рис. 3.10. Зависимость  $K_u=f(\gamma)$  при учете различного числа высших гармоник для 12-фазной схемы выпрямления преобразователя

с учетом только определенного числа гармоник по отношению к  $K_u$ , вычисляемых с учетом всех высших гармоник до  $n = \infty$  по соотношению

$$K_u = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^n U_n^2}{2}}}{U_1} : \frac{\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{n=\infty} U_n^2}{2}}}{U_1}.$$

На основании кривых очевиден вывод, что известное положение о возможности ограничить верхний предел суммирования высших гармоник гармоникой  $n = 13$  ошибочно. Такое ограничение тем более неприемлемо для схем преобразователей с фазностью выпрямления более 12, где, согласно (3.11), высшие гармоники порядка  $n \leq 13$  вообще отсутствуют.

Методика позволяет вычислять  $K_u$  в любой точке питающей сети, используя параметры, полученные при вычислении токов КЗ, и основывается на следующих допущениях: проводимости элементов питающей сети считаются неемкостными. При этом допущении ошибка в расчете не превышает 10...15 %. Предполагается, что в узлах сети, расположенных в непосредственной близости от вентильных преобразователей, отсутствуют БК, предназначенные для компенсации реактивной мощности. Не учитываются аномальные гармоники.

Как указывалось ранее, коэффициент несинусоидальности напряжения питающей сети определяется по формуле

$$K_u = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2}{2}}}{U_1} \approx \frac{\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^n U_n^2}{2}}}{U_{\text{НОМ}}}. \quad (3.27)$$

При работе вентильного преобразователя  $K_u$  определяется в следующей последовательности:

- вычисляется действующее значение коммутационных искажений  $U_{\text{и}}$ ;
- определяется первая гармоника напряжения в коммутационных искажениях  $U_{\text{и}1}$  (рис. 3.8);
- рассчитывается действующее значение всех высших гармонических (кроме первой) в коммутационных искажениях по формуле

$$U_{n\Sigma} = \sqrt{\sum_{n=m-1}^{\infty} U_n^2} = \sqrt{U_{\text{и}}^2 - U_{\text{и}1}^2}; \quad (3.28)$$

- определяется первая гармоника в искаженной кривой питающего напряжения (рис. 3.8) как

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_л + \bar{U}_{и1}, \quad (3.29)$$

где  $\bar{U}_л$  – действующее значение неискаженной кривой напряжения или огибающей кривой линейного напряжения;

- по формуле (3.27) определяется  $K_u$ .

Расчеты несинусоидальности напряжения питающей сети обычно выполняются при проектировании электроснабжения, поэтому необходимы соотношения между углом управления  $\alpha$  и углом коммутации  $\gamma$ , применяемыми и в электроприводе, и параметрами питающей сети. Согласно [13]

$$\varphi = \alpha + \frac{\gamma}{2}, \quad (3.30)$$

где  $\varphi$  – угол сдвига между первой гармоникой напряжения, приложенного к преобразователю, и первой гармоникой тока, потребляемого преобразователем. Тогда можно записать

$$\cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right) = \cos \varphi = \frac{P_{пр}}{S_{пр}}; \quad (3.31)$$

$$\sin \varphi = \frac{Q_{пр}}{S_{пр}}, \quad (3.32)$$

где  $P_{пр}$  – активная мощность, потребляемая преобразователем на стороне переменного напряжения;  $Q_{пр}$  – реактивная мощность, потребляемая преобразователем из сети;  $S_{пр}$  – полная мощность, потребляемая преобразователем.

Для углов  $\alpha$  и  $\gamma$  существует соотношение

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{2I_d X_\Sigma}{U_{лmax}}, \quad (3.33)$$

где  $I_d$  – выпрямленный ток;  $X_\Sigma$  – индуктивное сопротивление цепи коммутации;  $U_{лmax}$  – амплитуда питающего линейного напряжения.

После преобразований и упрощений формула (3.33) получает простой вид для угла коммутации при работе преобразователей с любой последовательностью чередования фаз

$$\gamma \approx \frac{6}{m} \frac{X_{\Sigma}}{\sin \varphi}, \quad (3.34)$$

где  $X_{\Sigma}$  – эквивалентное индуктивное сопротивление цепи коммутации в относительных единицах, приведенное к полной мощности преобразователя  $S_{\text{пр}}$ .

Общий коэффициент несинусоидальности питающей сети при работе вентильных преобразователей с некоторыми упрощениями и с достаточной для инженерных расчетов точностью может быть определен по формуле

$$K_u = X_{c*} \sqrt{\frac{3}{\pi} \cdot \frac{\sin \varphi}{X_{c*} + X_{\text{пр}*}} - \frac{9}{\pi^2}} = \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{к}}} \sqrt{0,955 \frac{\sin \varphi}{\frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{к}}} + X_{\text{пр}*}} - 0,91}, \quad (3.35)$$

где  $X_{c*} = S_{\text{пр}} / S_{\text{к}}$  – эквивалентное сопротивление системы в относительных единицах, приведенное к мощности преобразователя  $S_{\text{пр}}$ , т. е. сопротивление от условной точки сети бесконечной мощности до точки сети, в которой определяется  $K_u$ ;  $S_{\text{к}}$  – мощность КЗ в точке, в которой определяется  $K_u$ ;  $X_{\text{пр}}$  – индуктивное сопротивление цепи преобразователя в относительных единицах, приведенное к  $S_{\text{пр}}$ , т. е. сопротивление от точки возникновения коммутационных КЗ до точки, в которой определяется  $K_u$ .

Приведенная формула справедлива для преобразователей с любой последовательностью чередования фаз.

При определении  $K_u$  особое внимание необходимо обратить на  $X_{\text{пр}}$ . Чаще всего требуется определить  $K_u$  на шинах питания мощных тиристорных преобразователей. Под преобразователем подразумеваются выпрямительный мост (или их группа) и питающий понижающий трансформатор.

В этом случае  $X_{\text{пр}}$  равно сопротивлению преобразовательного трансформатора и определяется по формуле

$$X_{\text{пр}*} = X_{\text{т}*} = \frac{U_{\text{к}} \%}{100} \left( 1 + \frac{K_{\text{п}}}{4} \right) \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{ном.т}}}, \quad (3.36)$$

где  $S_{\text{ном.т}}$  – номинальная мощность преобразовательного трансформатора;  $K_p$  – коэффициент расщепления обмоток этого трансформатора;  $U_k\%$  – сквозное напряжение КЗ трансформатора, приведенное к полной номинальной мощности трансформатора.

Для двухобмоточных трансформаторов, применяемых в трехфазных мостовых схемах выпрямления,  $K_p = 0$  и тогда

$$X_{\text{пр}*} = \frac{U_k\% S_{\text{пр}}}{100 S_{\text{ном.т}}}. \quad (3.37)$$

Для трехобмоточных трансформаторов, применяемых в преобразователях, выполненных по двенадцатифазной схеме, в общем виде

$$K_p = \frac{U_{\text{к(нн1-нн2)}}}{U_k}, \quad (3.38)$$

где  $U_{\text{к(нн1-нн2)}}$  – напряжение КЗ между расщепленными вторичными обмотками трансформатора.

В общем случае для трансформаторов с расщепленными обмотками  $K_p = 0 \dots 4$ . Если ветви низшего напряжения трансформатора имеют хорошую электромагнитную связь друг с другом, то  $K_p = 0$ . Если обмотки НН не имеют магнитной связи друг с другом или преобразователь выполнен по схеме с двумя трансформаторами, имеющими разные схемы соединения, то  $K_p = 4$ .

### **3.4.2. Инженерный (упрощенный) метод расчета составляющих гармонического спектра вентильных преобразователей**

Упрощающим и вносящим некоторую погрешность допущением в приближенном методе расчета является допущение прямоугольности формы коммутационных искажений (рис. 3.8). Ошибка, вызванная этим допущением, зависит от углов управления  $\alpha$  и коммутации  $\gamma$ .

Чем меньше угол  $\alpha$  и больше угол  $\gamma$ , тем больше погрешность в определении гармоник напряжения и тока. В общем случае для управляемых выпрямителей эта ошибка не превышает 10 %, что вполне допустимо для практических расчетов.

Действующее значение высшей гармоники напряжения в любой точке питающей сети при работе преобразователя с любой последова-



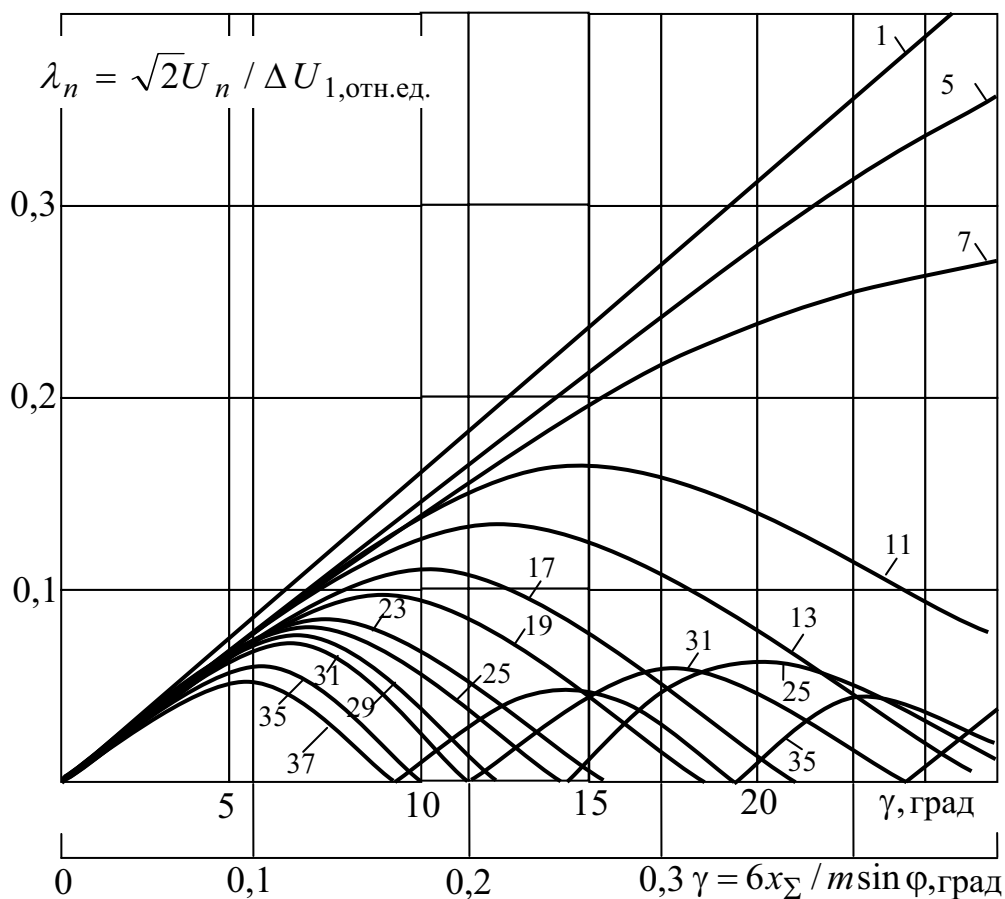
тельностью чередования фаз выпрямления может быть определено по формуле

$$U_n = \frac{m}{\pi n} U_{\text{л}} \frac{X_c^*}{X_c^* + X_{\text{пр}}^*} \sin \varphi \cdot \sin \left( \frac{3n X_{\Sigma}^*}{m \sin \varphi} \right). \quad (3.39)$$

Действующее значение тока любой гармоники в цепи преобразователя определяется из выражения

$$I_n = \frac{m}{\sqrt{3\pi}} \frac{S_{\text{пр}}}{U_{\text{л}} X_{\Sigma}^* n^2} \sin \varphi \cdot \sin \left( \frac{3n X_{\Sigma}^*}{m \sin \varphi} \right). \quad (3.40)$$

Для определения действующего значения отдельных высших гармоник напряжения в любой точке питающей сети на рис. 3.11



3.11. Номограммы для определения отдельных гармоник напряжения при работе вентильных преобразователей

представлена серия кривых. Эти кривые представляют собой зависимость  $\lambda_n = f(\gamma)$ , где  $\lambda_n = \sqrt{2}U_n / \Delta U_1$  есть отношение амплитуды  $n$ -й гармоники к глубине основного коммутационного искажения в о.е.

Для определения действующего значения  $n$ -й гармоники напряжения необходимо по формуле (3.34) найти угол коммутации  $\gamma$ . Для найденного значения  $\gamma$  по кривой, соответствующей  $n$ -й гармонике, определяется коэффициент  $\lambda_n$ , после чего действующее значение  $n$ -й гармоники определяется из выражения

$$U_n = \lambda_n \frac{m \Delta U_1}{6 \sqrt{2}}, \quad (3.41)$$

где  $\Delta U_1 = \sqrt{2}U_{л} \frac{X_c}{X_c + X_{пр}} \sin \varphi$  есть глубина основного коммутационного искажения в отн. ед.;  $\varphi = \alpha + \frac{\gamma}{2}$ .

### 3.4.3. Определение коэффициента несинусоидальности при работе группы преобразователей

При работе группы вентильных преобразователей порядок расчета  $K_u$  следующий. По приведенным формулам или по кривым рис. 3.11 определяются уровни высших гармоник напряжения для каждого преобразователя, а также их углы  $\varphi_n \approx \varphi_1 n$ .

Одинаковые гармоники напряжения всех преобразователей геометрически суммируются

$$\bar{U}_{n\Sigma} = \sum_{i=1}^k \bar{U}_{ni}, \quad (3.42)$$

где  $k$  – число одинаковых гармоник преобразователей.

Коэффициент несинусоидальности группы работающих преобразователей затем определяется по формуле

$$K_{u\Sigma} = \frac{\sqrt{\sum_{n=5}^p U_{n\Sigma}^2}}{U_1}, \quad (3.43)$$

где  $p$  – число групп одинаковых гармоник.

Необходимо обращать особое внимание на количество учитываемых гармоник. Чем больше количество преобразователей и фаз выпрямления, тем большее количество гармоник необходимо учитывать. С этой целью предлагается следующая эмпирическая формула

$$P = n_{\max} = 4km + 1, \quad (3.44)$$

где  $n_{\max}$  – наибольшая учитываемая гармоника;  $k$  – число работающих преобразователей;  $m$  – число фаз выпрямления.

Как видно из (3.44) при большом числе преобразователей необходимо учитывать достаточно большое число высших гармоник. При этом трудоемкость расчетов значительно возрастает. Поэтому при работе группы преобразователей стремятся выявить некоторые закономерности, которые позволяют определить  $K_u$  более простым способом.

1. Так, если схемы преобразователей одинаковы и в то же время углы управления и коммутации для 6 и 12-фазных схем выпрямления имеют такие соотношения, что коммутационные искажения отдельных преобразователей не накладываются друг на друга, то  $K_u$  вычислить можно достаточно просто. В этом случае  $K_u$  вычисляется от каждого преобразователя в отдельности, а общий коэффициент несинусоидальности вычисляется по формуле

$$K_{u\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^k K_{ui}^2}. \quad (3.45)$$

2. Схемы соединения трансформаторов преобразователей одинаковы, преобразователи работают синфазно, т. е.  $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_n$  или  $\cos\varphi_1 = \cos\varphi_2 = \dots = \cos\varphi_n$ , трансформаторы преобразователей имеют одинаковые параметры. В этом случае коммутационные искажения всех преобразователей накладываются друг на друга, все гармоники складываются арифметически и расчет  $K_u$  сводится к расчету одного эквивалентного преобразователя со следующими параметрами:

$$S_{\text{пр.эк}} = \sum_{i=1}^n S_{\text{ном.пр}i}; \quad S_{\text{т.эк}} = \sum_{i=1}^n S_{\text{ном.т}i};$$

$$\cos\varphi_{\text{эк}} = \cos\varphi_n; \quad U_{\text{к.эк}} = U_{\text{к.т}i}.$$

3. Схемы трансформаторов преобразователей одинаковы, углы управления преобразователями одинаковы, т. е.

$$\cos\varphi_1 = \cos\varphi_2 = \dots = \cos\varphi_n.$$

В то же время  $S_{\text{НОМ.Т1}} \neq S_{\text{НОМ.Т2}} \neq \dots \neq S_{\text{НОМ.Тn}} ; U_{\text{к.Т1}} \neq U_{\text{к.Т2}} \neq \dots \neq U_{\text{к.Тn}} .$   
 В этом случае параметры эквивалентного преобразователя будут определяться следующими соотношениями:

$$S_{\text{пр.ЭК}} = \sum_{i=1}^n S_{\text{пр.}i} ; S_{\text{т.ЭК}} = \sum_{i=1}^n S_{\text{НОМ.Т}i} ;$$

$$U_{\text{к.ЭК}} = \frac{S_{\text{т.ЭК}}}{\frac{S_{\text{НОМ.Т1}}}{U_{\text{к.Т1}}} + \frac{S_{\text{НОМ.Т2}}}{U_{\text{к.Т2}}} + \dots + \frac{S_{\text{НОМ.Тn}}}{U_{\text{к.Тn}}}} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{\text{НОМ.Т}i}}{\sum_{i=1}^n \frac{S_{\text{НОМ.Т}i}}{U_{\text{к.Т}i}}} .$$

Перечисленные случаи не охватывают всех возможных вариантов работы вентильных преобразователей. В общем случае работа вентильных преобразователей носит случайный характер, особенно при независимых технологических процессах. В этих случаях с достаточной для инженерных расчетов точностью можно определить коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения в расчетной точке от каждого индивидуального преобразователя, а общий коэффициент определить по выражению (3.45).

**Пример 3.1.** Определить коэффициент несинусоидальности  $K_u$  на секциях 10 и 110 кВ (см. рис. 3.7). Преобразователь выполнен по 6-фазной мостовой схеме.

Система :  $S_{\text{к2}} = 2000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ;  
 трансформатор Т1:  $40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ,  $U_{\text{к}} = 10,5 \%$ ;  
 синхронный двигатель М:  $S_{\text{НОМ.д}} = 12 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ,  $x_d'' = 0,15 \text{ отн. ед.}$  ;  
 трансформатор преобразователя Т2:  $24 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ,  $U_{\text{к}} = 14 \%$ ;  
 нагрузка преобразователя:  $S_{\text{пр}} = 25 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ,  $\cos \varphi = 0,8$ ;  
 мощность КЗ на секции 10 кВ:  $S_{\text{к1}} = 405 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ .

**Решение.** Все сопротивления элементов сети приводятся к расчетной мощности преобразователя  $S_{\text{пр}} = 25 \text{ МВ} \cdot \text{А}$

$$x_{\text{сист}}^* = \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{к2}}} = \frac{25}{2000} = 0,0125 ;$$

$$x_{\text{Т1}}^* = \frac{U_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{НОМ.Т1}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{25}{40} = 0,0656 ;$$

$$x_{\text{д}}^* = x_d'' \cdot \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{НОМ.д}}} = 0,15 \cdot \frac{25}{12} = 0,312 ;$$

$$x_{c*} = \left( x_{\text{сист}*} + x_{\text{т1}*} \right) \parallel x_{\text{д}*} = (0,0125 + 0,0656) \parallel 0,312 = 0,062$$

$$\text{или } x_{c*} = \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{к1}}} = \frac{25}{405} = 0,062;$$

$$x_{\text{пр}*} = x_{\text{т2}*} = \frac{U_{\text{к}}}{100} \left( 1 + \frac{K_{\text{р}}}{4} \right) \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{ном.т2}}} = \frac{14}{100} \left( 1 + \frac{0}{4} \right) \frac{25}{24} = 0,146;$$

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = \sqrt{1 - (0,8)^2} = 0,6.$$

Так как выполняется условие  $\frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{к1}}} \leq 0,1$ , то для определения  $K_u$  на секции 10 кВ (рис. 3.7) можно использовать формулу (3.35)

$$K_{u,\text{т.1}} = \sqrt{\frac{3}{\pi} \cdot \frac{(0,062)^2 \cdot 0,6}{0,062 + 0,146} - \frac{9}{\pi^2} (0,062)^2} = 0,0835;$$

$$K_{u,\text{т.1}} = 8,35 \%$$

Зная  $K_u$  на секции 10 кВ (точка т.1) можно определить несинусоидальность в любой другой точке сети. Несинусоидальность на секции 110 кВ (точка т.2 на рис. 3.7)

$$K_{u,\text{т.2}} = K_{u,\text{т.1}} \cdot \frac{x_{\text{сист}*}}{x_{\text{сист}*} + x_{\text{т1}*}} = 8,35 \cdot \frac{0,0125}{0,0125 + 0,0656} = 1,34 \%$$

**Пример 3.2.** Схема питания преобразователей, параметры элементов сети и схема замещения приведены на рис. 3.12. Определить коэффициент несинусоидальности напряжения  $K_{u\Sigma}$  в точке 1.

**Решение.** Отдельно определяются  $K_u$  от каждого преобразователя в точке 1.

Параметры схемы для определения  $K_{u1}$  от первого преобразователя

$$x_{\text{сист}}^* \frac{S_{\text{пр1}}}{S_{\text{к2}}} = \frac{10}{2000} = 0,005;$$

$$x_{\text{T1}}^* = \frac{U_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_{\text{пр1}}}{S_{\text{НОМ.Т1}}} = \frac{10,5 \cdot 10}{100 \cdot 40} = 0,0262;$$

$$x_{\text{с1}}^* = x_{\text{сист}}^* + x_{\text{T1}}^* = 0,005 + 0,0262 = 0,312;$$

$$x_{\text{пр1}}^* = x_{\text{T2}}^* = \frac{U_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_{\text{пр1}}}{S_{\text{НОМ.Т2}}} = \frac{7 \cdot 10}{100 \cdot 16} = 0,0437.$$

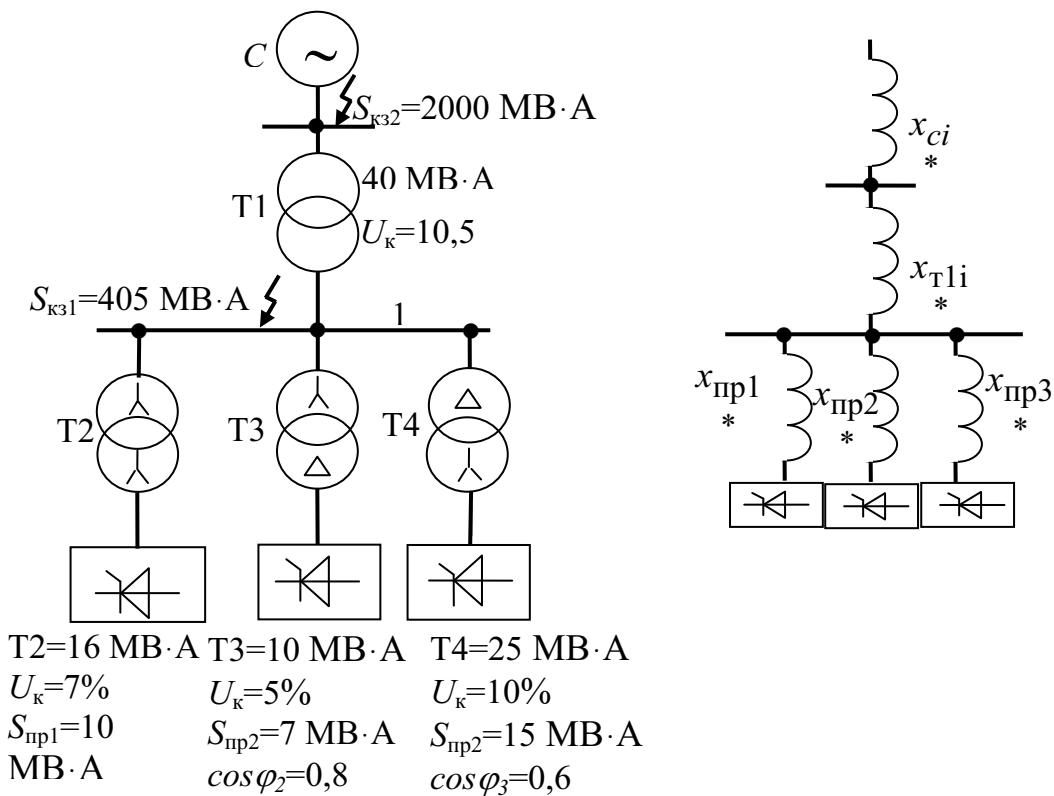


Рис. 3.12. Схема замещения к примеру 3.2

По формуле (3.35) находим  $K_{u1} = 8,7 \%$ .

Для второго преобразователя находим аналогично

$$x_{\text{с2}}^* = 0,0219; \quad x_{\text{пр2}}^* = 0,035; \quad K_{u2} = 6,6 \%$$

Для третьего преобразователя

$$x_{c3} = 0,0469; \quad x_{пр3} = 0,06; \quad K_{u3} = 12,2 \% .$$

Общий коэффициент несинусоидальности от работы трех преобразователей определим по формуле (3.45)

$$K_{u\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 K_{ui}^2} = \sqrt{(8,7)^2 + (6,6)^2 + (12,2)^2} = 16,3 \% .$$

#### 3.4.4. Расчет несинусоидальности напряжения при работе дуговых сталеплавильных печей

Уровень высших гармоник тока при работе дуговых сталеплавильных печей (ДСП) сравнительно невелик, как отмечалось выше, по сравнению с высшими гармониками, генерируемыми вентильными преобразователями. Однако с ними необходимо считаться, так как мощности дуговых печей постоянно растут.

Возникновение высших гармоник в питающих электрических сетях при работе ДСП носит случайный характер и не поддается аналитическому описанию. Поэтому в основном они определяются экспериментально и представляются в виде таблицы 3.5.

На основании экспериментальных исследований получено соотношение для определения максимальных значений уровней отдельных гармоник тока при работе ДСП [9]

$$I_n = I_{п.т.} / n^2, \quad (3.46)$$

где  $I_{п.т.}$  – ток печного трансформатора (номинальный);  $n = 3, 4, 5, \dots$  – номер соответствующей гармоники. Ток второй гармоники принимается равным току третьей гармоники ( $I_2 \approx I_3$ ). Из приведенного соотношения видно, что в расчетах достаточно учитывать гармоники до 7-й, так как остальные гармоники малы.

Для группы одинаковых ДСП

$$I_{гр} = I_n \sqrt[4]{N}, \quad (3.47)$$

где  $N$  – число печей, одновременно работающих в режиме расплавления.

Для группы печей разной мощности

$$I_{nгр} = I_{nmax} \sqrt[4]{\sum_{i=1}^N S_{птi} / S_{пт max}}, \quad (3.48)$$

где  $S_{птi}$  – мощность  $i$ -го печного трансформатора;  $S_{пт max}$  – наибольшая мощность трансформатора в группе ДСП;  $I_{nmax}$  – ток  $n$ -й гармоники печного трансформатора наибольшей мощности;  $N$  – общее число работающих печей.

Для определения  $K_u$  в соответствующей точке сети необходимо определить уровень напряжения отдельных гармоник, генерируемых ДСП. Фазное напряжение гармоники в расчетной точке сети находится из выражения

$$U_n = I_n n x_c = I_n n \frac{U_{ном}^2}{S_k}, \quad (3.49)$$

где  $I_n$  – действующее значение фазного тока  $n$ -й гармоники;  $n$  – порядковый номер гармоники;  $U_{ном}$  – номинальное линейное напряжения в расчетной точке;  $x_c$  – сопротивление питающей сети от расчетной точки до точки бесконечной мощности;  $S_k$  – мощность КЗ в расчетной точке.

Общий коэффициент несинусоидальности в расчетной точке при работе ДСП, %

$$K_u = 100 \sqrt{\sum_{n=2}^7 U_n^2 / U_{фном}^2}, \quad (3.50)$$

где  $U_{фном}$  – номинальное фазное напряжение основной частоты в расчетной точке.

### 3.4.5. Расчет гармонического состава тока реактора с тиристорным регулированием

Для уменьшения колебания напряжения в питающей электрической сети используется схема косвенной компенсации переменной составляющей реактивной мощности, которая предусматривает наличие реактора, управляемого встречно-параллельно включенными тиристорами.

На рис. 3.13 [9] представлена схема тиристорно-реакторной группы и диаграмма напряжения питающей сети и тока в реакторе. При из-



менении угла управления  $\alpha$  от 0 до  $\pi/2$  изменяется и ток в реакторе от максимума до нуля. Как видно из диаграммы, ток в реакторе существенно нелинеен. Процентное содержание гармоник в токе реактора изменяется в зависимости от угла  $\alpha$ .

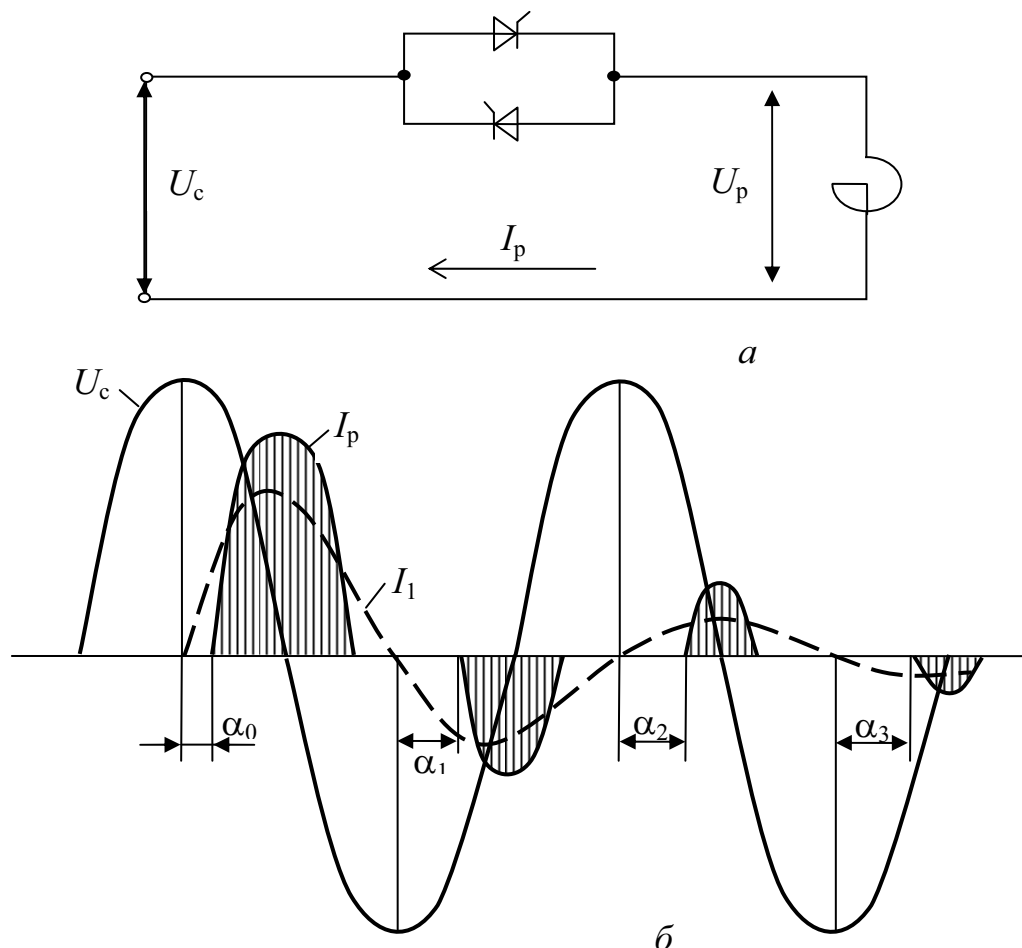


Рис. 3.13. Тиристорно-реакторная группа:  
а – схема работы; б – диаграмма напряжения и тока

Ток управляемого реактора определяется выражением

$$I_p(t) = I_{p0m}(\sin \omega t - \sin \alpha) = \frac{Q_p}{\sqrt{3}U_{ном}}(\sin \omega t - \sin \alpha), \quad (3.51)$$

где  $I_{p0m}$  – ток реактора при угле управления  $\alpha = 0$  (амплитудное значение).

Так как данная функция является периодической (период равен  $2\pi$ ), то можно провести гармонический анализ, разложив ее в ряд Фурье. Тогда ток реактора можно представить в виде

$$I_p(t) = b_1 I_{p0} \sin \omega t + b_3 I_{p0} \sin 3\omega t + b_5 I_{p0} \sin 5\omega t + \dots + b_n I_{p0} \sin n\omega t, \quad (3.52)$$

где  $b_n$  – коэффициент ряда Фурье;  $n$  – номер гармоники (3, 5, 7, 11, 13-й .....).

По результатам расчета построены зависимости коэффициентов ряда Фурье от угла управления  $\alpha$  [9], которые представлены на рис. 3.14.

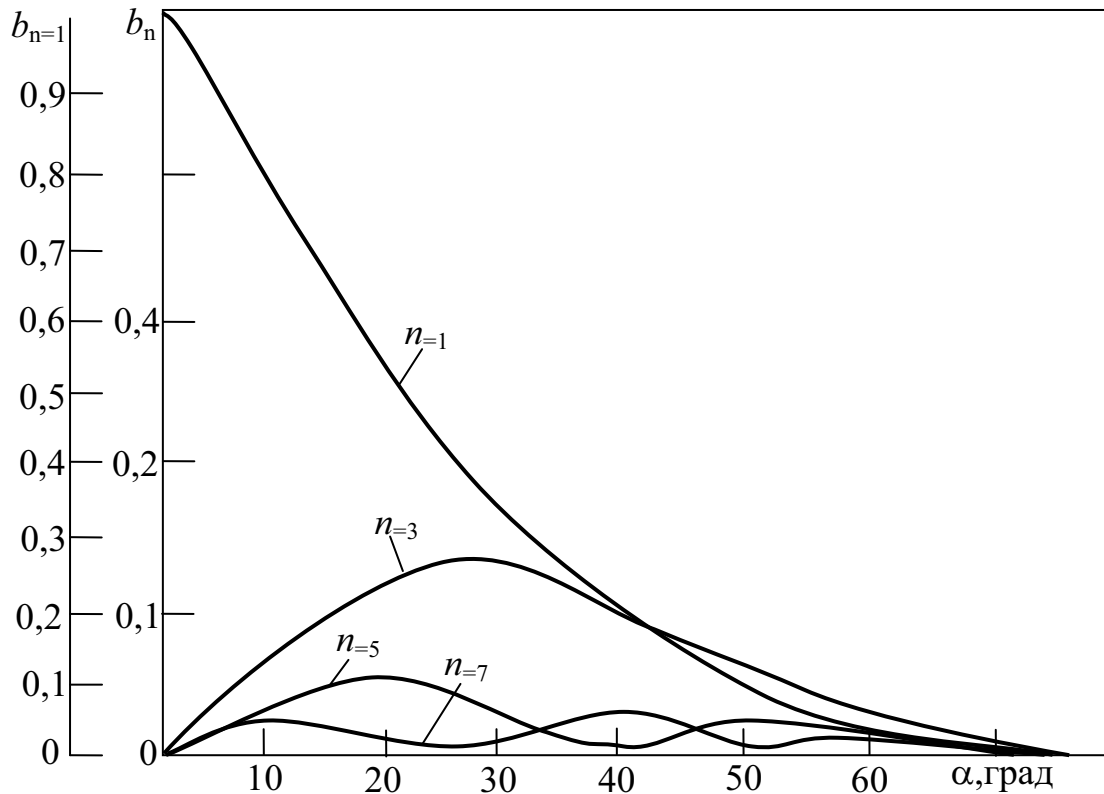


Рис. 3.14. График зависимости коэффициентов ряда Фурье ( $b_n$ ) от угла управления  $\alpha$

Из рис. 3.14 следует, что максимальное значение тока третьей гармоники будет при работе реактора с углом управления  $\alpha = 30^\circ$ , тока пятой гармоники – при  $\alpha = 20^\circ$ , тока седьмой гармоники – при  $\alpha = 10^\circ$ . Действующее значение тока гармоники определяется по формуле

$$I_n = b_n I_{p0} = b_n \frac{Q_p}{\sqrt{3} U_n}. \quad (3.53)$$

Значения токов гармоник, рассчитанных по (3.53), используются для проверки конденсаторов и фильтро-компенсирующих устройств на перегрузку их высшими гармониками тока, а также для определения коэффициента несинусоидальности напряжения в питающей сети при работе тиристорно-реакторной группы.

Общий коэффициент искажения синусоиды напряжения в питающей сети определяется по формуле, %

$$K_u = 100 \sqrt{\sum_{n=3}^7 U_n^2 / U_c^2}, \quad (3.54)$$

где  $U_n$  и  $U_c$  – напряжение  $n$ -й гармоники и питающей сети соответственно.

Напряжение  $U_n$  определяется по формуле

$$U_n = I_n n x_c = I_n \frac{n U_c^2}{S_k}, \quad (3.55)$$

где  $I_n$  – ток гармоники;  $x_c$  – сопротивление питающей сети;  $S_k$  – мощность КЗ в точке подключения установки. Для инженерных расчетов достаточно учитывать только 3, 5 и 7 гармоники, так как гармоники более высокого порядка малы.

При расчете высших гармоник необходимо учитывать, что при работе устройств косвенной компенсации в сетях с ДСП, электросваркой и вентильными преобразователями тиристорно-реакторная группа генерирует гармоники тогда, когда их не генерируют дуговые печи и сварочные установки, и наоборот. Уровень высших гармоник тока тиристорно-реакторной группы, дуговых печей и сварочных установок одного и того же порядка. Поэтому происходит выравнивание высших гармоник. Очевидно, что в таких системах электроснабжения необходимо рассчитать только максимальные гармоники от дуговых печей и сварочных нагрузок. Вентильные преобразователи генерируют высшие гармоники на порядок больше, чем тиристорно-реакторная группа, поэтому в таких системах необходимо учитывать высшие гармоники только от вентильных преобразователей.

### 3.5. Батареи конденсаторов в электрических сетях с высшими гармониками

Так как нелинейные нагрузки (вентильные преобразователи, дуговые печи и др.) работают, как правило, с низким коэффициентом мощности ( $\cos \varphi = 0,4 \dots 0,8$ ), необходимость компенсации реактивной мощности является очевидной.

Наиболее экономичными средствами компенсации реактивной мощности на сегодняшний день являются нерегулируемые и регулируемые батареи конденсаторов (БК). Это объясняется их известными преимуществами перед другими средствами компенсации реактивной мощности (синхронными двигателями, синхронными компенсаторами). Однако применение БК ограничивается техническими причинами. При наличии в сети высших гармоник тока и напряжения включение конденсаторов приводит к резонансным явлениям на частотах высших гармоник, что приводит к нарушению нормальной работы БК.

Исследование процесса работы конденсаторных установок при наличии высших гармоник в питающей сети, особенно при работе вентильных преобразователей, имеют очень важное практическое значение для определения возможности применения конденсаторных батарей в системах электроснабжения предприятий.

Сущность явлений рассмотрим на примере простой схемы электроснабжения мощного вентильного преобразователя, представленной на рис. 3.15. На схеме представлены три основных элемента, участвующих в резонансном процессе: вентильный преобразователь – источник высших гармоник тока и напряжения; питающая сеть, включая все ее элементы (в том числе и прочую нагрузку), упрощенно представленная в схеме замещения индуктивно-активным элементом; батарея конденсаторов (емкостно-активная цепь в схеме замещения).

При отсутствии емкостных элементов (БК отключены) частотные характеристики сопротивления питающей сети в точках 1 и 2 (рис. 3.15)  $x_c$  и  $x_\Sigma$  линейны (кривая 2 на рис. 3.16); активными сопротивлениями в этом случае можно пренебречь ввиду их малости. Следовательно, глубина коммутационных искажений и величина напряжения отдельных гармоник уменьшаются линейно по мере удаления от точки коммутации (до точки 2 на рис. 3.15).

Глубина коммутационных искажений  $\Delta U_1$  пропорциональна величине  $x_c / (x_c + x_{пр})$ , где  $x_c$  – эквивалентное индуктивное сопротивление сети, т. е. сопротивление от условной точки питания бесконечной мощности до исследуемой точки питающей сети;  $x_{пр}$  – индуктивное сопротив-

ление цепи преобразователя, т. е. сопротивление от точки коммутации до исследуемой точки сети. При этом ширина коммутационных искажений остается неизменной и определяется углом коммутации  $\gamma$ .

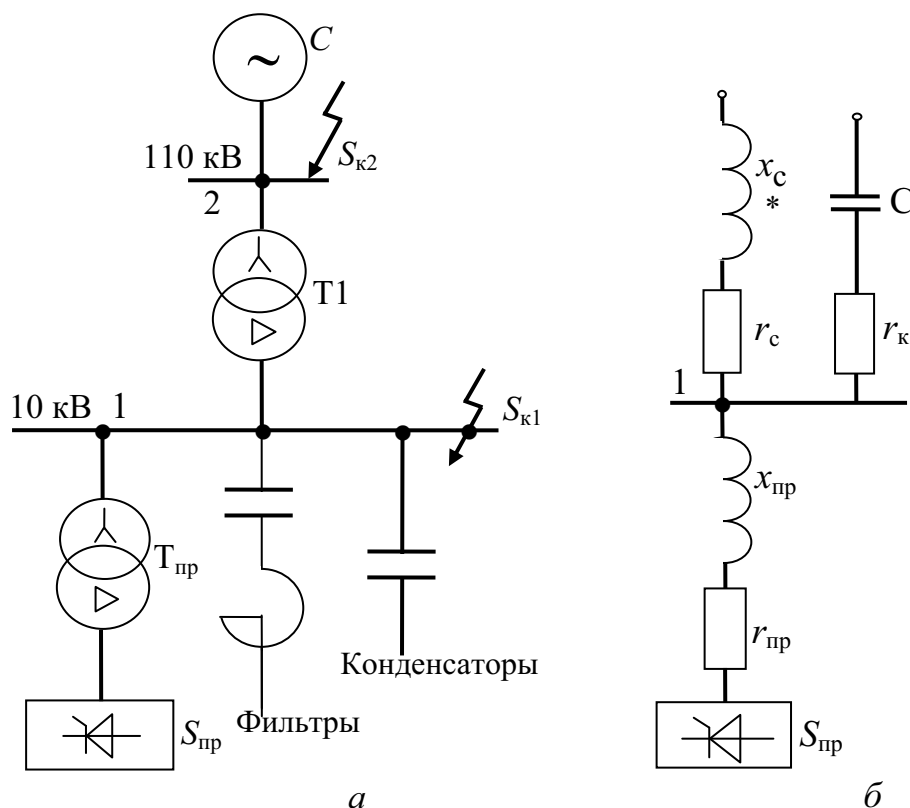


Рис. 3.15. Однолинейная схема питающей сети с конденсаторными батареями и фильтрами высших гармоник (а) и схема замещения (б)

Включение батареи конденсаторов резко изменяет линейный характер частотной характеристики питающей сети как в точке 1, так и в точке 2 (рис. 3.15 и 3.16). Причем нелинейность частотной характеристики в значительной степени зависит от добротности элементов питающей сети, т. е. от отношения  $x/r$ .

Нелинейность частотной характеристики питающей сети в точке 1 объясняется тем, что при подключении БК образуется параллельный  $LC$ -контур, состоящий из индуктивного сопротивления питающей сети и емкостного сопротивления конденсатора. Формулы для определения частотной характеристики  $LC$ -контура питающей сети приведены в [9], которыми можно воспользоваться для точного количественного анализа характеристик. По приведенным в [9] формулам построены частотные характеристики параллельного резонансного контура при различных значениях добротности  $Q = x_c/r_c$  (рис. 3.16). Сравнивая частотные характеристики сети без БК с зависимостью  $Z_n/Z_1$  в функции час-

тоты гармоник параллельного резонансного контура, можно произвести качественный анализ режима перегрузки батарей токами высших гармоник.

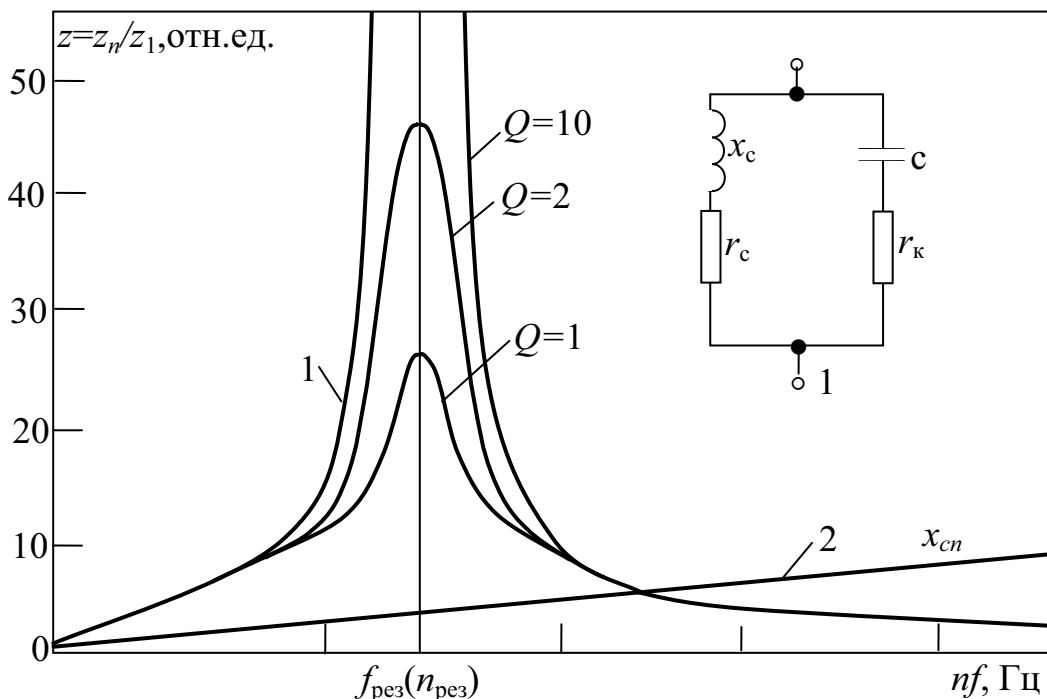


Рис. 3.16. Частотные характеристики питающей сети в точке 1 (см. рис. 3.15): 1 – при включенной батарее конденсаторов для различных значений  $Q=x_c/r_c$ ; 2 – при отключенной батарее

При отсутствии в сети емкостных элементов напряжение  $n$ -й гармоники на шинах подстанции (рис. 3.15) определяется падением напряжения на сравнительно небольшом индуктивном сопротивлении сети для этой гармоники  $x_{cn}$ . В данном случае активным сопротивлением цепи можно пренебречь в силу высоких значений добротности элементов системы, которые составляют порядка  $Q = 30-50$ .

При подключении БК к шинам подстанции, питающей мощную вентильную нагрузку, процесс резко меняется. Какое бы ни было значение емкости батареи всегда найдется такая группа (резонансная группа гармоник), при которых БК вступает в режим резонанса токов (или близкий к нему) с индуктивностью сети. Сопротивление параллельного контура в области резонанса резко увеличивается (рис. 3.16).

Токи резонансной группы гармоник, генерируемые вентильным преобразователем в сеть, значительно уменьшаются. Это означает, что напряжения гармоник резонансной группы  $U_n$  приложены к БК непосредственно за вычетом малого падения напряжения в преобразова-

тельном трансформаторе. Следовательно, напряжения гармоник резонансной группы в точке 1 значительно увеличиваются, а емкостное сопротивление конденсаторов уменьшается с увеличением номера гармоники ( $x_{kn} = 1/n\omega c = x_k/n$ ).

Отмеченное обстоятельство приводит к тому, что через БК протекают значительные токи резонирующих гармоник, соизмеримые, а иногда и значительно превосходящие ток первой гармоники. Перегрузка батарей конденсаторов токами высших гармоник может достигать на практике значительной величины (до 400 %), что приводит к полному выходу ее из строя.

Учитывая, что вентильные преобразователи генерируют в сеть спектр канонических гармоник, начиная с  $n = 5$  (шестифазная схема выпрямления), теоретически можно подобрать конденсаторную установку такой мощности, которая вступила бы в параллельный резонанс с индуктивностью сети при частотах меньше 250 Гц ( $n < 5$ ), и тем самым избежать резонансных явлений и их последствий.

Этот способ решения проблемы не имеет практического смысла из-за слишком большой мощности конденсаторных компенсирующих устройств (иногда превышающей мощность питающего трансформатора). Кроме того, это неприемлемо для системы электроснабжения из-за перекомпенсации и возникновения лавины напряжения.

Таким образом, непосредственное применение БК в целях компенсации реактивной мощности в сетях с вентильными преобразователями представляет большие сложности. В каждом конкретном случае необходим расчет токовой перегрузки батарей конденсаторов резонансной группы гармоник. Иногда такие расчеты необходимо производить до гармоник достаточно высокого порядка, особенно при малых мощностях (емкостях) конденсаторных батарей ( $n > 71$ ).

**Защита батарей конденсаторов от высших гармоник.** В сетях, питающих нелинейную нагрузку, установка конденсаторов без защиты их от высших гармоник недопустима из-за резонансных явлений (резонанса токов) на высокой частоте. Батареи конденсаторов, предназначенные для компенсации реактивной мощности, для их нормальной работы необходимо защищать реакторами, устанавливаемыми последовательно с конденсаторами (рис. 3.17). Величина индуктивного сопротивления реактора должна быть рассчитана так, чтобы в этой цепи создавался резонанс напряжений на частоте, меньшей наименьшей гармоники, возникающей при работе нелинейной нагрузки, т. е. должно выполняться условие

$$n_p \omega L = \frac{1}{n_p \omega C}; \quad n_p < n_{\min}, \quad (3.56)$$

где  $n_p$  – гармоника, на которую необходимо настроить последовательную  $LC$ -цепь;  $n_{\min}$  – минимальная гармоника, возникающая при работе нелинейной нагрузки.

При неправильной защите конденсаторов могут возникать резонансные явления, обусловленные тем, что цепь, состоящая из последовательного соединения реактора и конденсатора, уменьшает гармоники порядка выше резонансной (имеет индуктивный характер цепи) и увеличивает гармоники порядка ниже резонансной (имеет емкостный характер цепи). Для правильной защиты батареи конденсаторов необходимо, чтобы эта цепь имела индуктивный характер для всех гармоник.

На практике защита конденсаторов от высших гармоник сталкивается с техническими трудностями из-за малого индуктивного сопротивления существующих бетонных реакторов. Поэтому для защиты высоковольтных конденсаторов необходимо применять низковольтные реакторы, обладающие большим индуктивным сопротивлением.

Возможность применения низковольтных реакторов обосновывается тем, что в нормальном режиме работы к реактору приложено напряжение основной частоты

$$U_{L1} = \frac{1}{n_p^2 - 1} U_1, \quad (3.57)$$

где  $U_1$  – напряжение сети на основной частоте, приложенное к  $LC$ -цепи;  $n_p$  – номер гармоники, на которую настроена цепь.

Общее напряжение на реакторе может быть подсчитано по формуле

$$U_L = \sqrt{U_{L1}^2 + \sum_{n_{\min}}^{n_{\max}} U_{Ln}^2}, \quad (3.58)$$

где  $U_{Ln} = I_n \frac{nx_c n \omega L}{nx_c + n \omega L - 1/n \omega C}$ ;  $I_n$  – суммарный ток  $n$ -й гармоники в питающей сети при отключенной БК;  $x_c$  – индуктивное сопротивление системы;  $\omega L$  – индуктивное сопротивление защитного реактора на основной частоте;  $1/\omega C$  – емкостное сопротивление защищаемой батареи конденсаторов на основной частоте.



Для защиты низковольтного реактора от перенапряжений в момент включения или при пробое конденсатора параллельно с реактором устанавливается разрядник многократного действия (рис. 3.17). Необходимо также учитывать, что при последовательном соеди-

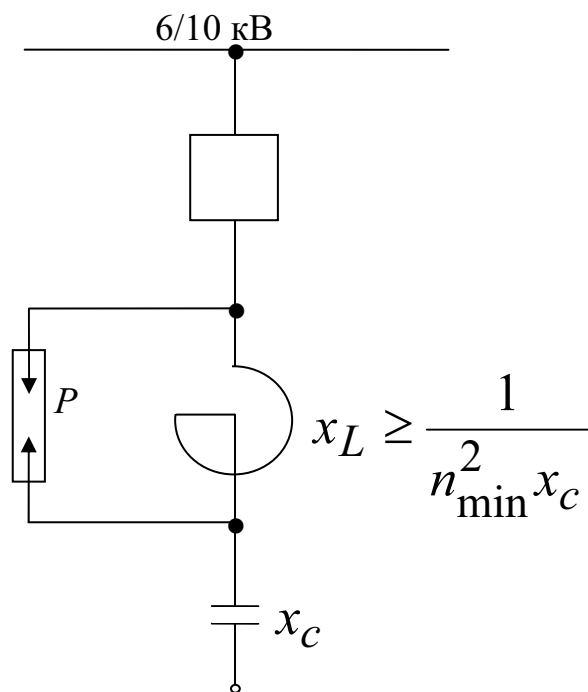


Рис. 3.17. Однолинейная схема защиты конденсаторной батареи от высших гармоник

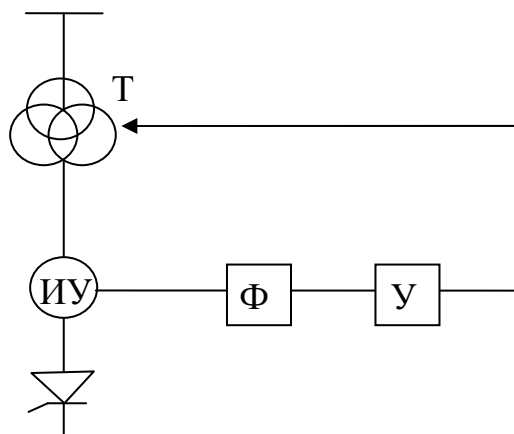
нении реактора и конденсатора автоматически повышается напряжение на БК, в том числе и за счет высших гармоник. Поэтому для надежной работы устройства компенсации реактивной мощности необходимо выбирать конденсаторы на повышенное напряжение, что в свою очередь проблематично из-за ограниченности возможностей.

### 3.6. Снижение уровней гармоник

#### 3.6.1. Методы снижения уровней гармоник

**Улучшение формы кривой сетевого тока.** Одним из перспективных способов снижения несинусоидальности в электрических сетях является улучшение формы кривой сетевого тока вентильных преобразователей. Этого можно достичь компенсацией высших гармоник, наложением токов 3, 9, 15-й и гармоник более высоких порядков на токи обмоток трансформатора или обеспечением специальных законов управления преобразователями.

В первом случае в третьей обмотке трансформатора преобразователя (Т) создается магнитодвижущая сила (МДС) высших гармоник (рис. 3.18). Магнитный поток, обусловленный этой МДС, имеет направление, противоположное направлению основного потока в трансформаторе. В результате такого сложения потоков высшие гармоники магнитного потока компенсируются. Фильтр  $\Phi$  является заграждающим для первой гармоники. Усилитель  $У$  предназначен для усиления токов высших гармоник.



*Рис. 3.18. Схема компенсации высших гармоник магнитного потока выпрямительного трансформатора*

При реализации представленной схемы могут быть подавлены канонические и аномальные гармоники потока и сетевых токов преобразователя. Эта схема может оказаться в некоторых случаях (например, для линий электропередач) менее затратной, чем в случае использования преобразователей и резонансных фильтров.

Недостатками такой схемы является ее сложность, необходимость применения трехобмоточных трансформаторов, малое быстродействие. Схема может оказаться целесообразной для мощных преобразователей, работающих в «спокойном» режиме.

Положительный эффект улучшения гармонического состава сетевого тока может быть достигнут в результате управления вентилями преобразователя по специальным законам [13]. Такие системы управления должны измерять высшие гармоники тока и путем воздействия на величину углов включения тиристоров обеспечивать улучшение коэффициента несинусоидальности или подавления отдельных гармоник. В настоящее время реализация таких законов управления осуществляется, как правило, на базе микропроцессорной техники.

***Увеличение числа фаз преобразователей.*** Среди мероприятий, направленных на снижение уровней высших гармоник, генерируемых вентильными преобразователями, наиболее распространенным является увеличение числа фаз.

Наибольшее распространение имеет способ улучшения гармонического состава сетевого тока вентильного преобразователя с помощью применения сложных многомостовых схем преобразователей, обеспечивающих 12, 18, 24 и более фазное выпрямление. Например, для 12-фазной схемы выпрямления удастся компенсировать 5, 7, 17, 19 и другие высшие гармоники. Необходимо учитывать, что эффект от снижения уровней высших гармоник в многофазных схемах проявляется при одинаковой нагрузке преобразователей и симметрии систем фазового управления вентилями.

***Снижение уровней гармоник средствами питающей сети.*** Оно достигается в основном рациональным построением системы электропитания, при котором обеспечивается допустимый уровень гармоник напряжения на шинах потребителя.

Наиболее распространенными средствами являются применение трансформаторов преобразователей с повышенным напряжением; питание нелинейных нагрузок от отдельных трансформаторов или подключение их к отдельным обмоткам трехобмоточных трансформаторов; подключение параллельно нелинейным нагрузкам синхронных и асинхронных двигателей.

### **3.6.2. Силовые резонансные фильтры энергетического назначения**

Снижение уровней высших гармоник в электросетях является частью общей задачи обеспечения электромагнитной совместимости работы электроприемников, т. е. уменьшения влияния нелинейных нагрузок на питающую сеть и улучшения качества электроэнергии в сетях предприятий.

Комплексное решение этой задачи, основанное на применении многофункциональных устройств, оказывается в экономическом отношении более целесообразным, чем, например, использование мероприятий по улучшению формы сетевого тока преобразователя. Примером таких многофункциональных устройств являются силовые резонансные фильтры высших гармоник, иначе называемые фильтрокомпенсирующими устройствами (ФКУ), которые наряду со снижением уровней высших гармоник генерируют в питающую сеть реактивную мощность.

При определенных условиях такие фильтры могут использоваться также для симметрирования системы линейных напряжений в электро-

сети. Фильтры могут устанавливаться для разделения линейных и нелинейных нагрузок (заградительные фильтры) или для шунтирования (поглощения) токов высших гармоник.

Основой энергетических фильтров высших гармонических напряжений являются последовательно соединенные индуктивно-емкостные цепи, настроенные на соответствующие номера гармоник (рис. 3.19). Искажения сетевого напряжения от работы нелинейных электроприемников возникают из-за падений напряжения на внутренних сопротивлениях сети, питающей данные электроприемники.

Вентильную нагрузку в электрической системе обычно рассматривают как генератор гармоник тока. В этом случае он может быть представлен в виде источника тока различных гармоник  $I_n$  и внутренними сопротивлениями  $r_{вп}$  в соответствии с рис. 3.20. Согласно схеме замещения ток  $n$ -ной гармоники в питающей сети может быть определен в виде [7]

$$I_{cn} = I_n \frac{r_{вп}}{r_{вп} + r_c + jn X_c}. \quad (3.59)$$

Напряжение, возникающее на сопротивлении сети от каждой  $n$ -ной гармоники, будет равно

$$U_{cn} = I_n \frac{r_{вп} (r_c + jn X_c)}{r_{вп} + r_c + jn X_c}. \quad (3.60)$$

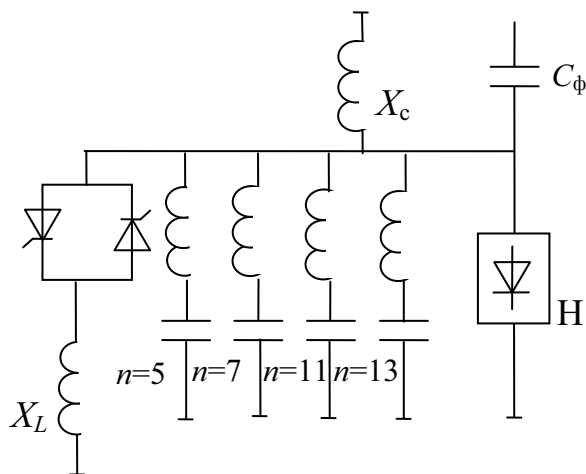


Рис.3.19. Схема резонансного фильтра

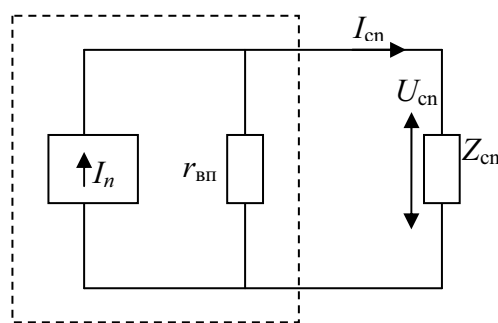


Рис.3.20. Схема замещения вентильной нагрузки

Резонансные  $L$ - $C$  фильтры, настроенные на соответствующие высшие гармоники, обычно  $n = 5, 7, 11, 13$ , позволяют существенно

снизить искажения формы кривой напряжения. Параметры каждой резонансной ветви фильтра определяются из условия

$$n\omega L_{\phi} = \frac{1}{n\omega C_{\phi}}, \quad (3.61)$$

где  $n$  - номер гармоники, на которую настраивается данная резонансная ветвь.

На рис. 3.19 приведена схема фильтрокомпенсирующего устройства (ФКУ), в состав которого входят резонансные фильтры и реактор  $X_L$  с управляемыми тиристорами. По этой схеме разработаны и выпускаются серии комплектных силовых резонансных фильтров 5, 7, 11, 13 гармоник для сетей 6-10 кВ мощностью 1200 кВАр для 5 и 7 гармоник и мощностью 800 кВАр для 11 и 13 гармоник. Применение фильтров целесообразно, когда требуется не только улучшить гармонический состав напряжения сети, но и скомпенсировать реактивную мощность в рассматриваемом пункте системы электроснабжения. При полном открывании вентилей реактора суммарная реактивная мощность установки определяется разностью между мощностью, генерируемой фильтром  $\sum_n Q_{\phi n}$ , и мощностью, потребляемой реактором  $Q_p$ . При закрывании вентилей биполярной тиристорной ячейки мощность, потребляемая реактором, уменьшается и при их полном закрывании мощность, генерируемая ФКУ, становится равной мощности фильтров. Следовательно, суммарная реактивная мощность ФКУ на основной частоте определится как

$$Q_{\text{фку}} = Q_p - \sum_n Q_{\phi n}. \quad (3.62)$$

Реактивная мощность, генерируемая фильтром  $n$ -ной гармоники на основной частоте, равна

$$Q_{\phi n} = \left( U_1 \frac{n^2}{n^2 - 1} \right)^2 \omega C_n, \quad (3.63)$$

где  $U_1 \approx 0,95 U_{\text{л.ном}}$  - напряжение основной гармоники линейного напряжения сети.

Зависимость реактивной мощности, потребляемой реактором в функции от угла управления вентилями, равна

$$Q_p = \frac{U_{\text{л}}^2}{X_L} \left( 1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \sin \frac{2\alpha}{\pi} \right), \quad (3.64)$$

где  $X_L$  – индуктивное сопротивление реакторов на одну фазу.

Кроме резонансных  $L$ - $C$  цепей, настроенных на соответствующие гармоники, в состав фильтра может входить батарея конденсаторов  $C_\phi$ , предназначенная для подавления гармоник, номера которых выше тех, что подавляются резонансными фильтрами (рис. 3.19).

Наиболее распространенная схема ФКУ показана на рис. 3.21.

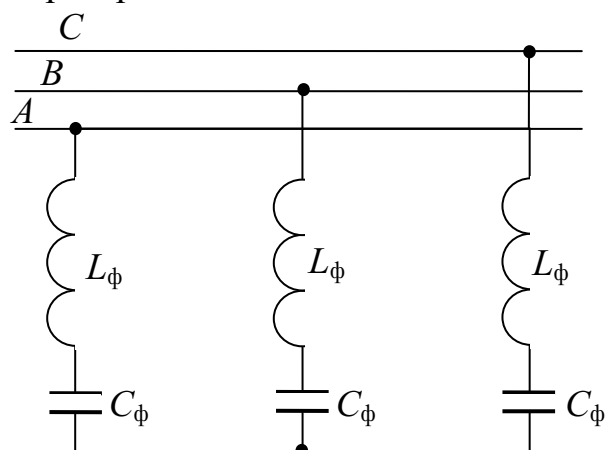


Рис. 3.21. Схема ФКУ

Выражение для определения мощности батареи конденсаторов для тока  $n$ -ной гармоники:

$$Q_\phi \geq 1,2K_c U_{\text{ном.}\phi} I_{n\phi}, \quad (3.65)$$

где  $K_c = \sqrt{3}$  при соединении конденсаторов в треугольник и  $K_c = 3$  при соединении в звезду;  $I_{n\phi}$  – линейный ток  $n$ -ной гармоники в цепи ФКУ;  $U_{\text{ном.}\phi}$  – номинальное напряжение батареи конденсаторов ФКУ.

Для учета ограничений мощности батареи необходимо также соблюдать условие

$$Q_\phi \geq Q_{1\phi} + Q_{n\phi}, \quad (3.66)$$

где  $Q_{1\phi}$  и  $Q_{n\phi}$  – реактивная мощность батареи на частотах 1-й и  $n$ -й гармоник.

Однолинейная схема включения фильтра имеет вид (рис. 3.22). Фильтр включается параллельно нагрузке и вызывает перераспределение токов.

Коэффициент токораспределения между фильтром и сетью

$$K_{np} = \sqrt{\frac{1 + n_p \operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{ЭК}}}{\left(1 + \frac{R_{\phi}}{R_{\text{ЭК}}}\right) + n_p \operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{ЭК}}}}, \quad (3.67)$$

где  $R_{\phi}$  – активное сопротивление цепи фильтра;  $n_p$  – гармоника, на которой оценивается распределение тока;  $\operatorname{tg} \varphi_{\text{ЭК}} = \frac{X_{\text{ЭК}}}{R_{\text{ЭК}}}$ ;  $X_{\text{ЭК}}$ ,  $R_{\text{ЭК}}$  – эквивалентные сопротивления питающей сети и нагрузки на основной частоте без батареи конденсаторов:

$$Z_{\text{ЭК}} = \frac{(R_c + j X_c)(R_H + j X_H)}{(R_c + R_H) + j(X_c + X_H)}, \quad (3.68)$$

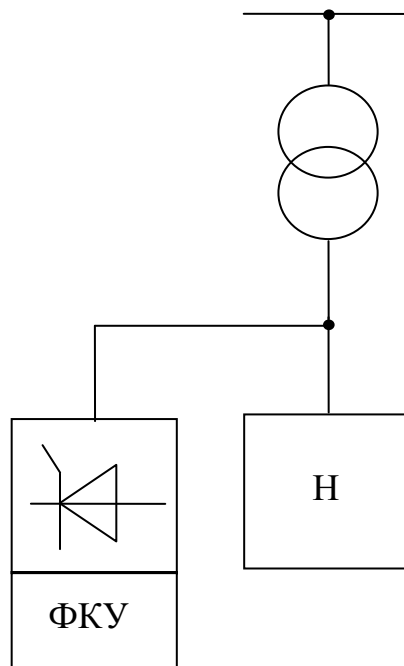


Рис. 3.22. Однолинейная схема включения фильтра

Фильтры комплектуются из серийно выпускаемого оборудования. В табл. 3.7 показан пример ФКУ на 3, 5 и 7 гармоники.

Кратность снижения  $n$ -ной гармоники напряжения после подключения фильтра

$$K_{un}^{(p)} = \frac{R_{\phi}}{R_{\Sigma}} \frac{K_{np}}{(1 + n_p \operatorname{tg}^2 \varphi_{\Sigma})}. \quad (3.69)$$

На практике  $K_{un}$  выбирают, исходя из структуры амплитудного спектра напряжения и значений отдельных составляющих. Первоначально рекомендуется принимать  $K_{un}^{(p)} < 0,2 - 0,25$ .

**Т а б л и ц а 3.7**  
**Типовые ФКУ для сетей 0,4 кВ**

Номинальная мощность БК, кВАр	Тип конденсатора	Тип реактора	Активное сопротивление фильтра, МОм
Фильтр 3 гармоники			
84	КС1-0,38-14-371	2хФРОС-250-0,5	8...10
144	КС2-0,38-36-373	ФРОС-250-0,5	8...9
500	КС2-0,38-50-373	РСТС-410-0,101	7...8
Фильтр 5 гармоники			
240	КС2-0,38-40-371	РТСТ-410-0,076	8...9
360	КС2-0,38-40-373	РТСТ-820-0,0505	6...7
678	КС2-0,38-4043	РТСТ-820-0,027	4...6
	КМ1-0,38-1343		
Фильтр 7 гармоники			
145,5	КС1-0,38-18-343	РТСТ-660-0,064	7...8
276	КС1-0,38-12,5-341		
342	КМ1-0,38-13-343	РТСТ-660-0,034	6...7
	КМ1-0,38-13-343	РТСТ-660-0,027	4,7...6

Для снижения активного сопротивления цепи фильтров целесообразно применять реакторы с малым сопротивлением, использовать автоматические выключатели вместо рубильников и предохранителей, размещать фильтры в непосредственной близости от КТП, уменьшать число соединений.

### 3.7. Параллельная работа силовых фильтров высших гармоник в системах электроснабжения

При проектировании систем электроснабжения (СЭС) возникает необходимость установки нескольких фильтров одной гармоники, включенных параллельно, если расчетный ток гармоники в сети значительно превышает наибольший номинальный ток фильтра и если при



небольшом значении тока фильтруемой гармоники необходимость установки параллельно включенных фильтров обусловлена повышением общей мощности компенсирующих устройств.

Параллельная работа фильтров высших гармоник имеет свои особенности. Если параметры фильтров имеют отклонения от резонансной настройки, то токораспределение фильтруемой гармоники в них нарушается, что может привести даже к аварийной ситуации.

Данные исследование [13] схемы электроснабжения промышленного предприятия с двумя параллельными фильтрами пятой гармоники одинаковой мощности ( $Q_{\text{ф.ном}} = 1200$  кВАр,  $U_{\text{ном}} = 10$  кВ), схема замещения которой представлена на рис. 3.23, в режимах с десятью различ-

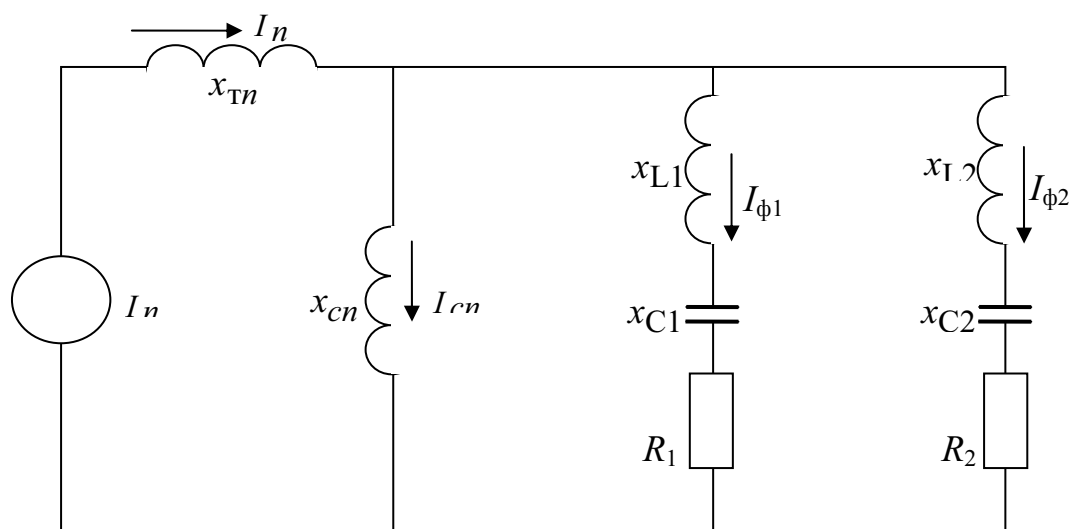


Рис. 3.23. Схема замещения для высших гармоник с двумя параллельными фильтрами

ными сочетаниями отклонений параметров элементов фильтров от резонансной настройки приведены в табл. 3.8.

На схеме рис. 3.23 обозначено:  $R_1, R_2$  – активные сопротивления цепей фильтров;  $x_{cn}, I_{cn}$  – индуктивное сопротивление и ток  $n$ -й гармоники питающей системы;  $I_n$  – суммарный ток  $n$ -й гармоники, генерируемый всеми вентильными преобразователями в питающую сеть;  $x_{L1}, x_{L2}, x_{C1}, x_{C2}$  – индуктивные и емкостные сопротивления первого и второго фильтров;  $I_{\phi 1}, I_{\phi 2}$  – токи фильтров первого и второго соответственно.

Из анализа данных табл. 3.8, где  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$  – параметры, характеризующие количественное отклонение индуктивных и емкостных сопротивлений параллельных фильтров от номинальных значений при резонансной настройке, можно сделать ряд выводов.

1. При отклонении даже одного параметра фильтра (индуктивности или емкости) токораспределение в фильтрах нарушается (режимы 2,

3, 4). Например, в режиме 2 при отклонении индуктивности первого фильтра на 15 % в сторону увеличения ток фильтруемой гармоники в нем уменьшается примерно в 3 раза по сравнению с нормальным режимом резонансной настройки фильтров (режим 1), а ток во втором фильтре увеличивается в 2 раза. Второй фильтр перегружается током гармоники, а первый недоиспользуется. В сети протекает ток  $0,227I_n$ , в 1,8 раза больший, чем в нормальном режиме резонансной настройки, т. е. качество фильтрации значительно ухудшается.

**Т а б л и ц а 3.8**

**Токораспределение фильтруемой гармоники  
в параллельных фильтрах**

Рассматриваемый режим	Отклонение параметров фильтров в долях $I_n$					
	1-й фильтр		2-й фильтр	$I_{\phi 1}^*$	$I_{\phi 2}^*$	$I_{cn}^*$
	$\alpha_1$	$\beta_1$	$\beta_2$			
1	1	1	1	0,496	0,496	0,125
2	1,15	1	1	0,155	0,899	0,227
3	1	0,95	1	0,355	0,772	0,182
4	1	1,05	1	0,379	0,816	0,206
5	1	1,1	1,1	0,939	0,939	0,936
6	1	0,95	1,03	0,693	0,983	0,378
7	1,02	0,95	1,02	0,461	1,05	0,332
8	1,08	1,06	1,05	0,877	0,512	0,279
9	1,15	1	1,1	0,854	1,26	1,26
10	1,15	0,95	1,1	0,819	1,60	1,59

Примечание. Коэффициент  $\alpha_2 = 1$ .

2. При отклонении параметров фильтров в одну и ту же сторону от резонансной настройки наблюдается значительная перегрузка обоих фильтров током гармоники и существенное ухудшение фильтрации. Например, в режиме 5 при увеличении емкостного сопротивления каждого фильтра на 10 % оба фильтра оказываются перегруженными током фильтруемой гармоники в 1,9 раза по сравнению с нормальным режимом, и в то же время в сети протекает ток почти целой гармоники ( $0,936I_n$ ). В этом режиме само применение фильтров теряет всякий смысл, так как оба фильтра перегружены током гармоники и почти отсутствует фильтрация.

3. Более тяжелые режимы работы фильтров возникают при отклонении их параметров от резонансной настройки в разные стороны. Так в одном из опытов в первом фильтре было отклонение от резонансной настройки в индуктивную сторону на 20 % от характеристического сопротивления (сопротивление идеального фильтра), а во втором – в емкостную сторону на 10 %. При этом ток гармоники в первом фильтре увеличился более чем в 1,6 раза, во втором – в 3,2 раза, а в сети прохо-

дил ток, равный  $1,59I_n$ , т. е. больший ток гармоники, чем проходящий в сети при отсутствии фильтров.

Такое увеличение тока фильтруемой гармоники при подключении к шинам подстанции параллельных рассогласованных фильтров называется режимом *антифильтрации*. Такое название полностью отражает физическую сущность рассмотренного явления.

Таким образом, параллельная работа фильтров при реальных отклонениях их параметров от резонансной настройки сопровождается возникновением ненормальных режимов токораспределения фильтруемой гармоники и существенным ухудшением качества фильтрации.

Радикальным средством, предотвращающим возникновение таких режимов, предлагается метод, обеспечивающий нормальное токораспределение и равномерную загрузку элементов фильтра током гармоники и значительно улучшающий фильтрующую способность параллельных фильтров. Метод отличается исключительной простотой и заключается в соединении точек фильтров перемычкой, имеющей малое, принимаемое равным нулю, активное сопротивление [9]. Возникающая при этом схема замещения представлена на рис. 3.24.

На схеме замещения  $r_1$  и  $r_2$  – активные сопротивления реакторов фильтров;  $r_1'$  и  $r_2'$  – активные сопротивления батарей конденсаторов фильтров;  $I_{L1}$ ,  $I_{C1}$  – токи  $n$ -й гармоники в реакторе и батарее первого фильтра;  $I_{L2}$ ,  $I_{C2}$  – токи  $n$ -й гармоники в реакторе и батарее второго фильтра.

Результаты исследования [9] работы такой схемы, представлены в табл. 3.9. Сравнивая их с результатами расчета токораспределения в параллельных фильтрах, приведенных в табл. 3.8, можно отметить следующее.

**Т а б л и ц а 3.9**  
**Токораспределение фильтруемой гармоники в параллельных фильтрах с «перемычкой»**

Режим	Токи в долях от $I_n$				
	$I_{L1}^*$	$I_{L2}^*$	$I_{C1}^*$	$I_{C2}^*$	$I_{Cn}^*$
1	0,496	0,496	0,496	0,496	0,125
2	0,346	0,398	0,372	0,372	0,268
3	0,442	0,442	0,453	0,430	0,156
4	0,561	0,561	0,547	0,575	0,194
5	0,938	0,938	0,938	0,938	0,936
6	0,470	0,470	0,489	0,451	0,130
7	0,437	0,446	0,457	0,426	0,157
8	0,517	0,559	0,536	0,541	0,161
9	0,418	0,480	0,470	0,427	0,149
10	0,372	0,428	0,430	0,371	0,219

1. В режимах, характеризующихся отклонением значений параметров одного элемента параллельных фильтров от номинального значения (режимы 2, 3, 4) или отклонением параметров обоих фильтров от резонансной настройки в одну и ту же сторону (в емкостную или индуктивную), схема с «перемычкой» не улучшает существенно качество фильтрации, но обеспечивает выравнивание и равномерность токовой загрузки элементов фильтров. Так, в режиме 3 ток в перегруженном втором фильтре уменьшился с  $0,722I_n$  в исходной схеме до  $I_{L2} = 0,442I_n$  и  $I_{c2} = 0,43I_n$  в схеме с перемычкой. Улучшилось и качество фильтрации: в сети проходит ток, равный  $0,156I_n$  против  $0,182I_n$  в исходной схеме.

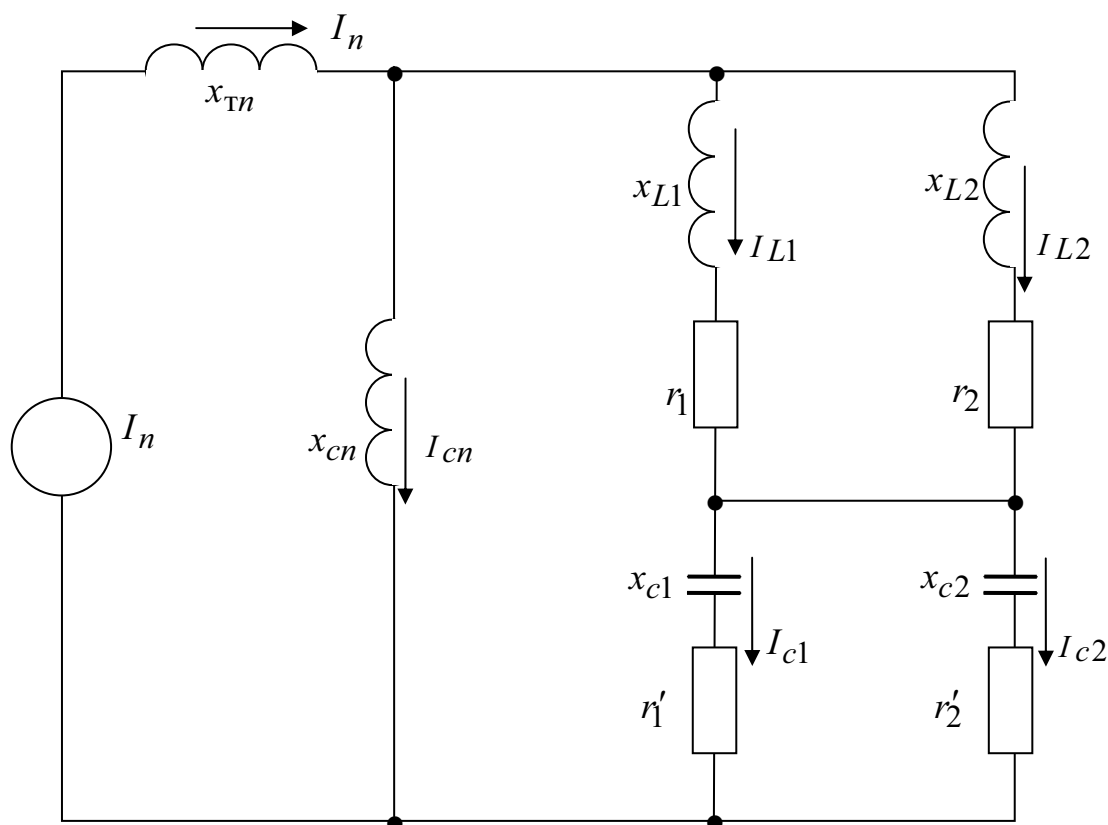


Рис. 3.24. Схема замещения подстанции при наличии параллельно установленных силовых фильтров высших гармоник с соединенными средними точками (схема с перемычкой)

2. В режимах разнознакового разбаланса фильтров от резонансной настройки (режимы 6, 7, 8, 9, 10) проявляются преимущества схемы с «перемычкой». Наряду с выравниванием токораспределения в фильтрах происходит существенное уменьшение их загрузки током гармоники и значительное улучшение качества фильтрации. Особенно ярко это проявляется в режиме 10 (см. вывод 3 предыдущего исследования). В исходной схеме в этом режиме 1-й фильтр был перегружен в 1,6 раза,

2-й в 3,2 раза, в сети проходил ток гармоник, больший суммарного тока, генерируемого всеми источниками, т. е. когда возникал режим «антифильтрации».

Таким образом, соединение накоротко средних точек параллельно работающих фильтров одной гармоники – простое и дешевое средство выравнивания тока гармоник при отклонении параметров от резонансной гармоники и позволяющее осуществить защиту элементов параллельных фильтров от перегрузки по току гармоник. Кроме того, схема с «перемычкой» позволяет поддерживать на достаточно высоком уровне качество фильтрации гармоник тока в сети.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Назовите основные показатели несинусоидальности напряжения в системах электроснабжения и их нормативные параметры.
2. Охарактеризуйте влияние высших гармоник на основные элементы системы электроснабжения и учет электроэнергии.
3. Расскажите о вентильных преобразователях как источниках высших гармоник и какими параметрами определяется гармонический состав тока и напряжения?
4. Какие преимущества и почему проявляются в мостовых преобразователях с несимметричным управлением в сравнении с полностью управляемыми преобразователями?
5. Опишите тиристорные регуляторы мощности, установки контактной и электродуговой сварки как источники высших гармоник.
6. Какую роль и как в искажении синусоидальности кривой напряжения играют дуговые сталеплавильные печи и газоразрядные лампы?
7. Расскажите о методе расчета несинусоидальности напряжения по коммутационным искажениям при работе вентильных преобразователей.
8. В чем заключается сущность инженерного (упрощенного) метода расчета составляющих гармонического состава напряжения вентильных преобразователей?
9. Как определяется коэффициент несинусоидальности при работе группы преобразователей?
10. Как рассчитываются токи гармоник и коэффициент несинусоидальности при работе дуговых сталеплавильных печей?
11. От каких параметров и каким образом зависят токи гармоник и их напряжение при работе тиристорно-реакторной группы?
12. Какие процессы происходят в питающей сети с нелинейной нагрузкой при подключении конденсаторной батареи?

13. Почему при подключении батареи конденсаторов в сеть с нелинейной нагрузкой они перегружаются токами высших гармоник?
14. Каким образом защищаются батареи конденсаторов от токов высших гармоник?
15. Назовите и охарактеризуйте методы снижения гармоник в электрических сетях.
16. Поясните структуру, подключение, назначение и принцип работы силовых резонансных фильтров.
17. Как осуществляется выбор мощности ФКУ с учетом косвенной компенсации потребления реактивной мощности с помощью регулируемого реактора?
18. Каковы особенности параллельной работы фильтров высших гармоник?
19. Каким методом и как достигается равномерная загрузка элементов фильтра и улучшение фильтрующей способности параллельных фильтров?

## 4. НЕСИММЕТРИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Несимметрия напряжений и токов трехфазной системы является одним из важнейших показателей качества электроэнергии. Причиной появления несимметрии напряжений и токов являются несимметричные режимы эксплуатации системы электроснабжения. Широкое применение различного рода однофазных электротермических установок значительной мощности (до 10000 кВт) [8] и трехфазных электродуговых печей также привело к значительному увеличению доли несимметричных нагрузок в системах электроснабжения.

*Несимметрия напряжений* характеризуется следующими показателями:

- коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2U}$ , равный отношению напряжения обратной последовательности  $U_2$  основной частоты к номинальному линейному напряжению  $U_{ном}$ , %;
- коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности  $K_{0U}$ , равный отношению напряжения нулевой последовательности  $U_0$  к номинальному фазному напряжению  $U_{ном}$ , %.

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

Нормально допустимое и предельно допустимое значения 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.

### 4.1. Влияние несимметричных нагрузок на работу электроприемников

Влияние несимметрии напряжений и токов и одновременно несинусоидальности части нагрузок удобно рассмотреть на примере наиболее распространенного вида электроприемников – асинхронном двигателе.

Для анализа и расчетов несимметричных режимов в трехфазных цепях применяется метод симметричных составляющих. Суть метода состоит в представлении любой трехфазной несимметричной системы в виде суммы трех симметричных составляющих: систем прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Симметричные составляющие напряжений прямой  $U_1$ , обратной  $U_2$  и нулевой  $U_0$  последовательностей определяют по известным соотношениям:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \frac{1}{3} \left( \dot{U}_a + a \dot{U}_b + a^2 \dot{U}_c \right); \\ \dot{U}_2 &= \frac{1}{3} \left( \dot{U}_a + a^2 \dot{U}_b + a \dot{U}_c \right); \\ \dot{U}_0 &= \frac{1}{3} \left( \dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c \right), \end{aligned} \quad (4.1)$$

где  $U_a, U_b, U_c$  – фазные напряжения сети;  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$  – комплексное число, называемое фазным множителем;

$$a^2 = e^{j\frac{2\pi}{3}} e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Обычно питание статорной обмотки двигателя осуществляется по трехпроводной схеме. В этом случае система несимметричных первичных напряжений –  $U_A, U_B, U_C$  может быть представлена как сумма составляющих прямой  $U_{A1}, U_{B1}, U_{C1}$  и обратной  $U_{A2}, U_{B2}, U_{C2}$  последовательностей.

Тогда и токи в обмотке статора машины можно представить как сумму токов прямой  $I_{A1}, I_{B1}, I_{C1}$  и обратной последовательностей  $I_{A2}, I_{B2}, I_{C2}$ , обусловленных симметричными системами напряжений прямой и обратной последовательностей.

Токи прямой и обратной последовательностей могут быть определены с помощью схем замещения асинхронной машины для напряжений прямой и обратной последовательностей (рис. 4.1, а, б) [6].

Скольжение ротора относительно поля прямой последовательности

$$S_1 = (\Omega_1 - \Omega) / \Omega_1, \quad (4.2)$$

где  $\Omega_1$  – частота вращения поля прямой последовательности;  $\Omega$  – частота вращения ротора.

Величина тока прямой последовательности равна

$$\dot{I}_{11} = \dot{U}_1 / Z_{11}, \quad (4.3)$$



где  $Z_{11} = (r_1 + jx_1) + (z_0^{-1} + z_{21}^{-1})^{-1}$  – сопротивление фазы обмотки статора для токов прямой последовательности.

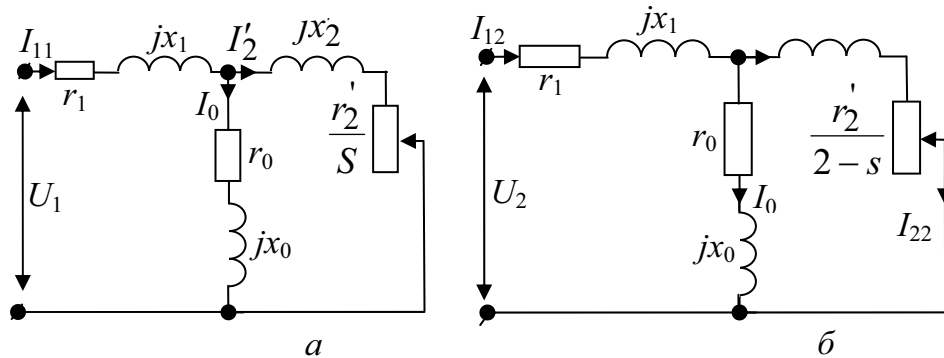


Рис. 4.1. Схемы замещения асинхронной машины для напряжений: а – прямой и б – обратной последовательности

Для определения тока обратной последовательности  $I_{12}$  используется схема замещения, приведенная на рис. 4.1, б, отличающаяся от схемы замещения для тока прямой последовательности только тем, что в нее вводится скольжение ротора по отношению к полю обратной последовательности

$$S_2 = (-\Omega_1 - \Omega)/(-\Omega_1) = 2 - S, \quad (4.4)$$

где  $\Omega_1$  – частота вращения поля обратной последовательности;  
 $\Omega = \Omega_1(1-S)$  – частота вращения ротора, выраженная через скольжение относительно прямого поля.

Ток обратной последовательности равен

$$\overset{\bullet}{I}_{12} = \overset{\bullet}{U}_2 / \overset{\bullet}{Z}_{12}, \quad (4.5)$$

где  $Z_{12} = (r_1 + jx_1) + (Z_0^{-1} + Z_{22}^{-1})^{-1}$  – сопротивление фазы обмотки статора для токов обратной последовательности;  $Z_{22} = r_2'/(2-S) + jx_2'$  – эквивалентное сопротивление ротора для токов обратной последовательности.

Расчет сопротивлений  $r_2$  и  $x_2$  для токов обратной последовательности производится с учетом того, что частота этих токов  $f_{22} = (2-S)f_1$  много больше частоты токов прямой последовательности в роторе  $f_{21} = Sf_1$ .

Полные токи в каждой из фаз статора равны:

$$I_A = I_{11} + I_{12}; \quad I_B = a^2 I_{11} + a I_{12}; \quad I_C = a I_{11} + a^2 I_{12}; \quad (4.6)$$

Степень несимметрии токов фаз характеризуются отношением  $I_{12}/I_{11}$ .

Физическую картину влияния несимметрии и несинусоидальности напряжения легко показать, если, используя метод наложения, представить асинхронный двигатель, подключенный к сети с несимметрией и несинусоидальностью напряжения, в виде ряда двигателей, расположенных на одном валу и создающих эквивалентный вращающий момент [9]. При этом каждый двигатель включен на напряжение своей частоты (т. е. соответствующей гармоники), своего чередования фаз – в зависимости от той симметричной составляющей, которую он эквивалентизирует, и имеет соответствующие параметры: напряжение, частоту вращения и т. д.

Если общий вал всего ряда двигателей имеет частоту вращения  $n_2$  при синхронной частоте вращения  $n_c$ , то скольжение двигателя, включенного на напряжение прямой последовательности первой гармоники, будет равно

$$S_1 = \frac{n_c - n_2}{n_c}. \quad (4.7)$$

Для эквивалентных двигателей более высоких частот высших гармоник синхронная частота вращения в  $n$  раз больше и скольжение будет равно

$$S_n = 1 \pm \frac{1 - S_1}{n}, \quad (4.8)$$

где знак плюс соответствует симметричным составляющим, создающим встречные поля вращения, а знак минус – создающим поля, направленными согласно с основным вращающим магнитным полем.

Из (4.8) видно, что для всех гармоник, кроме первой, скольжение  $S \geq 1$ , так как с ростом  $n$  второе слагаемое из-за роста знаменателя приближается к нулю. Это значит, что все эквивалентные двигатели, кроме первого, можно рассматривать как асинхронный двигатель в заторможенном состоянии, т. е. в режиме КЗ. И только двигатель, подключенный к напряжению первой гармоники, имеет момент и потери как реальный двигатель, включенный на симметричное синусоидальное напряжение 50 Гц. Все остальные двигатели эквивалентного ряда лишь вызывают дополнительные потери, приводящие к перегреву ротора и статора.

Таким образом, при небольшой несимметрии машина работает в тормозном режиме по отношению к полю обратной последовательности, которое соответствует величине скольжения  $1 < S < 2$ . Механическая характеристика двигателя при этом будет иметь вид, представленный на рис. 4.2.

При  $S = 2$  схема замещения для токов обратной последовательности может быть упрощена таким же образом, как и в режиме КЗ, когда  $S = 1$ . Поскольку  $\left| r_2'/2 + jx_2' \right| \ll \left| Z_0 \right|$ , составляющие полного сопротивления схемы для тока обратной последовательности определяются как

$$\begin{aligned} x_{12} &\approx x_1 + x_2' \approx x_k; \\ \eta_{12} &= \eta_1 + r_2'/S < r_k \ll x_{12}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Следовательно, величина тока обратной последовательности при  $S = 2$  равна

$$I_{12} = U_2 / \sqrt{r_{12}^2 + x_{12}^2} \approx U_2 / x_k. \quad (4.10)$$

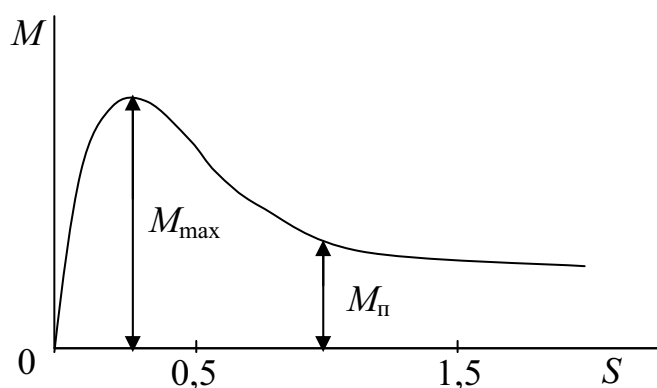


Рис. 4.2. Механическая характеристика асинхронной машины при  $1 < S < 2$

Так как сопротивление короткого замыкания  $x_k$  машины относительно мало, ток  $I_{12}$  может достигать значительной величины даже при малой степени несимметрии, характеризуемой напряжением обратной последовательности  $U_2$ . Искажения симметрии токов, при этом, получаются много больше, примерно в  $1/x_k$ . Обычно  $x_k = 0,2$  о. е., поэтому несимметрия токов в 5 раз больше несимметрии напряжений. Отсюда высокие требования к характеристикам несимметрии напряжения, которые не должны превышать предельных значений 4 % по обратной и нулевой последовательностям.

Ток обратной последовательности вызывает дополнительный нагрев машины, что сокращает срок службы двигателя и уменьшает полезную мощность двигателя. Например, при несимметрии напряжения в 4 % срок службы полностью загруженного двигателя уменьшается в два раза, а при несимметрии в 5 % – располагаемая мощность двигателя уменьшается на 5...10 % [8].

Вращающий момент  $M$ , при несимметрии питающих напряжений, представляет собой сумму момента напряжения прямой последовательности и момента, определяемого напряжением обратной последовательности

$$M = M_1 + M_2, \quad (4.11)$$

где

$$M_1 = \frac{mU_{11}^2 r_2'}{S \Omega_1 \left[ \left( r_1 + \frac{r_2'}{S} \right)^2 + x_k^2 \right]},$$

$$M_2 = \frac{mU_{12}^2 r_2'}{(2 - S) \Omega_1 \left[ \left( r_1 + \frac{r_2'}{2 - S} \right)^2 + x_k^2 \right]}.$$

В двигательном режиме, когда  $0 < S < 1$ , момент  $M_2$  действует встречно моменту  $M_1$ . Чтобы сохранить тот же результирующий момент при несимметрии напряжений, требуется увеличить  $M_1$  на величину  $M_2$ , что приводит к возрастанию скольжения  $S$ , дополнительному увеличению потерь и снижению КПД.

Аналогичное влияние несимметрии токов и напряжений оказывается на всю электросеть. Снижается пропускная способность сети, так как обычно только одна фаза загружается до минимального значения. Увеличивается пульсация выпрямленного напряжения вследствие неравенства напряжения по фазам преобразовательных агрегатов. Электрическое освещение работает в ненормальном режиме, с различными световыми потоками ламп, подключенных к разным фазам. При несимметрии напряжений неравномерно загружаются реактивной мощностью фазы батарей конденсаторов: в фазе с пониженным напряжением реактивная мощность, отдаваемая в сеть, понижается, а в других фазах повышается пропорционально квадрату напряжения. А это, в свою очередь, увеличивает несимметрию напряжений.

## 4.2. Виды несимметричных нагрузок

В этом разделе описание возможных несимметричных режимов нагрузки воспроизводится из [9] с сохранением принятых там обозначений векторов напряжений и токов.

Электрические сети промышленных предприятий, распределяющие электроэнергию на напряжении ниже 1 кВ, строятся трех- и четырехпроводными. Режимы работы этих сетей при несимметричной нагрузке различны, а при симметричной одинаковы.

Принципиальная схема трехфазной четырехпроводной сети 380 В показана на рис. 4.3. Нагрузка и источник – понижающий трансформатор (6...10)/0,4кВ – на стороне низшего напряжения НН соединяются в звезду. Линейные провода  $A_a$ ,  $B_b$ ,  $C_c$  соединяют зажимы источника и нагрузки и передают линейные токи  $I_A$ ,  $I_B$  и  $I_C$  к потребителю. Нулевой (нейтральный) провод  $00'$  соединяет нулевые точки (нейтрали) источника и нагрузки. Ток нулевого провода  $I_0$  при несимметричной нагрузке не равен нулю.

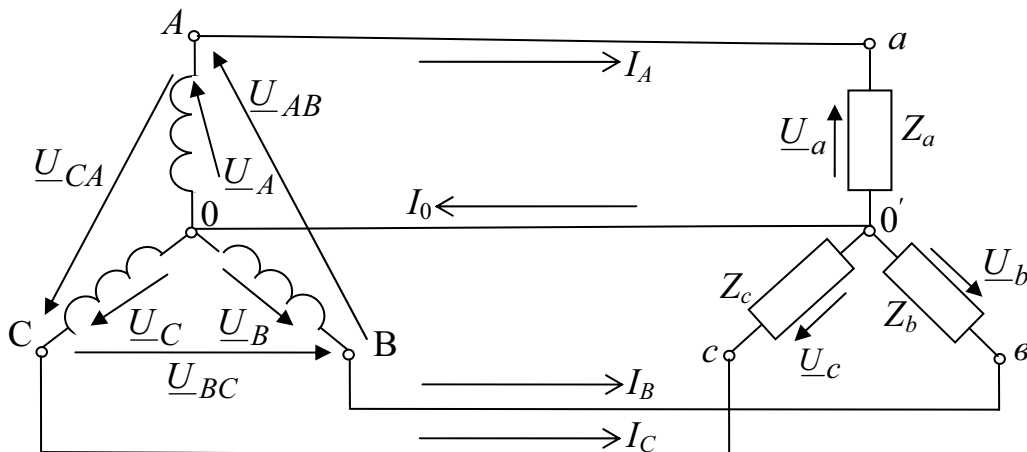


Рис. 4.3. Схема четырехпроводной трехфазной системы при соединении источника и нагрузки в звезду

Анализируя режимы систем электроснабжения промышленных предприятий при несимметричных нагрузках, будем считать, что подведенное от источников напряжение симметрично (рис. 4.4), а сопротивления линейных проводов и нулевого провода равны нулю. При таком допущении каждая фаза работает независимо от других. Токи в фазах будут зависеть лишь от нагрузочных сопротивлений, и их значения в общем случае различны

$$I_A = \frac{U_A}{Z_A}; \quad I_B = \frac{U_B}{Z_B}; \quad I_C = \frac{U_C}{Z_C}. \quad (4.12)$$

Ток в нулевом проводе равен векторной сумме фазных токов (рис. 4.5).

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C.$$

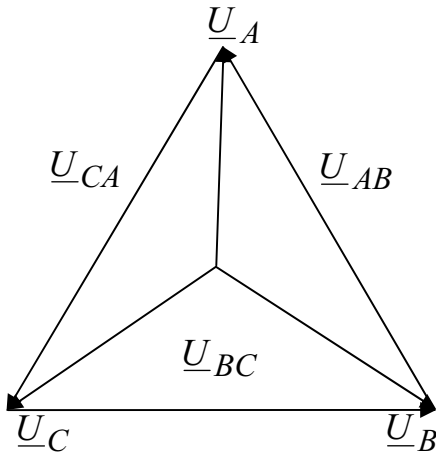


Рис. 4.4. Векторная диаграмма напряжений источника

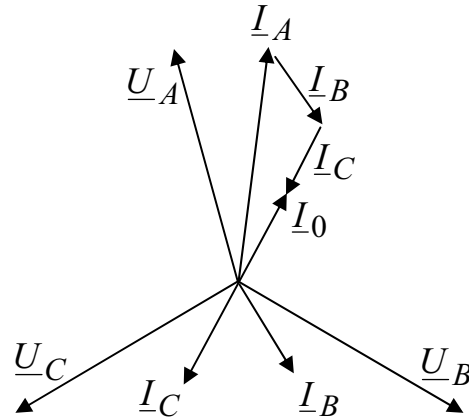


Рис. 4.5. Векторная диаграмма токов в фазах и в нулевом проводе при несимметричной нагрузке

Если в схеме рис. 4.3 разомкнуть нулевой провод, то при несимметричной нагрузке прервется ток в нулевом проводе и возникнет разность потенциалов между точками  $00'$ , называемая напряжением смещения нейтрали нагрузки  $U_0 \neq 0$ . И чем больше несимметрия нагрузок, тем больше напряжение смещения  $U_0$ . Векторная диаграмма напряжений искажается: вместо представленной на рис. 4.4 диаграммы получается диаграмма с резко измененными, несимметричными напряжениями, приведенная на рис. 4.6. Ток нейтрали  $I_0 = 0$ , сумма фазных токов  $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$ . Следовательно, несимметрия нагрузки в схеме звезды при отключенном нулевом проводе приводит к несимметрии фазных напряжений нагрузки. И лишь при симметричной нагрузке токи и напряжения во всех фазах трехпроводной системы одинаковы.

В распределительных сетях 6...10 кВ промышленных предприятий обмотки вторичного напряжения трансформаторов главных понижающих подстанций и первичные обмотки цеховых трансформаторов (6...10)/0,4кВ включаются в треугольник. Схема трехфазной цепи приведена на рис. 4.7. В отличие от схемы соединения в звезду, фазные на-

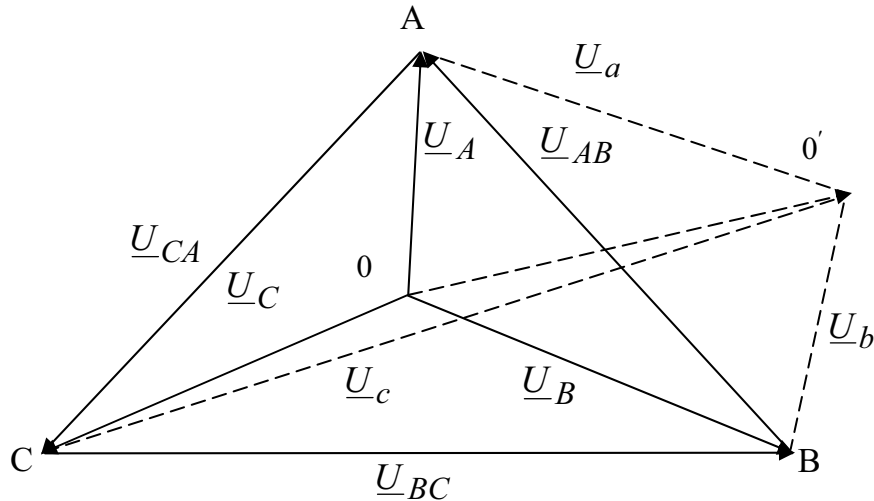


Рис. 4.6. Векторная диаграмма напряжений источника и нагрузки в трехпроводной схеме с несимметричной нагрузкой

пряжения при соединении в треугольник равны линейным напряжениям  $U_{\phi} = U_{л}$ . В трехпроводных цепях лишь при симметричной нагрузке векторы фазных и линейных токов образуют симметричные системы.

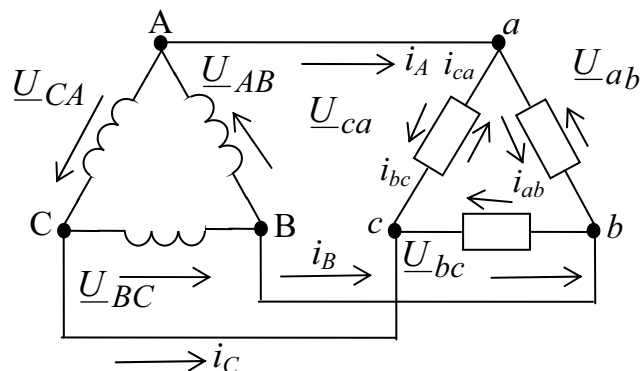


Рис. 4.7. Схема трёхпроводной трехфазной системы при соединении источника и нагрузки в треугольник

При несимметрии нагрузки в трехлинейных схемах звезды и треугольника напряжение удобно рассчитывать по методу симметричных составляющих. Для случая однофазной нагрузки (рис. 4.8, а) построены симметричные составляющие (рис. 4.8, б) и векторная диаграмма токов (рис. 4.8, в).

Примером мощной несимметричной нагрузки являются дуговые сталеплавильные печи, которые обычно являются установками трехфазного тока 6...10 и 35 кВ и работают с изолированной нейтралью.

При работе дуговых печей в сети происходит колебание значений токов дуг разных фаз, вследствие чего действующие значения токов в

любой момент времени образуют несимметричную систему. Несимметрия токов фаз приводит к несимметрии напряжения в питающей и распределительной сети. Мощности дуговых сталеплавильных печей велики, поэтому несимметрия токов и напряжений часто превышает допустимые значения, особенно в период расплавления.

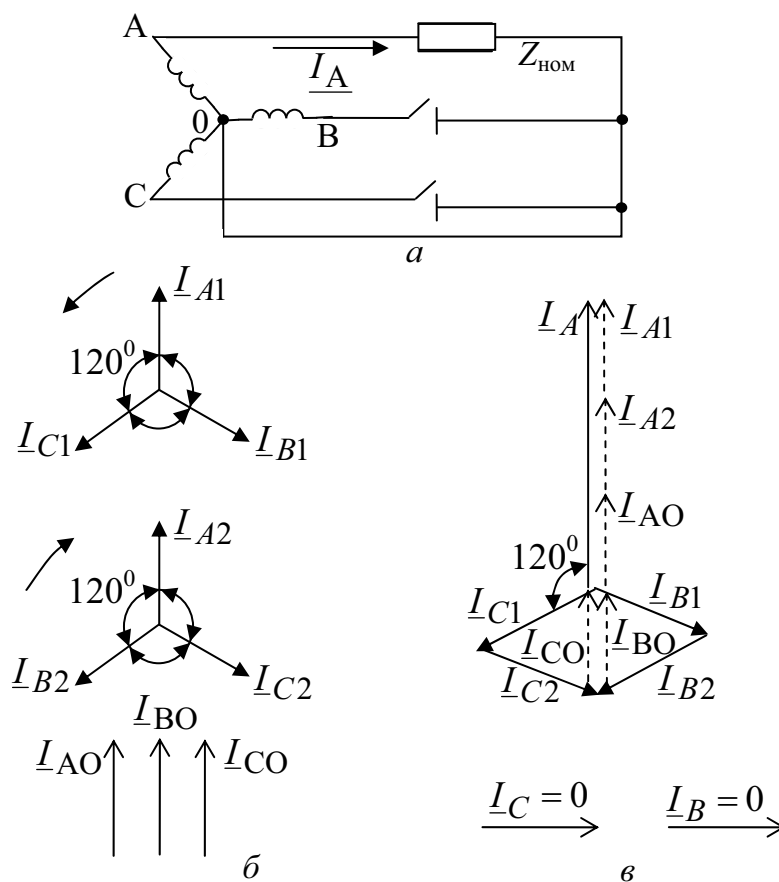


Рис. 4.8. Схема (а) и векторные диаграммы (б, в) токов трехфазной сети при однофазной нагрузке

Так как первичные и вторичные цепи печей являются трехпроводными без нулевого провода, то нулевая составляющая тока отсутствует. Модули токов трехпроводной системы образуют треугольник. При анализе несимметричного режима в этом случае целесообразно вычислять коэффициент несимметрии через модули (действующие значения) токов фаз, которые можно измерить тремя стрелочными приборами.

Наибольшее значение коэффициента несимметрии приходится на начало плавки. Практика показывает, что если вести плавку при коэффициенте несимметрии напряжений по обратной последовательности



$K_{2u} \leq 2\%$ , то уменьшается удельный расход электроэнергии на 1 т металла, сокращается время плавки и износ печного оборудования.

Кроме того, такие трехфазные нагрузки, как дуговые сталеплавильные печи, в процессе работы создают нестабильную, все время изменяющуюся несимметрию нагрузки фаз. Таким образом, несимметрия нагрузок и вызванная ею несимметрия напряжений и токов в трехфазных сетях промышленных предприятий может быть постоянной и кратковременной, перемежающейся.

### 4.3. Снижение несимметрии напряжений

Мероприятия по снижению несимметрии напряжений сводятся в основном к равномерному распределению однофазных нагрузок по фазам таким образом, чтобы коэффициент несимметрии напряжений не превышал допустимых пределов. Однако данный метод не всегда позволяет добиться желаемых результатов. В таких случаях для снижения несимметрии применяются специальные симметрирующие устройства.

Симметрирование несимметричных нагрузок с низким коэффициентом мощности можно осуществить с помощью несимметричной батареи конденсаторов (рис. 4.9), когда  $C_{BC} \neq C_{AB} \neq C_{AC}$ . В результате

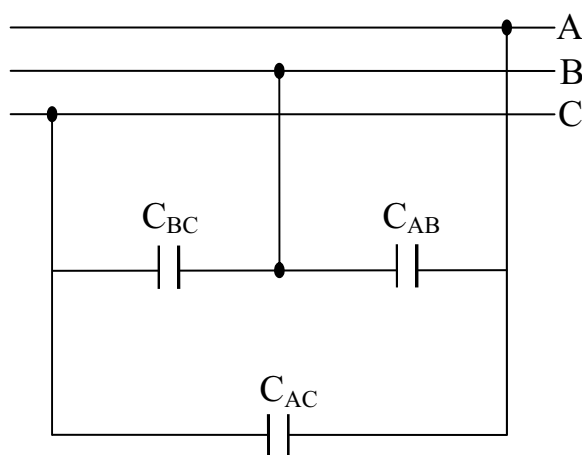


Рис. 4.9. Схема симметрирования напряжений с помощью конденсаторов

применения такой схемы удастся компенсировать несимметрию реактивных составляющих токов. Активные составляющие остаются без изменения.

На рис. 4.8 показаны схема и векторная диаграмма токов прямой, обратной и нулевой последовательностей всех трех фаз при наличии на-

грузки только в одной фазе  $A$  и результирующие векторы токов. Такой режим нагрузки создается, например, при подключении одной печи сопротивления к шинам 0,4 кВ четырехпроводной сети при отсутствии нагрузки в фазах  $B$  и  $C$ . Из рис. 4.8,  $a$  видно, что перераспределением нагрузки по фазам нельзя воспользоваться. Требуется применение симметрирующих устройств.

Симметрирование нагрузок обычно осуществляется индуктивностью и емкостью, так как включение активных сопротивлений для симметрирования привело бы к дополнительному потреблению активной мощности.

На рис. 4.10 показана схема симметрирования однофазной нагрузки (схема Штейнметца). На напряжение  $U_{BC}$  включена нагрузка  $Z_{нг}$ , а в

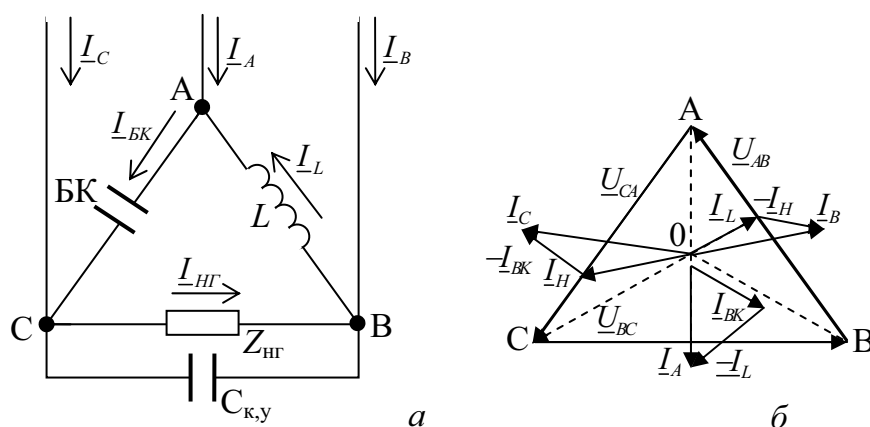


Рис. 4.10. Симметрирование однофазной (двухфазной) нагрузки:  $a$  – схема Штейнметца;  $б$  – векторная диаграмма

других двух фаз треугольника включаются симметрирующие емкость  $BK$  и индуктивность  $L$ . Параллельно нагрузке  $Z_{нг}$  включена емкость  $C_{к,у}$ , компенсирующая реактивную составляющую нагрузки. Это позволяет рассматривать нагрузку как чисто активную, при которой достигается наибольший эффект симметрирования. Требуемую мощность конденсаторной батареи и дросселя  $L$  определяют из условия

$$Q_C = Q_L = \frac{P}{\sqrt{3}}, \quad (4.13)$$

где  $P$  – активная мощность однофазной нагрузки  $R_{н}$ .

На рис. 4.10,  $б$  построена векторная диаграмма напряжений и токов в фазах нагрузки и симметрирующего устройства, построенная из центра  $O$ . Ток нагрузки  $I_{н}$  является чисто активным, совпадает по направлению с напряжением  $U_{BC}$ . Ток  $I_L$  в фазе  $AB$  индуктивный, отста-

ет от напряжения  $U_{AB}$  на  $90^\circ$ . Ток  $I_{BK}$  в фазе  $CA$  емкостный, опережает на  $90^\circ$  напряжение  $U_{CA}$ .

Сложением векторов токов фаз треугольника ( $I_n$ ,  $I_L$ ,  $I_{BK}$ ) для узлов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  находим линейные токи  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ , образующих звезду токов трехфазной цепи. Соответствующим подбором индуктивности и емкости можно добиться симметрии линейных токов в пределах нормативов.

Если активная нагрузка  $R_n$  изменяется в технологическом процессе, то необходимо регулировать параметры симметрирующего устройства  $L$ ,  $C$  так, чтобы избежать недопустимой несимметрии при неполной нагрузке. Для этого применяются регулируемые конденсаторные батареи и дроссели с подмагничиванием сердечника.

Перспективными вариантами улучшения симметрии напряжений трехфазной системы являются схемы преобразования числа фаз, обеспечивающие равномерную загрузку питающей сети. В наибольшей степени в различных системах преобразования числа фаз нуждаются: линии электропередач высокого напряжения; выпрямители и преобразователи частоты; тяговые нагрузки железных дорог, электрифицированных на переменном токе; некоторые типы электротехнологических установок; асинхронные двигатели и другие электроприемники.

Принципиально преобразование числа фаз может осуществляться трансформаторным способом или с помощью тиристорных преобразователей.

Примером преобразователя числа фаз с использованием трансформаторов является схема Скотта, показанная на рис. 4.11.

Схема состоит из двух трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$  и обеспечивает формирование двухфазной системы напряжений  $U_1 = U_2 = U$  с симметричной загрузкой фаз трехфазной системы питающих напряжений при равномерной загрузке фаз вторичной цепи трехфазно-двухфазного трансформатора.

Преобразователь числа фаз с симметричной загрузкой питающей сети может быть выполнен по схеме выпрямительно-инверторного преобразователя, показанной на рис. 4.12. Схема состоит из выпрямителя, преобразующего трехфазное сетевое напряжение в напряжение постоянного тока с равномерной загрузкой фаз питающей сети. Выпрямленное напряжение с помощью однофазного автономного инвертора напряжения АИН преобразуется в однофазный переменный ток. Обратные диоды ОД служат для замыкания цепи реактивного тока нагрузки индуктивного характера. Таким образом, рассмотренный тиристорный преобразователь числа фаз позволяет произвести подключение однофазной нагрузки без внесения несимметрии в питающую сеть. Выпрямительно-инверторные преобразователи могут осуществлять и обратное

преобразование однофазного напряжения в трехфазное симметричное. В этом смысле статические преобразователи параметров электроэнергии позволяют решить проблему электромагнитной совместимости  $n$ -фазных электроприемников с питающей сетью любой фазности.

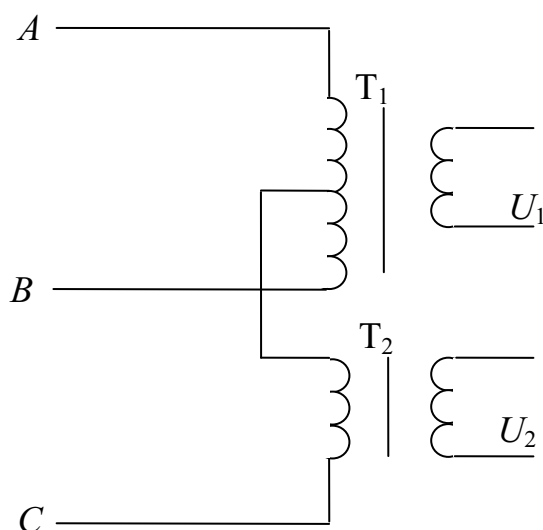


Рис. 4.11. Схема Скотта

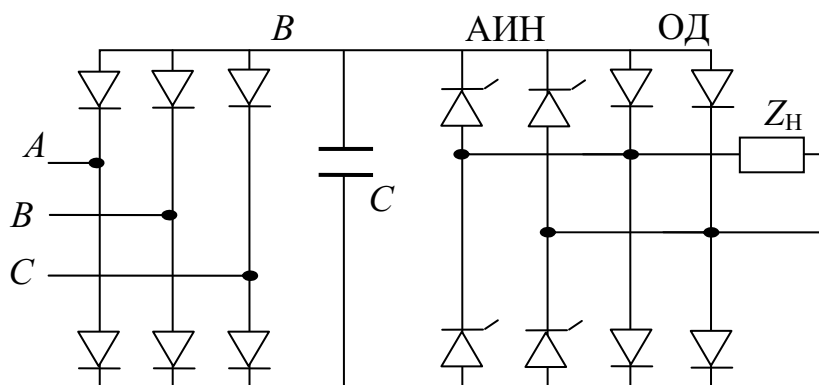


Рис. 4.12. Трехфазно-однофазный вентильный преобразователь

Следует отметить, что кроме классических схем преобразования частоты и числа фаз напряжения переменного тока, существуют специальные схемы преобразования числа фаз с помощью трансформаторно-тиристорных устройств, принцип действия которых основан на суммировании по определенному алгоритму полуволн питающего напряжения трехфазной сети. Основным преимуществом таких схем перед тиристорными преобразователями числа фаз является меньшее содержание

высших гармонических составляющих в кривых сетевого тока и тока нагрузки.

Для принятия решения по выбору того или иного симметрирующего устройства прежде всего необходимо определить напряжение обратной последовательности. В разветвленной электрической сети промышленных предприятий это обычно выполняется по методу симметричных составляющих с представлением выражений несимметричных нагрузок фаз в комплексной форме. Для практических расчетов можно применять более простое выражение коэффициента несимметрии [9], %

$$K_{2u} = \frac{S_{н.о}}{S_K} 100, \quad (4.14)$$

где  $S_{н.о}$  – расчетная мощность однофазной нагрузки;  $S_K$  – мощность КЗ в точке подключения однофазной нагрузки.

При наличии в рассматриваемом узле нагрузки источников высших гармоник следует проверять, не возникают ли в симметрирующем устройстве резонансы токов на частотах генерируемых гармоник. Если по этой причине появляется перегрузка БК токами высших гармоник, то необходимо предусмотреть их защиту.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Назовите нормативные параметры, характеризующие несимметрию напряжений.
2. Как оценивается влияние несимметрии напряжения на работу асинхронных двигателей?
3. Какое влияние оказывает несимметрия напряжений в питающей сети на различные элементы системы электроснабжения?
4. Назовите основные виды и примеры несимметрии нагрузок в промышленных электросетях.
5. Укажите основные способы уменьшения несимметрии напряжений в системе электроснабжения.
6. Поясните с помощью векторной диаграммы сущность симметрирования однофазной нагрузки по схеме Штейнметца.

## 5. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Рассмотренная ранее часть показателей качества электроэнергии (КЭЭ) характеризует установившиеся режимы работы электрооборудования электроснабжающей организации и потребителей электрической энергии и дает количественную оценку по КЭЭ особенностям технологического процесса производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии.

В этом разделе под динамическими характеристиками показателей качества электроэнергии следует понимать согласно определению [14] показатели КЭЭ, которые характеризуют кратковременные помехи, возникающие в электрической сети в результате коммутационных процессов, грозовых атмосферных явлений, работы средств защиты и автоматики и в послеаварийных режимах. Для количественной оценки этих показателей КЭЭ должны измеряться амплитуда, длительность, частота их появления и другие характеристики, установленные, но не нормируемые стандартом. Статистическая обработка этих данных позволяет рассчитать обобщенные показатели, характеризующие конкретную электрическую сеть, с точки зрения вероятности появления кратковременных помех.

### 5.1. Отклонения и размах колебаний частоты напряжения питающей сети

Под отклонением частоты понимают разность между усредненным значением частоты  $f_y$  и номинальным  $f_{\text{НОМ}}$  значениями основной частоты

$$\Delta f = f_y - f_{\text{НОМ}} \quad \text{или} \quad \Delta f = \frac{f_y - f_{\text{НОМ}}}{f_{\text{НОМ}}} 100, \% \quad (5.1)$$

Усредненное значение частоты  $f_y$  в герцах вычисляют как результат усреднения  $N$  наблюдений  $f_i$  на интервале времени, равном 20 с, по формуле

$$f_y = \frac{\sum_{i=1}^N f_i}{N}. \quad (5.2)$$

Число наблюдений  $N$  должно быть не менее 15.

Качество электрической энергии по отклонению частоты считают

соответствующим требованиям стандарта, если все измеренные в течение 24 ч значения отклонений частоты находятся в интервале, ограниченном предельно допустимыми значениями  $\pm 0,4$  Гц, а не менее 95 % всех измеренных значений отклонения частоты находятся в интервале, ограниченном нормально допустимыми значениями  $\pm 0,2$  Гц.

Размах колебаний частоты – разность между наибольшим  $f_{\text{нб}}$  и наименьшим  $f_{\text{нм}}$  значениями основной частоты за определенный промежуток времени

$$\delta f = f_{\text{нб}} - f_{\text{нм}} \text{ или } \delta f = \frac{f_{\text{нб}} - f_{\text{нм}}}{f_{\text{ном}}} 100, \% \quad (5.3)$$

Под колебанием частоты понимают ее изменения, происходящие со скоростью 0,2 Гц в секунду. Размах колебаний частоты не должен превышать 0,2 Гц.

Приемники электроэнергии на промышленных предприятиях, ввиду их малой мощности по сравнению с суммарной мощностью всех генераторов системы, практически не могут оказывать существенного влияния на отклонения частоты в энергосистеме. Исключение составляют мощные по отношению к мощности КЗ в точке их подключения электроприемники с резкопеременным характером нагрузки.

Изменения отклонений и размаха колебаний частоты даже в жестко установленных пределах влияют на работу приемников электроэнергии. Асинхронные и синхронные электродвигатели с постоянным моментом на валу изменяют частоту вращения  $\omega$  в зависимости от частоты сети.

Асинхронные двигатели с моментом, зависящим от скорости во второй степени, значительно изменяют свою производительность при отклонениях частоты, возможны даже нарушения технологического процесса. Характеристики ряда потребителей, таких как электрические печи сопротивления, дуговые печи, лампы накаливания, не зависят от изменений частоты.

Неблагоприятно влияют отклонения частоты на сети промышленных предприятий, в этом случае увеличиваются потери мощности и напряжения. В случае установки силовых фильтров с защитными реакторами возможны резонансные явления. Так, при некотором значении отклонения частоты в цепи защитный реактор – конденсаторная батарея возникает резонанс напряжения на частоте гармоники  $n$ . При дальнейшем снижении частоты цепь будет иметь емкостный характер для всех высших гармоник их источника. Это может послужить причиной перегрузок конденсаторной батареи по току, а также может привести к перераспределению высших гармоник в сети.

## 5.2. Провал напряжения

Под провалом напряжения понимается внезапное понижение напряжения в сети ниже  $0,9U_{\text{ном}}$ , за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему (рис. 5.1). Провал напряжения характеризуется длительностью провала  $\Delta t_{\text{п}}$ . Предельная величина  $\Delta t_{\text{п}}$  в сетях до 20 кВ включительно согласно ГОСТ 13109-97 равна 30 секундам.

Измерение длительности провала напряжения  $\Delta t_{\text{п}}$  в секундах осуществляется следующим образом: фиксируют начальный момент времени  $t_{\text{н}}$  резкого спада (с длительностью менее 10 мс) огибающей среднеквадратических значений напряжения, определенных на каждом полупериоде основной частоты, ниже уровня  $0,9U_{\text{ном}}$  (рис. 5.1).

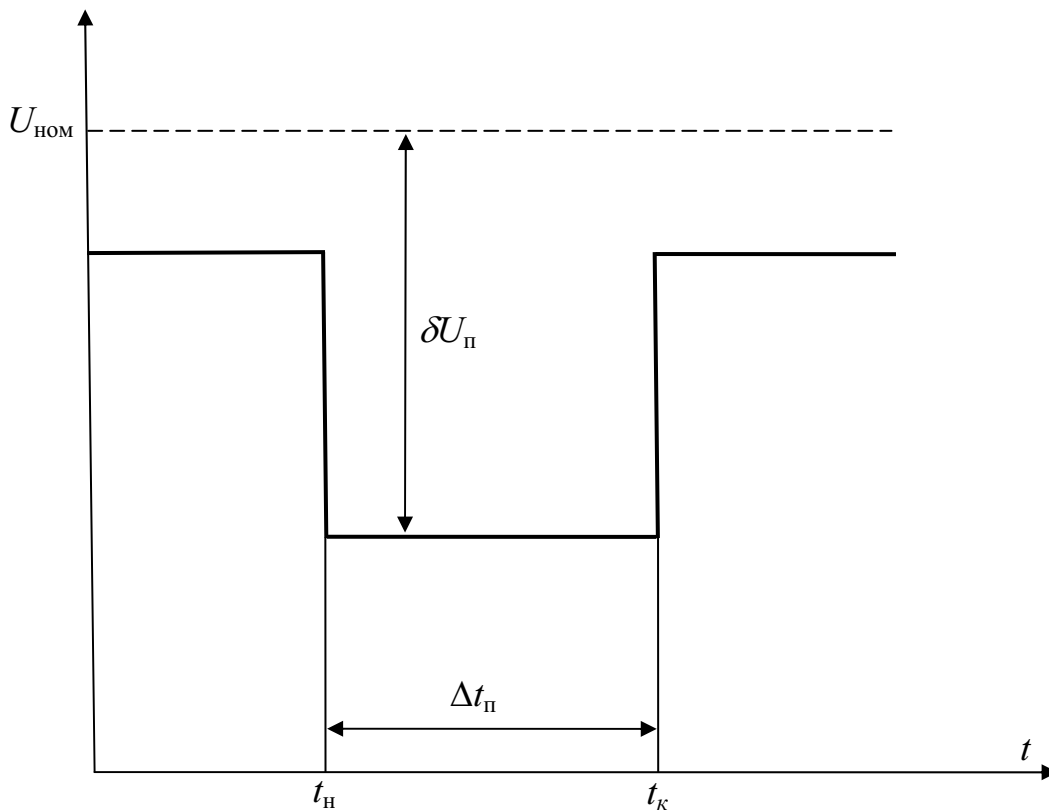


Рис. 5.1. Провал напряжения

Фиксируют конечный момент времени  $t_{\text{к}}$  восстановления среднеквадратического значения напряжения до  $0,9U_{\text{ном}}$ . Вычисляют длительность провала напряжения  $\Delta t_{\text{п}}$  в секундах по формуле

$$\Delta t_{\text{п}} = t_{\text{к}} - t_{\text{н}}. \quad (5.4)$$



Качество электрической энергии по длительности провалов напряжения в точке общего присоединения считают соответствующим требованиям стандарта, если наибольшее из всех измеренных в течение продолжительного периода наблюдения (как правило, в течение года) длительностей провалов напряжения не превышает предельно допустимого значения.

Для определения глубины провала  $\delta U_{\Pi}$  измеряют среднеквадратичные значения напряжения  $U$  за каждый полупериод основной частоты во время провала напряжения. Из данных измерения определяют минимальное среднеквадратичное значение напряжения  $U_{\min}$ .

Глубина провала напряжения определяется  $\delta U_{\Pi}$  как

$$\delta U_{\Pi} = \frac{U_{\text{ном}} - U_{\min}}{U_{\text{ном}}} 100, \% \quad (5.5)$$

Частота появления провалов напряжения  $F_{\Pi}$  в процентах вычисляют по формуле

$$F_{\Pi} = \frac{m(\delta U_{\Pi}, \Delta t_{\Pi})}{M} 100, \quad (5.6)$$

где  $m(\delta U_{\Pi}, \Delta t_{\Pi})$  – число провалов напряжения глубиной  $\delta U_{\Pi}$  и длительностью  $\Delta t_{\Pi}$  за период наблюдения  $T$ ;  $M$  – суммарное число провалов напряжения за время наблюдения  $T$ .

### 5.3. Импульс напряжения

Импульс напряжения, т. е. резкое изменение напряжения в точке электрической сети, за которым следует восстановление до номинального или близкого к номинальному напряжению, характеризуется показателем импульсного напряжения  $U_{\text{имп}}$ .

Импульсное напряжение  $U_{\text{имп}}$  (В, кВ) измеряют как максимальное значение напряжения при резком его изменении (длительность фронта импульса не более 5 мс) (рис. 5.2).

Для определения длительности импульса напряжения по уровню 0,5 его амплитуды  $t_{\text{имп}0,5}$  в микросекундах, миллисекундах выделяют из общей кривой напряжения импульс напряжения и определяют амплитуду этого импульса  $U_{\text{имп}A}$  как максимальное значение импульса напряжения (В, кВ). Затем определяют моменты времени  $t_{\text{н}0,5}$  и  $t_{\text{к}0,5}$ , соответствующие пересечению кривой импульса напряжения горизонтальной линией, проведенной на уровне половины амплитуды импульса. Дли-

тельность импульса напряжения по уровню 0,5 его амплитуды определяется по формуле

$$\Delta t_{\text{имп}0,5} = t_{\text{к}0,5} - t_{\text{н}0,5}. \quad (5.7)$$

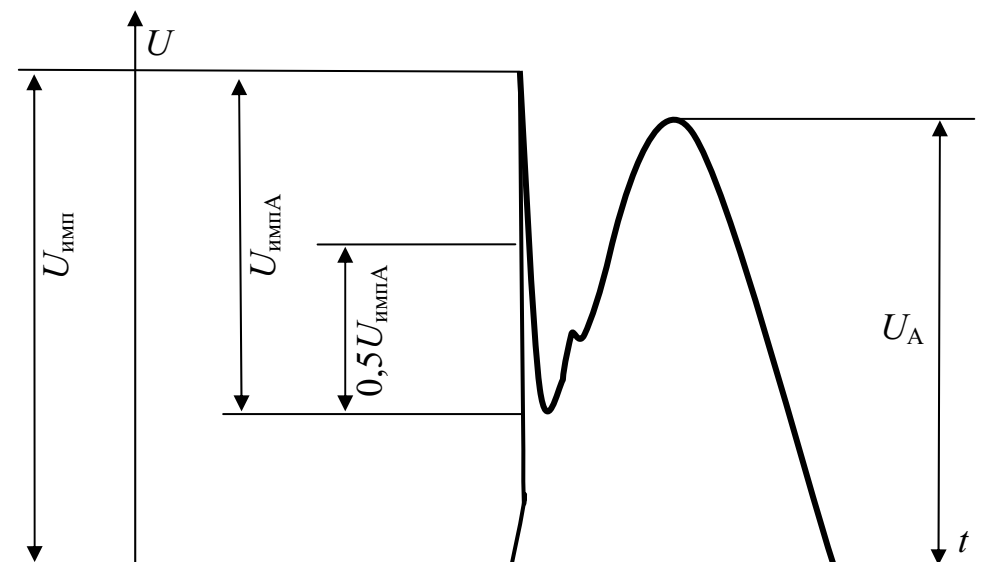


Рис. 5.2. Параметры импульсного напряжения

Величина импульсного напряжения не регламентируется ГОСТом, приводятся лишь справочные значения импульсного напряжения. Например, значения коммутационных импульсных напряжений при их длительности на уровне 0,5 амплитуды импульса, равной 1000...5000 мкс, приведены в табл. 5.1.

**Таблица 5.1**  
**Коммутационные импульсные напряжения**

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

#### 5.4. Временное перенапряжение

Временное перенапряжение характеризуется показателем временного перенапряжения  $K_{\text{пер}U}$  (рис. 5.3).

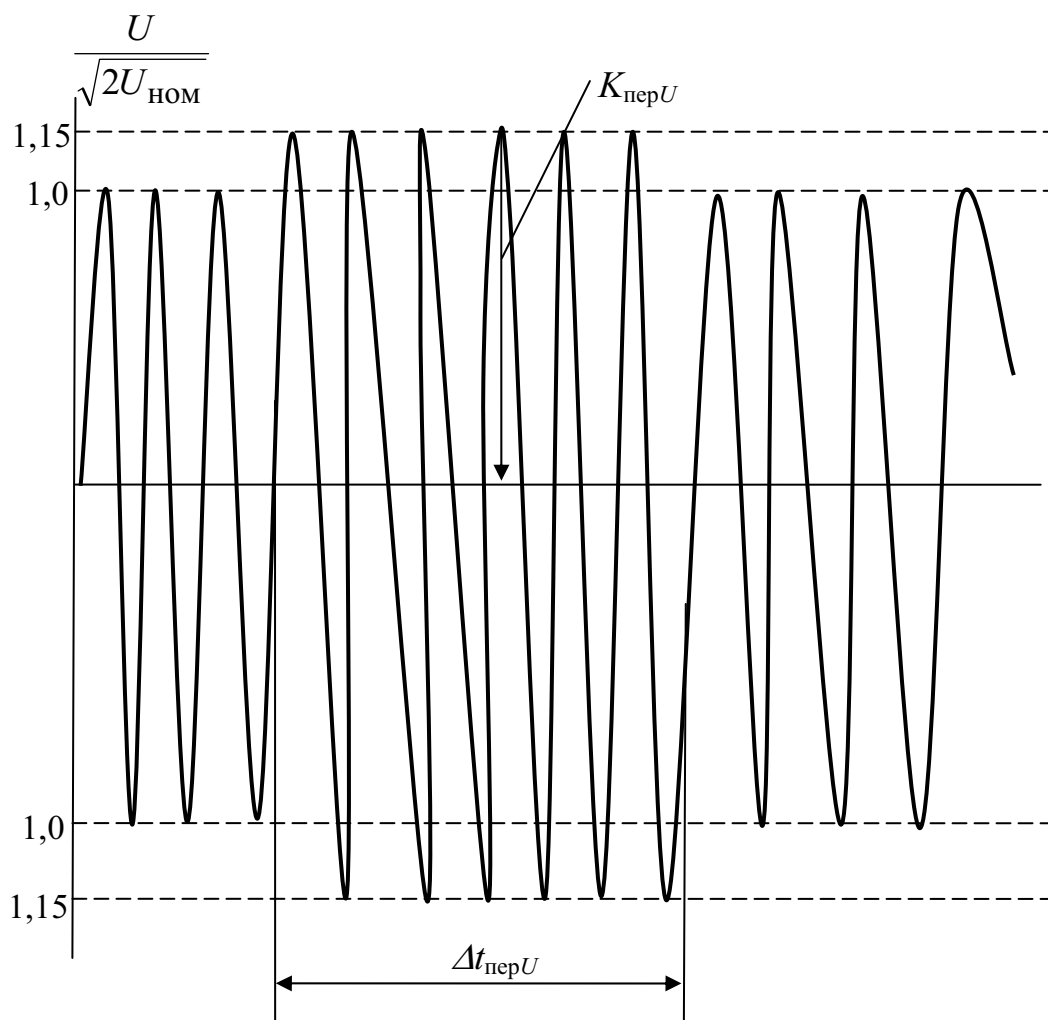


Рис. 5.3. Временное перенапряжение

Для определения коэффициента временного перенапряжения измеряют амплитудные значения напряжения  $U_A$  (В, кВ) на каждом полупериоде основной частоты при резком (длительность фронта до 5 мс) превышении уровня напряжения, равного  $1,1\sqrt{2}U_{\text{НОМ}}$ . Из измеренных значений напряжения определяют максимальное  $U_{\text{Аmax}}$ . С целью исключения влияния коммутационного импульса на значение коэффициента временного перенапряжения определение  $U_{\text{Аmax}}$  осуществляют через 0,04 с от момента превышения напряжением уровня, равного  $1,1U_{\text{НОМ}}$ .

Коэффициент временного перенапряжения вычисляют (в о. е.) по формуле

$$K_U = \frac{U_{A\max}}{\sqrt{2} U_{\text{ном}}} \quad (5.8)$$

Длительность временного перенапряжения  $\Delta t_{\text{пер}}$  определяют как разность моментов времени спада напряжения  $t_{\text{к пер}}$  до уровня  $1,1U_{\text{ном}}$  и превышения  $t_{\text{н пер}}$  действующим значением напряжения уровня, равного  $1,1U_{\text{ном}}$ .

$$\Delta t_{\text{пер}U} = t_{\text{к пер}} - t_{\text{н пер}} \quad (5.9)$$

Значения коэффициента временного перенапряжения в точках присоединения электрической сети общего назначения в зависимости от длительности временных перенапряжений указаны в табл. 5.2.

**Т а б л и ц а 5.2**  
**Коэффициенты временного перенапряжения  $K_{\text{пер}U}$**

Длительность временного перенапряжения, с	до 1	до 20	до 60
Коэффициент временного перенапряжения, о. е.	1,47	1,31	1,15

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

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Какие показатели качества электроэнергии, характеризующие кратковременные помехи, Вы знаете?
2. Как определяются отклонения и размах колебаний частоты напряжения питающей сети?
3. Что понимается под провалом напряжения, и какими параметрами он характеризуется?
4. Какими параметрами характеризуется импульс напряжения?
5. Что следует считать временным перенапряжением в питающей сети, и каковы характеристики перенапряжения?

## 6. КАЧЕСТВО НАПРЯЖЕНИЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С РЕЗКОПЕРЕМЕННЫМИ НАГРУЗКАМИ

### 6.1. Отклонения и колебания напряжения

При работе резкопеременных нагрузок наиболее заметное снижение качества электроэнергии проявляется в виде колебаний напряжения и отклонений его от номинального значения.

Основными вопросами, возникающими при работе систем электроснабжения с резкопеременными нагрузками, являются определение расчетных активных и реактивных нагрузок, определение размахов колебаний активной и реактивной мощности и связанных с ними колебаний напряжения и частоты, расчет и выбор параметров устройств, улучшающих качество электроэнергии.

Большие отклонения  $\delta U$  и колебания напряжения  $\delta U_t$  в питающей сети возникают при работе мощных (по отношению к мощности КЗ) потребителей электроэнергии, нагрузка которых имеет резкопеременный характер. К таким потребителям могут быть отнесены дуговые печи, сварочные аппараты и управляемые вентильные преобразователи.

Возникновение отклонений и колебаний напряжения рассмотрим на примере работы нагрузки с мощным вентильным преобразователем [9]. Схема его питания и схема замещения питающей сети приведены на рис. 6.1. Эквивалентное суммарное сопротивление питающей сети представлено индуктивным  $x_\Sigma$  и активным  $r_\Sigma$  сопротивлениями. Соотношение индуктивного и активного сопротивлений питающей сети для промышленных сетей можно оценивать в пределах  $X_\Sigma/r_\Sigma = 10 \dots 30$ .

Векторная диаграмма напряжений приведена на рис. 6.2.

Ток нагрузки вентильного преобразователя  $I_{\text{НГ}}$  представлен векторной суммой активной и реактивной составляющих тока. При отключенном вентильном преобразователе напряжение на шинах равно напряжению холостого хода  $U_x = U_{\text{НГ}}$ , а при допущении отсутствия прочей нагрузки оно совпадает с вектором напряжения питающей системы. При включении нагрузки через сопротивление питающей системы течет ток нагрузки, который создает изменение напряжения на шинах как по фазе, так и по амплитуде.

Изменение напряжения представлено векторами  $I_a r_\Sigma; I_p x_\Sigma; I_a x_\Sigma; I_p r_\Sigma$ . Из векторной диаграммы видно, что изменение (уменьшение) напряжения определяется в основном двумя векторами:

$I_a r_\Sigma$  и  $I_p x_\Sigma$  (это тем более справедливо, что на практике угол  $\delta$  не превышает  $10^\circ$ ). Следовательно, с достаточной точностью для практических расчетов отклонения и колебания напряжения могут быть определены по формуле

$$\delta U = \delta U_t \approx \frac{I_a r_\Sigma + I_p x_\Sigma}{U_{\text{ном}}} \quad (6.1)$$

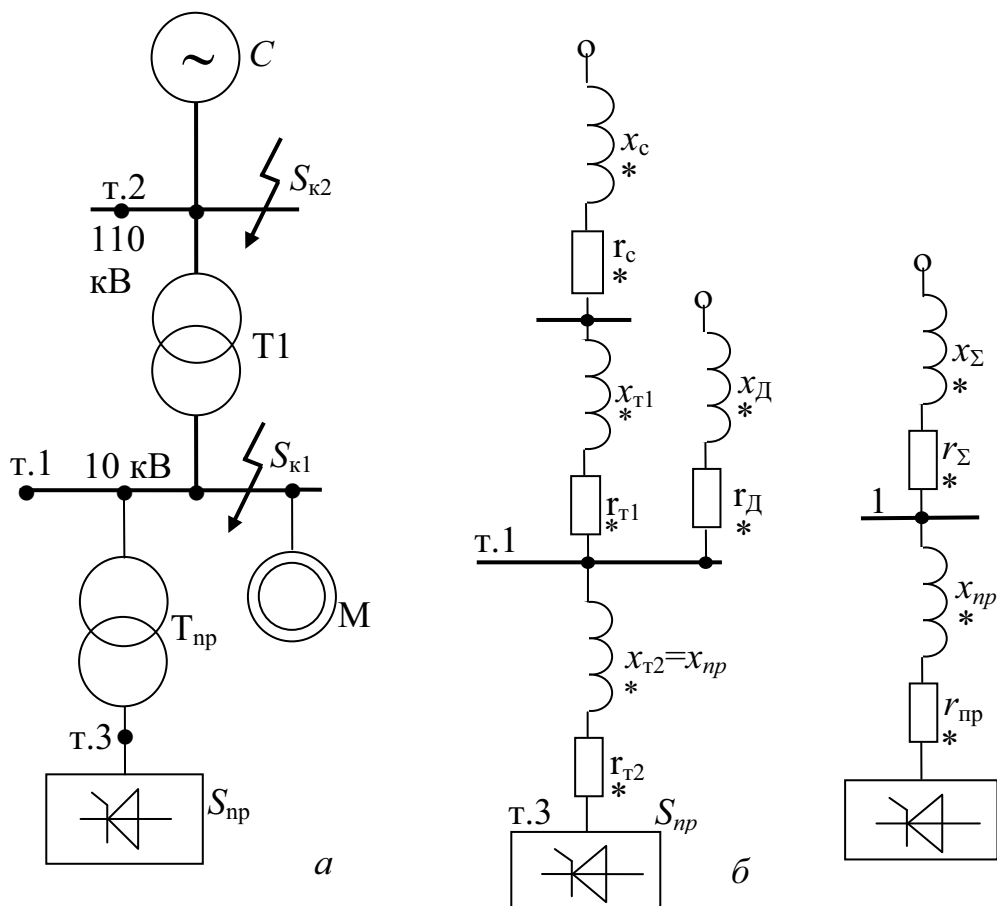


Рис. 6.1. Схема питания мощного вентильного преобразователя (а) и схема замещения питающей сети (б)

Разница между отклонениями и колебаниями напряжения в данном случае состоит только в скорости изменения напряжения. Формула (6.1) может быть преобразована к виду

$$\delta U = \delta U_t \approx \frac{Pr_\Sigma / x_\Sigma + Q}{S_k}, \quad (6.2)$$

где  $P$  и  $Q$  – активная и реактивная мощность преобразователя;  $S_k$  – мощность КЗ на шинах питания.

Любое изменение нагрузки также приводит к изменению напряжения, следовательно,

$$\delta U = \delta U_t \approx \frac{\Delta P r_{\Sigma} / x_{\Sigma} + \Delta Q}{S_k} = \frac{\Delta P(0,03 - 0,10) + \Delta Q}{S_k}. \quad (6.3)$$

Как следует из формулы (6.3), отклонения напряжения в основном определяются изменением реактивной мощности. Изменение активной мощности в промышленных сетях мало влияет на напряжение из-за соотношения активного и реактивного сопротивлений питающей системы  $r_{\Sigma}/x_{\Sigma}$ . Для ориентировочных расчетов можно принять:

$$\delta U = \delta U_t \approx \frac{\Delta Q}{S_k}. \quad (6.4)$$

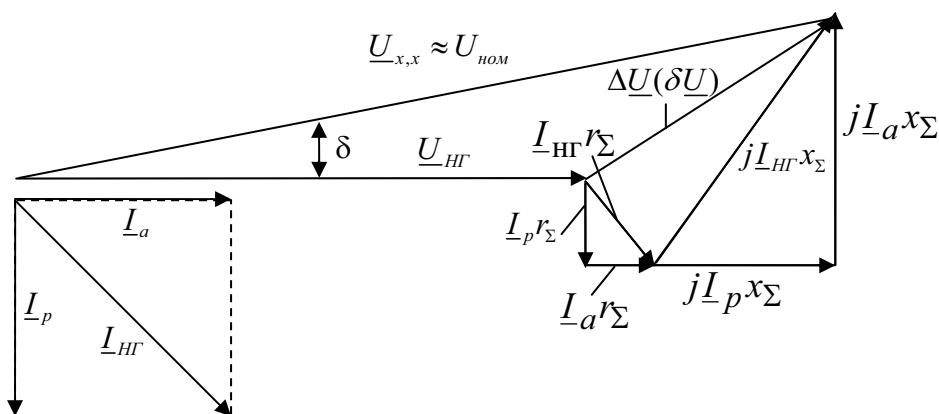


Рис.6.2. Векторная диаграмма напряжений

Определяющими нормами качества электроэнергии по колебаниям напряжения для электроприемников общего назначения являются нормы на выводах осветительных ламп, в основном ламп накаливания.

Колебания напряжения вызывают мерцание ламп освещения, нарушение нормальной работы телевидения, средств связи, а также силовых статических преобразователей. Воздействие мерцаний света на зрение зависит от величины колебаний напряжения и их частоты. Исследования показали, что глаз человека наиболее чувствителен к мерцаниям света ламп накаливания с частотой, находящейся в пределах 4...10 Гц. При этом глаз начинает ощущать эти мерцания начиная с 0,25 % номинального напряжения, неприятные ощущения возникают при напряжении, равном 0,4 %. Люминесцентные светильники менее чувствительны к колебаниям напряжения

при указанных выше частотах, но более чувствительны при частотах свыше 20 Гц.

Наиболее подробно об отрицательных воздействиях колебаний напряжения в системах электроснабжения описано в разделе 2.

В разных странах существуют различные способы оценки допустимых значений колебаний напряжения, обусловленных работой электроприемников, в зависимости от воздействия на человека мерцаний, вызванных этими колебаниями [9].

В России допустимые значения колебаний напряжения от частоты их повторения для различных электроприемников нормируются ГОСТ 13109-97 (рис. 2.2). Для определения допустимости колебаний напряжения в расчетной точке сети исходными данными являются графики работы резкопеременной нагрузки. Если колебания нагрузки различны по значениям, то необходимо определить эквивалентное колебание напряжения. Размах эквивалентного колебания напряжения определяется по формуле, %

$$\delta U_{t_{ЭК}} = 100 \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta Q_i^2 / n_K / S_K}, \quad (6.5)$$

где  $\delta Q$  – значение  $i$ -го размаха реактивной мощности, определенное по графику нагрузки;  $n_K$  – суммарное число размахов за время расчетного цикла.

Для проверки допустимости  $\delta U_{t_{ЭК}}$  вычисляется средняя частота колебаний

$$f_{ср} = n_K / T, \quad (6.6)$$

где  $T$  – время цикла работы нагрузки по графику изменения потребляемой реактивной мощности.

На основании анализа частоты изменения наиболее характерных резкопеременных нагрузок можно сделать вывод, что частота повторения колебаний напряжения при их работе находится в определенных пределах.

Для упрощения определения допустимых колебаний напряжения наиболее характерных электроприемников на рис. 6.3 показан диапазон изменения частоты возникновения размахов колебаний их наибольших реактивных нагрузок, а следовательно, и колебаний напряжения при их работе. Например, при работе станов холодного проката  $\delta U_{t_{доп}} = 4,2$  %, непрерывных станов горячего проката – 2 %, блюмингов, слябингов – 1,6 %, дуговых сталеплавильных печей – 1 % (рис. 6.3).



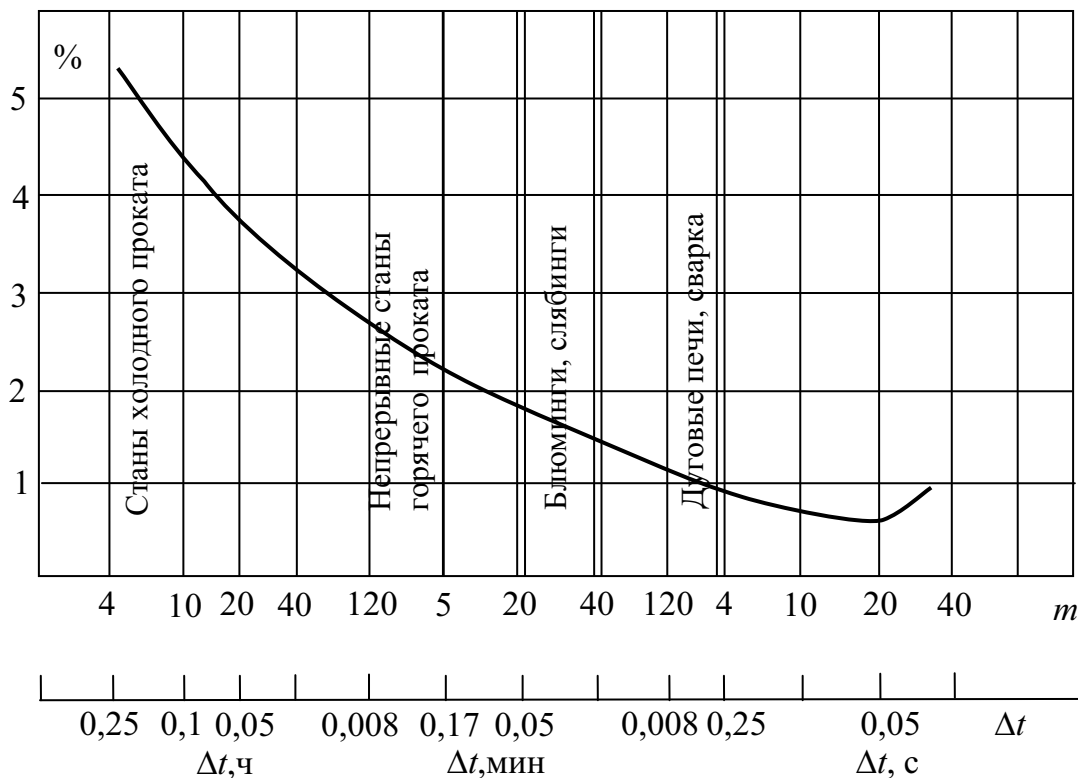


Рис. 6.3. Зависимость допустимых изменений напряжения от частоты их повторения для различных приемников электроэнергии

## 6.2. Колебания частоты при работе резкопеременных нагрузок

Отклонения частоты в нормальном режиме работы электрической сети допускаются в пределах не более  $\pm 0,2$  Гц. Допускается временная работа энергосистемы, а также работа отделившейся части системы, не имеющей автоматического регулирования частоты, с отклонениями частоты до  $\pm 0,4$  Гц. Регулирование частоты осуществляется мощными генераторами энергосистемы. Приемники электроэнергии на промышленных предприятиях ввиду их малой мощности по сравнению с суммарной мощностью всех генераторов системы практически не могут оказывать какого-либо существенного влияния на отклонения частоты в энергосистеме.

Колебания частоты – разность между наибольшим и наименьшим значениями основной частоты при скорости изменения частоты более 0,2 Гц в секунду. Колебания частоты в системе электроснабжения не должны превышать 0,2 Гц сверх отклонений частоты. Приведенные нормы не распространяются на период послеаварийного восстановления частоты в энергосистеме.

Мощные по отношению к мощности КЗ в точке их подключения электроприемники с резкопеременным характером нагрузки могут вызывать существенные колебания вектора напряжения в электрической сети, а следовательно, и колебания частоты питающего напряжения. Колебания вектора напряжения особенно существенно проявляются в точке подключения мощного электроприемника. Этот процесс иллюстрируется векторной диаграммой напряжения (см. рис. 6.2).

Как видно из диаграммы, при протекании тока нагрузки через сопротивление питающей сети вектор напряжения  $U_{\text{нп}}$  сдвигается по отношению к вектору напряжения при отсутствии этой нагрузки на угол  $\delta$ . Этот сдвиг осуществляется в основном за счет двух составляющих векторов  $jI_a x_{\Sigma}$ ;  $I_p r_{\Sigma}$ . В общем виде, исходя из векторной диаграммы, получаем

$$\sin \delta = \frac{I_a x_{\Sigma} - I_p r_{\Sigma}}{U_{\text{ном}}}, \quad (6.7)$$

где  $I_a$  – активная составляющая тока нагрузки;  $I_p$  – реактивная составляющая тока нагрузки;  $x_{\Sigma}$  – суммарное индуктивное сопротивление питающей системы;  $r_{\Sigma}$  – суммарное активное сопротивление системы;  $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение на данной ступени напряжения.

После преобразований получаем:

$$\sin \delta \approx \frac{\Delta P - \Delta Q r_{\Sigma} / x_{\Sigma}}{S_{\text{к}}}; \quad \delta = \arcsin \left( \frac{\Delta P - \Delta Q r_{\Sigma} / x_{\Sigma}}{S_{\text{к}}} \right), \quad (6.8)$$

где  $\Delta P$  – изменение активной нагрузки;  $\Delta Q$  – изменение потребляемой реактивной нагрузки;  $S_{\text{к}}$  – мощность КЗ в точке подключения нагрузки. Принимая  $r_{\Sigma} / x_{\Sigma} \approx 0,03 \dots 0,1$ , получаем для ориентировочных инженерных расчетов

$$\delta \approx \arcsin \frac{\Delta P}{S_{\text{к}}}. \quad (6.9)$$

Изменения активной мощности не оказывали бы существенного влияния на колебания частоты в питающей сети, если бы они не происходили достаточно быстро. На вентиляльных нагрузках прокатных станков изменение угла  $\delta$  происходит с большой скоростью. Например, активная мощность, потребляемая тиристорными преобразователями главных приводов, изменяется от 0 до максимального значения за время менее 0,1 с. Поэтому колебания частоты могут достигать значительной величины.

Для сравнения с нормативами ГОСТ 13109-97 в инженерных расчетах колебания вектора напряжения могут быть приведены к колебаниям

частоты. Мгновенное значение вектора фазного напряжения до приложения нагрузки выражается в виде

$$U_x = U_{\phi \max} \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (6.10)$$

где  $\omega_0$  – основная круговая частота;  $\varphi_0$  – начальная фаза вектора напряжения;  $U_{\phi \max}$  – амплитудное значение фазного напряжения;  $t$  – время.

Угол вращения вектора напряжения

$$\varphi = \omega_0 t + \varphi_0. \quad (6.11)$$

При набросе нагрузки в соответствии с векторной диаграммой (см. рис. 6.2) угол вектора напряжения может быть выражен так

$$\varphi_H = \omega_0 t + \varphi_0 - \delta(t);$$

круговая частота в процессе наброса нагрузки

$$\frac{d\varphi_H}{dt} = \omega_0 - \frac{d\delta(t)}{dt};$$

изменение круговой частоты в период изменения нагрузки

$$\Delta\omega = \omega_0 - \left( \omega_0 - \frac{d\delta(t)}{dt} \right) = \frac{d\delta(t)}{dt},$$

при линейном изменении нагрузки

$$\Delta\omega = \frac{\delta}{\Delta t} \quad \text{или} \quad \Delta f = \frac{\delta}{2\pi \cdot \Delta t}.$$

Подставляя угол  $\delta$ , получаем

$$\Delta f = \frac{\arcsin\left(\frac{\Delta P - \Delta Q r_{\Sigma} / x_{\Sigma}}{S_K}\right)}{2\pi \cdot \Delta t} \approx \frac{\arcsin(\Delta P / S_K)}{2\pi \cdot \Delta t}. \quad (6.12)$$

Для удобства расчетов, учитывая, что  $\Delta P / S_K$  в реальных системах внутривозовского электроснабжения не может быть более 0,2, с погрешностью менее 1,% получаем

$$\Delta f \approx \frac{\Delta P}{2\pi S_K \Delta t}. \quad (6.13)$$

Определение допустимых колебаний частоты, а следовательно, и допустимых набросов активной мощности приобретает актуальное значение в

связи с увеличением как абсолютного значения активной мощности резко-переменной нагрузки (например, нагрузки прокатных станков), так и скорости ее нарастания, особенно в маломощных питающих сетях.

Исходя из допустимого значения колебаний напряжения (0,2 Гц), получаем допустимое значение набросов активной мощности:

$$\Delta P < \Delta f \cdot 2\pi S_K \Delta t = 1,256 S_K \Delta t. \quad (6.14)$$

Допустимая скорость изменения активной мощности

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} < 1,256 S_K. \quad (6.15)$$

При проектировании систем электроснабжения с резко-переменными нагрузками необходимо производить проверочные расчеты колебаний частоты и в случае необходимости предусматривают мероприятия по увеличению мощности КЗ в точке питающей сети, общей для электроприемников с резкопеременной нагрузкой и прочих потребителей. Если этих мероприятий недостаточно, необходимо выделять резкопеременную нагрузку на отдельные трансформаторы или на отдельную обмотку трансформаторов с расщепленными вторичными обмотками.

### **6.3. Колебания напряжения при работе дуговых сталеплавильных печей**

Колебания напряжения при работе печей, обусловленные колебаниями тока нагрузки, подразделяются на нерегулярные с частотой 1 Гц и регулярные – 2...10 Гц. Причинами нерегулярных колебаний являются КЗ электродов с шихтой, отрывы дуг при обвалах шихты, а также неустойчивое их горение в период расплавления. Регулярные (циклические) колебания обусловлены действием электромагнитных сил, стремящихся вытолкнуть дуги из-под электродов в сторону стенок печи, вибраций электродов и изменением проводимости в зоне горения дуг из-за испарения различных материалов.

Значения колебаний напряжения также зависят от технологического режима работы печи. Наибольшие колебания происходят при проплавлении колодцев в скрапе. Затем они снижаются при образовании жидкой ванны и наименьшее значение имеют при непрерывном плавлении окатышей. Эта закономерность справедлива независимо от размеров печи. При работе с короткими дугами при низком  $\cos \varphi$  величина колебаний меньше, чем при работе с длинными дугами при более высоком  $\cos \varphi$  (при одной и той же потребляемой мощности).

Одним из основных параметров нагрузки дуговой печи, определяющих значения колебаний напряжения, является наброс реактивной мощности. Значение размахов напряжения в зависимости от частоты их следования в рассматриваемой точке сети при работе группы дуговых сталеплавильных печей в общем случае определяется по формуле

$$\delta U_t = \frac{K_n K_m S_{п.т}}{S_k}, \quad (6.16)$$

где  $K_n$  – коэффициент, учитывающий отношение величины наброса реактивной мощности к номинальной мощности печного трансформатора;  $K_m$  – коэффициент, учитывающий увеличение наброса реактивной мощности группы печей по отношению к набросу реактивной мощности одной печи;  $S_{п.т}$  – номинальная мощность печного трансформатора;  $S_k$  – мощность КЗ в той точке сети, для которой определяется значение колебаний напряжения.

В формуле (6.16) предполагается, что значение размаха реактивной мощности одиночной печи равно  $\Delta Q_{п} = K_n S_{п.т}$ . Коэффициент  $K_n$  рекомендуется брать меньше 1, например для печей ДСП-100 с печными трансформаторами 60 МВ·А,  $K_n = 0,65$ . Вероятность наброса реактивной мощности достигающей мощности  $S_{п.т}$  составляет не более 1 %. Необходимо также учитывать и некоторое увеличение колебаний напряжения при набросах активной мощности, сопутствующих набросам реактивной мощности.

Согласно рекомендациям [9] принято определять размах эквивалентного колебания по формулам:

для одной печи

$$\delta U_{t,эк} = S_{п.т} / S_k < 0,01; \quad (6.17)$$

для группы печей одинаковой мощности

$$\delta U_{t,эк} = \sqrt[4]{N} S_{п.т} / S_k < 0,01; \quad (6.18)$$

для группы печей разной мощности

$$\delta U_{t,эк} = \sqrt{\sum_{i=1}^n S_{п.т i} / S_{п.т \max} S_{п.т \max} / S_k} < 0,01. \quad (6.19)$$

Эквивалентные колебания напряжения для практических расчетов считаются допустимыми, если они не превышают 1 %, как это и указано на рис. 6.3.

Для определения необходимого быстродействия компенсирующего устройства при работе печей важное значение имеет скорость наброса реактивной мощности. Проведенные исследования на действующих печах показали, что в ряде случаев наброс реактивной мощности при работе печей от нуля до максимального значения происходит за время 0,03 с, что соответствует полутора периодам питающего напряжения. В общем случае скорость наброса реактивной мощности можно оценить величиной 500 Мвар в секунду. При работе группы печей скорость наброса реактивной мощности по сравнению с работой одной печи может возрастать.

#### **6.4. Выбор компенсирующих устройств для уменьшения колебаний напряжения**

Колебания напряжения, возникающие при резкопеременных нагрузках, практически пропорциональны колебаниям реактивной мощности. Поэтому для устранения колебаний напряжения необходимо применение компенсирующих устройств, параметры которых при резкопеременных графиках должны удовлетворять следующим требованиям: обладать быстродействием, соответствующим изменению реактивной мощности исходного графика нагрузки, иметь достаточную располагаемую реактивную мощность для компенсации переменной составляющей (компенсация колебания напряжения) и постоянной составляющей (улучшение коэффициента мощности) потребляемой реактивной мощности. При резкой несимметрии напряжения, например при работе дуговых печей, необходимо пофазное управление компенсирующими устройствами.

Для выбора компенсирующих устройств на стадии проектирования необходимы соответствующие расчеты исходных графиков активной и реактивной мощности. Выбор компенсирующих устройств [9] рассмотрим на примере упрощенного графика реактивной мощности, представленного на рис. 6.4. В исходном графике определяются размах колебаний реактивной мощности  $\Delta Q$ , скорость нарастания и спада реактивной мощности  $\Delta Q/\Delta t$ , среднее значение потребляемой реактивной мощности за цикл работы  $Q_{\text{ср}}$ , эффективное значение реактивной мощности  $Q_{\text{эф}}$ , действующее значение переменной составляющей реактивной мощности которые можно вычислять по методике, изложенной в [9].

На рис. 6.4, *а* представлен исходный график потребления реактивной мощности  $Q_{\text{нг}}$  и его упорядоченная диаграмма с указанием  $\Delta Q$ ,  $Q_{\text{ср}}$ ,  $Q_{\text{эф}}$  за цикл работы  $T_1$ . На рис. 6.4, *б* в соответствии с графиком потребления реактивной мощности показан график мощности компенси-

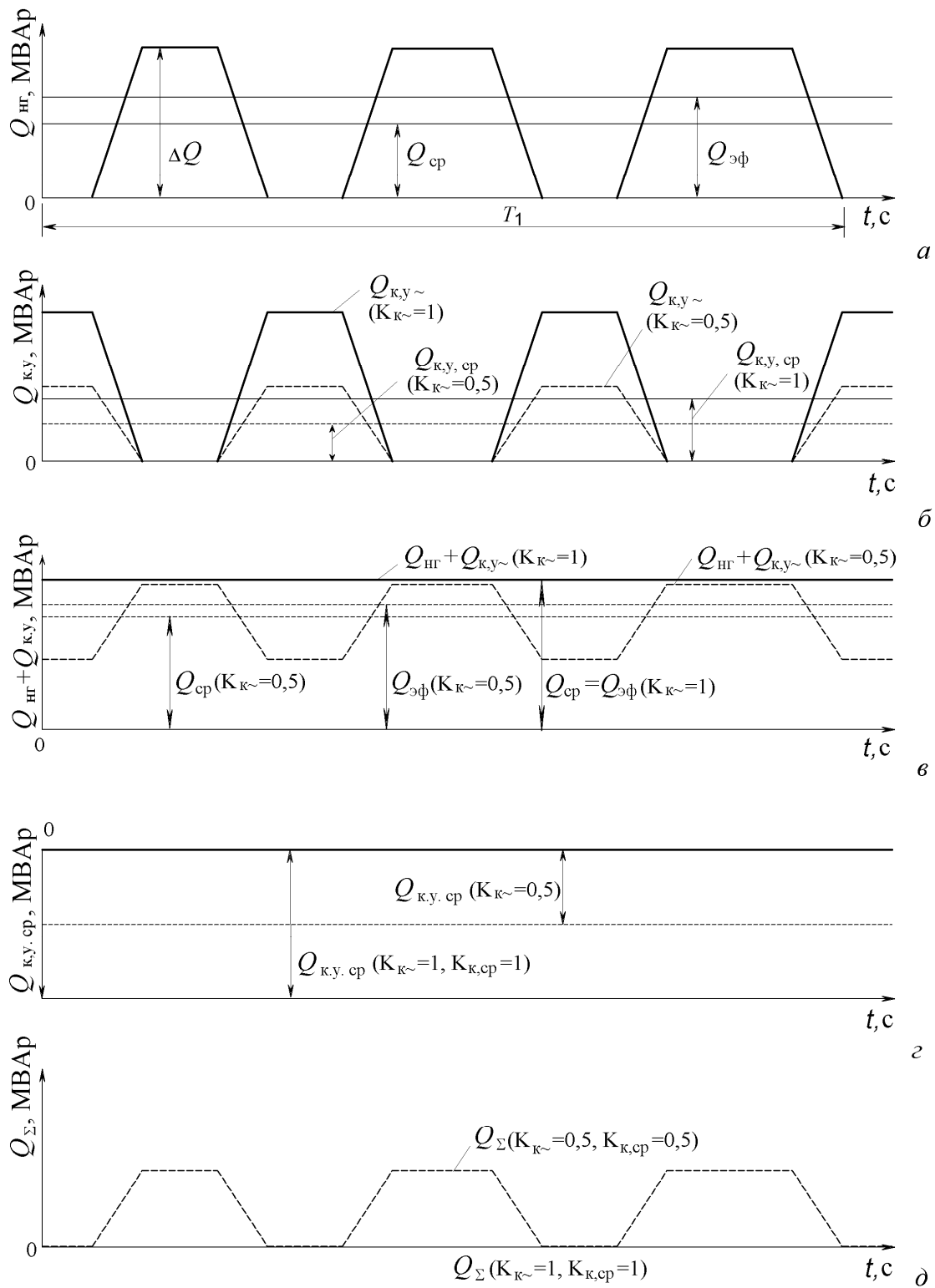


Рис. 6.4 Компенсация реактивной мощности при применении быстродействующего синхронного компенсатора

рующего устройства  $Q_{кв}$ , состоящий из переменной и постоянной составляющих для условий полной компенсации ( $K_{к\sim} = 1$ ) и частичной ( $K_{к\sim} = 0,5$ ). На рис. 6.4, в изображен результирующий график суммарной потребляемой реактивной мощности  $Q_{нг} + Q_{кв}$  также для полной ( $K_{к\sim} = 1$ ) и частичной ( $K_{к\sim} = 0,5$ ) компенсаций реактивной нагрузки. На рис. 6.4, г, д представлены график компенсации постоянной составляющей реактивной мощности и график реактивной мощности, выдаваемой компенсирующим устройством для условий компенсации  $K_{к\sim} = 1$  и  $K_{к\sim} = 0,5$  соответственно.

#### 6.4.1. Специальные быстродействующие синхронные компенсаторы

При компенсации колебаний напряжения с помощью синхронных компенсаторов требуемое быстродействие достигается в основном за счет оснащения их тиристорной системой возбуждения с высокими кратностями форсировки возбуждения (более 10) и быстродействующими регуляторами. Наиболее рациональный закон регулирования реактивной мощности синхронного компенсатора

$$Q_{кв}(t) = K_{комп\sim} Q_{\sim}(t) + K_{комп.ср} Q_{ср}(t), \quad (6.20)$$

где  $Q_{кв}$  – мощность компенсирующего устройства;  $K_{комп}$  – доля компенсации переменной составляющей потребляемой реактивной мощности;  $K_{комп\sim} \leq 1$ ;  $K_{комп.ср} \leq 1$  – доля компенсации постоянной составляющей (средней) потребляемой реактивной мощности. Значения этих коэффициентов определяются из выражений

$$K_{комп\sim} \geq \frac{\Delta Q - \Delta Q_{доп}}{\Delta Q} = 1 - \frac{\delta U_{tдоп} \% S_{к}}{100 \Delta Q}; \quad (6.21)$$

$$K_{комп.ср} \geq \frac{Q_{ср} - Q_{ср.доп}}{Q_{ср}} = 1 - \frac{\text{tg} \varphi_{доп}}{\text{tg} \varphi_{ср}}, \quad (6.22)$$

где  $\Delta Q = Q_{\max} - Q_{\min}$  – максимальный размах колебаний реактивной мощности по графику нагрузки;  $\Delta Q_{доп}$  – допустимый размах колебаний реактивной мощности, при котором нормы колебаний напряжения находятся в допустимых пределах;  $\delta U_{tдоп}$  – допустимые колебания напряжения;  $S_{к}$  – мощность КЗ на шинах питающей сети, где необходимо снижение колебаний напряжения до уровня нормативных;  $\text{tg} \varphi_{доп}$  – величина, соответствующая допустимому коэффициенту мощности.



Пример компенсации реактивной мощности с применением синхронного компенсатора представлен на рис. 6.4.

Требуемая мощность компенсирующего устройства, обеспечивающая нормативные колебания напряжения и нормативный коэффициент мощности, определяется из выражения

$$Q_{\text{ку}} = \sqrt{K_{\text{комп.}\sim}^2 Q_{\sim}^2 + K_{\text{комп.ср}}^2 Q_{\text{ср}}^2}. \quad (6.23)$$

Требуемое быстродействие изменения реактивной мощности синхронного компенсатора определяется из исходного графика нагрузки и должно быть

$$Q'_{\text{ку}} \geq K_{\text{комп.}\sim} Q'_{\text{нг}} = K_{\text{к}\sim} \frac{\Delta Q}{\Delta t}. \quad (6.24)$$

В отечественной практике для уменьшения колебаний напряжения применяются быстродействующие синхронные компенсаторы типа СК-10000-8 мощностью 7,7 Мвар на напряжение 10 кВ и мощностью 10 Мвар на напряжение 6 кВ. Максимальная скорость изменения реактивной мощности (быстродействие), выдаваемой в сеть, по данным завода составляет 130 МВАр/с, возможна кратковременная работа с 2-кратной перегрузкой. Компенсаторы успешно работают на некоторых металлургических заводах, в частности в системе электроснабжения станов горячего проката.

Установленная мощность синхронного компенсатора при одном и том же графике реактивной нагрузки будет меньше, чем установленная мощность статического компенсирующего устройства. Это объясняется тем, что синхронный компенсатор обладает большой перегрузочной способностью, и его установленная мощность определяется средним квадратичным значением компенсирующей мощности за цикл работы. Синхронные компенсаторы обладают всеми недостатками вращающихся машин и имеют меньшее быстродействие по сравнению со статическими компенсаторами. Кроме того, в статических компенсирующих устройствах возможно пофазное управление.

#### **6.4.2. Быстродействующие статические компенсирующие устройства**

Статические компенсирующие устройства обладают рядом преимуществ по сравнению с быстродействующими синхронными компенсаторами. Основным преимуществом является их большее быстродействие. Существенна и возможность осуществления пофазного управления, что необходимо в сетях с быстроизменяющейся несимметричной

нагрузкой, например в сетях с печами. В настоящее время существует много типов статических компенсирующих устройств на базе управляемых реакторов и конденсаторов в основном с применением управляемых вентилях. Наибольшее распространение в зарубежной и отечественной практике получили устройства прямой и косвенной компенсации. В табл. 6.1 представлено качественное сравнение быстродействующих синхронных компенсаторов со статическими компенсирующими устройствами прямой и косвенной компенсации.

Статические компенсирующие устройства прямой компенсации осуществляют ступенчатое регулирование реактивной мощности с помощью включения и отключения батарей конденсаторов или фильтров высших гармоник при изменении реактивной мощности электроприемников (рис. 6.5 и рис. 6.6).

**Т а б л и ц а 6.1**

***Сравнение параметров компенсирующих устройств***

Параметры сравнения	Специальный синхронный компенсатор	Статические компенсирующие устройства	
		прямой компенсации	косвенной компенсации
Возможная скорость регулирования, с	более 0,06	менее 0,02	менее 0,01
Регулирование	плавное	ступенчатое	плавное
Строительная часть	массивные фундаменты	фундаменты не требуются, большая гибкость монтажа	
Обслуживание	смазка, охлаждение и т. д.	обслуживания практически не требуется	
Отношение установленной реактивной мощности к максимальной реактивной мощности, отн. ед.	0,5...0,7, имеется возможность перегрузки до 2-кратной	1,0, перегрузка не допускается	2,0, регулируемая индуктивная часть 1,0, емкостная нерегулируемая часть 1,0
Работа на несимметричную нагрузку	пофазное управление практически невозможно	осуществляется пофазное управление практически без дополнительных затрат	
Потери от номинальной мощности, %	2,5...4,0	0,5...1,0	1,0...2,0
Искажение питающего напряжения	нет	нет	управляемый тиристорами реактор является источником высших гармоник

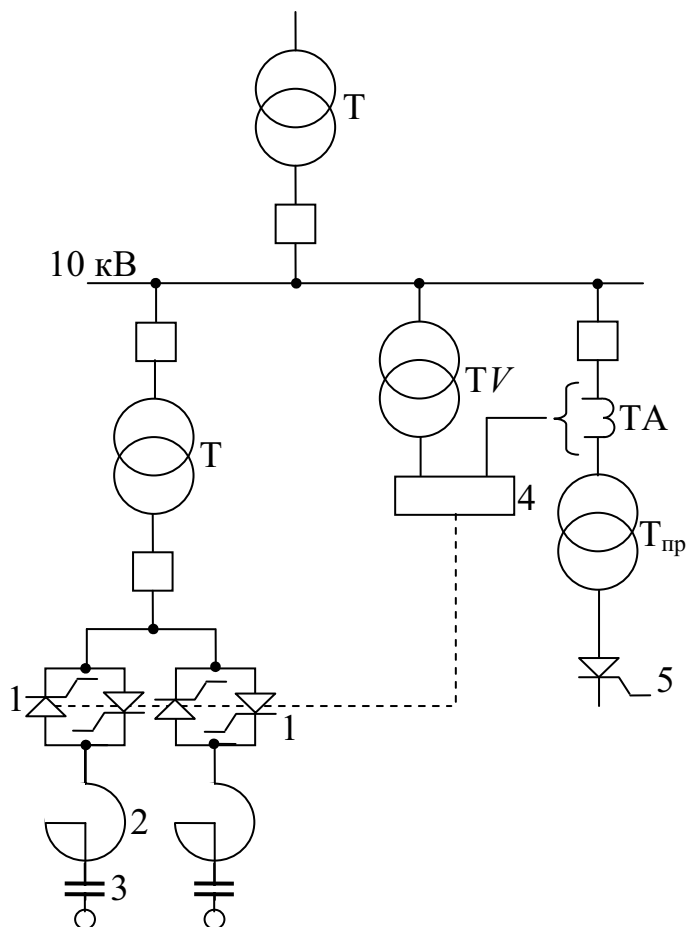
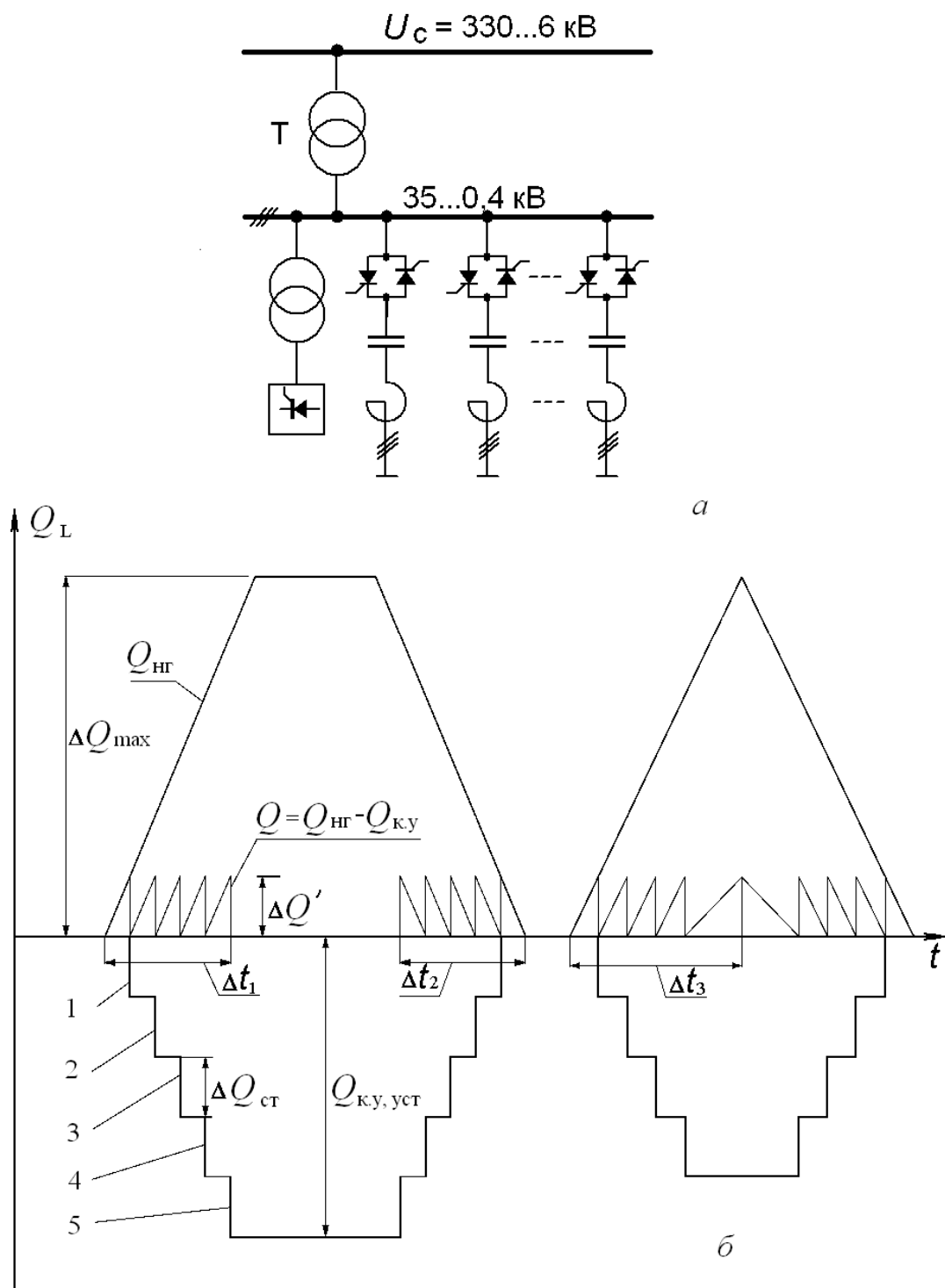


Рис. 6.5. Принципиальная схема компенсирующего устройства с дискретным регулированием мощности БК с помощью тиристорных выключателей (прямая компенсация):  
 1 – тиристорные ключи; 2 – реактор; 3 – конденсаторная батарея;  
 4 – устройство для управления тиристорными ключами;  
 5 – тиристорный преобразователь (нагрузка)

Для обеспечения быстродействия в качестве выключателей на каждой ступени применяются тиристорные ключи. Для исключения переходных процессов при включении, которые будут приводить только к увеличению колебаний напряжения, включение конденсаторов тиристорными ключами осуществляется в тот момент, когда напряжение сети и конденсаторов равны как по величине, так и по полярности. Выключение конденсаторов осуществляется путем снятия отпирающих импульсов с тиристоров в момент времени, когда ток в их цепи становится равным нулю.



*Рис. 6.6. Компенсация реактивной мощности устройством прямой компенсации  
а – схема устройства прямой компенсации; б – принцип работы статического компенсирующего устройства прямой компенсации; 1-5 – ступени компенсации*

Быстродействие устройства прямой компенсации в основном определяется запаздыванием включения или отключения секций батарей конденсаторов на период питающего напряжения (0,02 с) при условии непрерывного изменения реактивной мощности. Это запаздывание можно уменьшить за счет осуществления определенных схемных решений. Одним из преимуществ устройств прямой компенсации является то, что они не генерируют в сеть высшие гармоники.

Для приведения в норму колебаний напряжения при работе резкопеременных нагрузок реактивная мощность каждой ступени должна быть равна

$$\Delta Q_{\text{ст}} \leq \frac{\delta U_{t_{\text{доп}}} \%}{100} S_{\text{к}}, \quad (6.25)$$

где  $\delta U_{t_{\text{доп}}}$  – допустимые колебания напряжения;  $S_{\text{к}}$  – мощность КЗ в точке совместного питания резкопеременной нагрузки и других электроприемников, для которых определяется  $\delta U_{t_{\text{доп}}}$ .

Колебания напряжения при работе устройства прямой компенсации уменьшаются до значения (рис. 6.5)

$$\delta U_{t_{\text{к}}} = \frac{\Delta Q_{\text{ст}} \cdot 100}{S_{\text{к}}} \%, \quad (6.26)$$

а их частота после компенсации возрастает (рис. 6.6) до значения

$$f_{\text{к}} = f_{\text{эк}} \cdot 2n_{\text{ст}}, \quad (6.27)$$

где  $f_{\text{к}}$  – частота колебаний реактивной мощности (напряжения) после компенсации;  $f_{\text{эк}}$  – частота колебания эквивалентного размаха реактивной мощности нагрузки;  $n_{\text{ст}}$  – число ступеней реактивной мощности прямой компенсации.

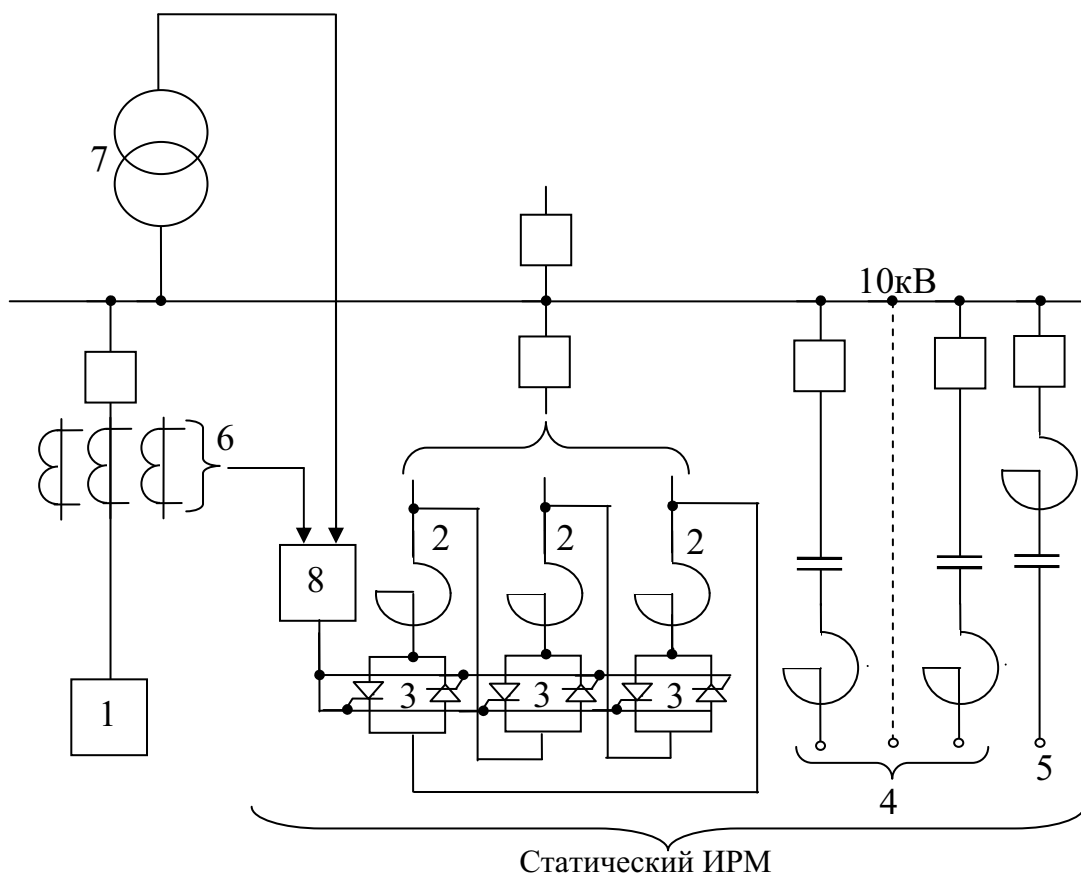
Допустимые колебания  $\delta U_{t_{\text{доп}}}$  для различных резкопеременных нагрузок при работе статистических компенсирующих устройств уменьшаются: для дуговых сталеплавильных печей они составляют ориентировочно 0,5 %, для блюмингов и слябингов – 1,3 %, для непрерывных; станов горячего проката – 1,5 %.

Общая установленная мощность компенсирующего устройства определяется из выражения

$$Q_{\text{к}\Sigma} = \Delta Q_{\text{max}} K_{\text{комп}\sim}. \quad (6.28)$$

Статические компенсирующие устройства косвенной компенсации (рис. 6.7) состоят из двух частей: плавно регулирующего индуктивного

элемента (реактора) для компенсации колебаний напряжения и нерегулируемой части – батареей конденсаторов или фильтров высших гармоник [9].



*Рис.6.7. Принципиальная схема статического компенсирующего устройства косвенной компенсации:*

*1 – нагрузка тиристорных электроприводов или дуговых сталеплавильных печей; 2 - управляемые реакторы; 3 – тиристорные ключи; 4 – фильтры высших гармоник токов; 5 – БК поперечной компенсации; 6 – трансформаторы тока; 7 – трансформатор напряжения; 8 – система фазоимпульсного управления тиристорами*

Принцип косвенной компенсации для уменьшения колебаний напряжения заключается в том, что управляемый реактор потребляет реактивную мощность тогда, когда ее не потребляет резкопеременная нагрузка, и наоборот (рис. 6.8).

Регуляторы реактивной мощности (тока) должны обеспечивать также регулирование, чтобы осуществлялось слежение за фронтом наброса и сброса реактивной мощности (иначе такое регулирование будет неэффективно) Следовательно, от устройства компенсации требуется большое быстродействие, соответствующее фронту наброса и сброса реактивной мощности наиболее характерных резкопеременных нагрузок.

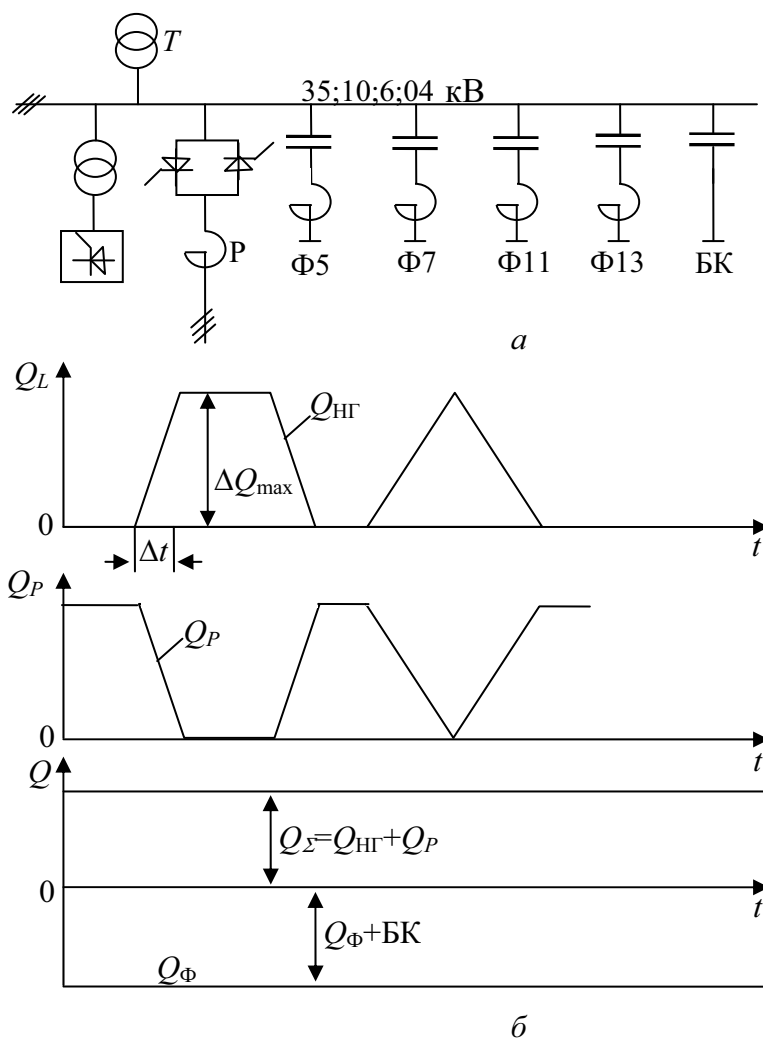


Рис. 6.8. Компенсация реакторной мощности устройством косвенной компенсации:  
*а* – схема статического компенсирующего устройства косвенной компенсации; *б* – принцип работы статического компенсирующего устройства косвенной компенсации

Регулирование тока в реакторе может осуществляться различными способами. Например, некоторые зарубежные фирмы применяют управляемый насыщающийся реактор. Однако быстродействие таких устройств можно оценить временем задержки более 0,06 с (три периода питающего напряжения), что недостаточно для таких приемников электроэнергии, как дуговые печи. Поэтому в настоящее время применяется регулирование тока в реакторе с помощью встречно-параллельно включенных тиристоров (рис. 6.7). Такая схема обеспечивает плавное регулирование реактивной мощности с временем задержки 0,01 с. Схемными решениями это быстродействие можно увеличить.

Установленная мощность реактивной части компенсирующего устройства определяется на основании графика нагрузки из выражения

$$Q_p > \Delta Q_{нг} K_{компл.} \quad (6.29)$$

Установленная мощность батарей конденсаторов или фильтров высших гармоник может быть ориентировочно определена по формуле

$$Q_{ку.ср} \geq (Q_{ср} + Q_{ср.р}) K_{к.ср} \approx [Q_{ср} + (Q_{max} - Q_{ср}) K_{компл.}] K_{к.ср}, \quad (6.30)$$

где  $Q_{ср.р}$  – средняя реактивная мощность, потребляемая регулируемым элементом (индуктивностью).

Параметры устройства косвенной компенсации для дуговых печей при отсутствии графиков потребляемой мощности рекомендуется определять по формулам:

для группы одинаковых печей

$$Q_p \geq S_{п.т} \sqrt[4]{N} - \delta U_{тдоп} S_k / 100; \quad (6.31)$$

$$Q_{бк} \geq (S_{п.т} \sqrt[4]{N} - \delta U_{тдоп} S_k / 200) K_{ср}; \quad (6.32)$$

для группы печей разной мощности

$$Q_p \geq S_{п.т \max} \sqrt[4]{\sum_{i=1}^n S_{п.тi} / S_{п.т \max}} - \delta U_{тдоп} S_k / 100; \quad (6.33)$$

$$Q_{бк} \geq S_{п.т \max} \sqrt[4]{\sum_{i=1}^4 S_{п.тi} / S_{п.т \max}} - (\delta U_{тдоп} S_k / 200) K_{ср}. \quad (6.34)$$

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Что понимается под отклонением и колебанием напряжения?
2. Какими параметрами в питающей сети электроснабжения определяются колебания напряжения?
3. Что является определяющим при установлении норм качества электроэнергии по колебаниям напряжения?
4. Назовите основные источники и их параметры, вызывающие колебания частоты при работе резкопеременных нагрузок.
5. Как определяется допустимый наброс активной мощности исходя из допустимого колебания напряжения?



6. Как определяется значение размахов напряжения при работе дуговых сталеплавильных печей?
7. Назовите основные положения, исходя из которых выбираются компенсирующие устройства для уменьшения колебаний напряжения.
8. Что Вы знаете о специальных быстродействующих синхронных компенсаторах?
9. Какие методы компенсации с использованием статических компенсирующих устройств Вы знаете?
10. Каковы преимущества и недостатки статических компенсирующих устройств и специальных синхронных компенсаторов по сравнимым параметрам?

## 7. УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Показатели качества электроэнергии являются критериями обеспечения электромагнитной совместимости работы различных технических средств. Поэтому нормы ПКЭ по ГОСТ 13109-97 подлежат включению в технические условия на присоединение потребителей электрической энергии и в договора на пользование электрической энергией, заключаемые потребителем с энергоснабжающей организацией. При этом для обеспечения норм стандарта допускается устанавливать в технических условиях на присоединение потребителей, являющихся виновниками ухудшения ПКЭ, и в договорах на пользование электрической энергией с такими потребителями более жесткие нормы (с меньшим диапазоном изменения соответствующих ПКЭ), чем установлены в настоящем стандарте. Очевидно, что показатели качества электроэнергии должны подлежать непрерывному контролю и управлению ими.

Под управлением КЭ [1] понимается выполнение необходимых организационно-технических мероприятий, направленных на обеспечение заданных требований к КЭ. К организационным мероприятиям относятся:

1. Применение рациональных схем электроснабжения:
  - 1.1. Выбор оптимальной конфигурации сети (радиальная, замкнутая).
  - 1.2. Уменьшение числа ступеней трансформации в сети.
  - 1.3. Секционирование сети.
  - 1.4. Снижение протяженности сетей напряжением 0,4 и 6-10 кВ.
  - 1.5. Устройство перемычек между цеховыми трансформаторами на напряжении 0,4 кВ.
  - 1.6. Подключение источников электромагнитных помех и резкопеременной нагрузки на отдельные трансформаторы или электрически удаленные секции шин, а также к расщепленным обмоткам трансформаторов.
  - 1.7. Применение специальных схем включения вентильных преобразователей.
  - 1.8. Равномерное распределение нагрузок по фазам.
  - 1.9. Применение специальных схем соединения обмоток трансформаторов.
  - 1.10. Применение схемных решений, приводящих к увеличению мощности КЗ, таких как объединение расщепленных обмоток низшего напряжения трансформаторов или попарного включения на параллельную работу расщепленных обмоток.
2. Применение автоматического регулирования трансформаторов, компенсирующих устройств, синхронных двигателей, вентильных преобразователей, тиристорных источников реактивной мощности.

3. Регулирование графика нагрузки и режимов электропотребления.

4. Эксплуатационные мероприятия по улучшению КЭ, отраженные в виде должностных инструкций, оперативных и ремонтных схем электроснабжения, утвержденных планах мероприятий по улучшению КЭ.

5. Система экономического и материального стимулирования предприятия и работников энергетических служб, обеспечивающая повышение КЭ.

К техническим мероприятиям относится применение специальных технических средств или мероприятий, требующих, значительных капитальных вложений.

К техническим средствам по управлению установившимися отклонениями напряжения относятся:

- применение трансформаторов с РПН как для централизованного, так и для местного регулирования напряжения;
- выполнение схемы глубокого ввода на предприятии;
- реконструкция ЛЭП путем замены или расщепления проводов или путем перехода с воздушной на кабельную ЛЭП;
- установка устройств продольной и поперечной емкостной компенсации, синхронных компенсаторов, источников реактивной мощности с вентильным управлением, шунтирующих реакторов;
- замена части асинхронных двигателей на предприятии синхронными двигателями;
- применение линейных регуляторов напряжения на ЛЭП или на вторичной обмотке силового трансформатора.

К техническим средствам по управлению размахом изменения напряжения относятся:

- установка трансформаторов большей мощности или с расщепленной обмоткой низшего напряжения для подключения резкопеременной нагрузки;
- усиление коммутационного оборудования на распределительных устройствах ввиду необходимости повышения значения мощности КЗ для снижения отрицательного влияния колебаний напряжения на потребителей;
- применение сдвоенных реакторов для разделения питания нагрузок с резкопеременным и спокойным характером;
- применение продольно-поперечных компенсирующих устройств, в том числе быстродействующих статических компенсирующих устройств на тиристорной основе;
- применение специальных стабилизирующих устройств, работающих на принципах ферромагнитного усилителя.

К техническим средствам по управлению несинусоидальностью напряжения относятся:

- применение фильтро-компенсирующих устройств;
- применение вентильных преобразователей с использованием многофазных схем выпрямления (6, 12, 24-фазные схемы и выше);
- использование специальных анодных трансформаторов при подключении к сети вентильных преобразователей;
- применение сглаживающих реакторов или фильтров для снижения пульсаций выпрямленного тока.

К техническим средствам по управлению несимметрией напряжений относятся:

- применение симметрирующих устройств, состоящих из емкостных и индуктивных элементов, которые имеют электрические или электромагнитные связи через трансформаторы или автотрансформаторы;
- применение в низковольтных сетях с нулевым проводом компенсационных симметрирующих устройств, осуществляющих компенсацию тока как нулевой, так и обратной, либо обеих последовательностей вместе.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. В чем заключаются основные задачи контроля качества электрической энергии?
2. Что понимается под электромагнитной совместимостью систем электроснабжения и электрооборудования?
3. Какие показатели качества электрической энергии Вы знаете?
4. Как можно произвести проверку показателей качества электрической энергии на соответствие их ГОСТ 13109-97?
5. В чем заключается принцип выбор пунктов контроля показателей качества электрической энергии?
6. Какие задачи ставятся перед энергоснабжающими организациями по обеспечению выполнений требований ГОСТ13109-97 и по проведению сертификации качества электрической энергии?
7. Какие приборы контроля качества электрической энергии Вы знаете? Какие требования предъявляются к данным приборам?
8. Какие методы контроля показателей качества электрической энергии Вы знаете?
9. Как влияют показатели качества электрической энергии на работу различных потребителей?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Литвак В.В., Маркман Г.З., Харлов Н.Н. Энергосбережение и качество электрической энергии в энергосистемах: Учебное пособие (издание 2-е). – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 162 с.
2. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 31 с.
3. Ольховский В.Я. Качество электроэнергии и надежность электроснабжения промышленных предприятий: Учебное пособие / Новосибир. электротехн. ин-т. – Новосибирск, 1985. – 63 с.
4. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 446 с.
5. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях. – М.: Энергия, 1977. – 127 с.
6. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Под ред. Л.Г. Мамиконянца. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
7. Лукутин Б.В. Энергоэффективность преобразования и транспортировки электроэнергии. – Томск: Изд. «Курсив», 2000. – 130 с.
8. Федоров А.А., Каменева В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 472 с.
9. Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.
10. Постников Н.П., Рубашов Г.М. Электроснабжение промышленных предприятий: Учеб. для техникумов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 352 с.
11. Стабилизаторы-ограничители ТОН-3. Информэлектро 05.05.07-83.М., 1983. – 4 с.
12. Климова Г.Н. Энергосбережение на промышленных предприятиях: учебное пособие/ Г.Н. Климова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2006. – 153 с.
13. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения пром предприятий. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
14. Основы электромагнитной совместимости: Учебник для вузов / Под ред. докт. техн. наук, проф. Р.Н. Карякина; Алт. гос. тех. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: ОАО «Алтайский полиграфический комбинат», 2007. – 480 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	3
<b>1. ОТКЛОНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ</b> .....	6
1.1. Понятие и сущность вопроса.....	6
1.2. Влияние отклонений напряжения на работу электропотребителей и технологический процесс производства.....	10
1.3. Методы и средства ограничений отклонений напряжения.....	24
<b>2. КОЛЕБАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ</b> .....	38
2.1. Определение показателей колебания напряжения.....	38
2.2. Влияние колебаний напряжения на работу электроприемников...	41
2.3. Средства и способы снижения колебаний напряжения.....	44
<b>3. НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ</b>	47
3.1. Нормирование показателей несинусоидальных режимов электроснабжения.....	47
3.2. Влияние высших гармоник на системы электроснабжения.....	49
3.3. Основные источники высших гармоник в системах электроснабжения предприятий.....	55
3.4. Расчет коэффициентов несинусоидальности напряжения в электрической сети.....	65
3.4.1. Метод расчета несинусоидальности напряжения по коммутационным искажениям при работе вентильных преобразователей.....	65
3.4.2. Инженерный (упрощенный) метод расчета составляющих гармонического спектра вентильных преобразователей.....	72
3.4.3. Определение коэффициента несинусоидальности при работе группы преобразователей.....	74
3.4.4. Расчет несинусоидальности напряжения при работе дуговых сталеплавильных печей.....	79
3.4.5. Расчет гармонического состава тока реактора с тиристорным регулированием.....	80
3.5. Батареи конденсаторов в электрических сетях с высшими гармониками.....	84
3.6. Снижение уровней гармоник.....	89
3.6.1. Методы снижения уровней гармоник.....	89
3.6.2. Силовые резонансные фильтры энергетического назначения.....	91
3.7. Параллельная работа силовых фильтров высших гармоник в системах электроснабжения.....	97
<b>4. НЕСИММЕТРИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ</b> .....	103
4.1. Влияние несимметричных нагрузок на работу электроприемников.....	103

4.2.	Виды несимметричных нагрузок.....	109
4.3.	Снижение несимметрии напряжений.....	113
<b>5.</b>	<b>ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.....</b>	<b>118</b>
5.1.	Отклонения и размах колебаний частоты напряжения питающей сети.....	118
5.2.	Провал напряжения.....	120
5.3.	Импульс напряжения .....	120
5.4.	Временное перенапряжение.....	123
<b>6.</b>	<b>КАЧЕСТВО НАПРЯЖЕНИЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С РЕЗКОПЕРЕМЕННЫМИ НАГРУЗКАМИ.....</b>	<b>125</b>
6.1.	Отклонения и колебания напряжения.....	125
6.2.	Колебания частоты при работе резкопеременных нагрузок.....	129
6.3.	Колебания напряжения при работе дуговых сталеплавильных печей.....	132
6.4.	Выбор компенсирующих устройств для уменьшения колебаний напряжения.....	134
6.4.1.	Специальные быстродействующие синхронные компенсаторы.....	136
6.4.2.	Быстродействующие статические компенсирующие устройства.....	137
<b>7.</b>	<b>УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ</b>	<b>146</b>
	<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....</b>	<b>150</b>

Учебное издание

ВОЛКОВ Николай Георгиевич

## КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Учебное пособие

**Издано в авторской редакции**

Научный редактор *доктор технических наук,  
профессор А.В. Кабышев*  
Компьютерная верстка *О.С. Рябинина*  
Дизайн обложки *А.С. Пыжик*


**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии  
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 26.04.2010. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл.печ.л. 8,84. Уч.-изд.л. 8,0.  
Заказ 699-10. Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru