

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Электроснабжение»

О. Г. Широков, Г. О. Широков

ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

ПРАКТИКУМ

для студентов специальности

**1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»
дневной формы обучения**

Гомель 2009

УДК 621.31:621.396(075.8)
ББК 31.29я73
Ш64

*Рекомендовано научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 13 от 17.06.2009 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. *М. Н. Новиков*

Широков, О. Г.
Ш64 Потребители электроэнергии и электромагнитная совместимость : практикум для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» днев. формы обучения / О. Г. Широков, Г. О. Широков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2009. – 23 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

Целью практикума является углубление знаний в области электромагнитной совместимости технических средств и овладение практическими навыками проведения расчетов показателей качества электроэнергии в электрических сетях.

Для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» дневной формы обучения.

УДК 621.31:621.396(075.8)
ББК 31.29я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2009

1. РАСЧЕТ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ

1.1. Задача № 1

Определить коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} на шинах 10 кВ подстанции, к которым подключена нагрузка в соответствии со схемой, представленной на рис. 1.1. Сравнить расчетное значение K_{2U} с установленными нормами и сделать выводы. Исходные данные к расчету для соответствующих вариантов приведены в табл. 1.1.

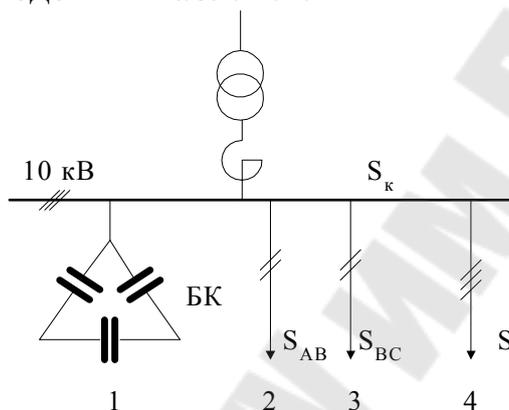


Рис. 1.1. Схема подстанции

Таблица 1.1

Исходные данные к расчету коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения K_U

Наименование	Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра		
		0, 3, 5	1, 4, 6	2, 7, 8, 9
S_k – мощность энергосистемы, МВА	0, 3, 5	100	120	140
	1, 4, 6	160	180	110
	2, 7, 8, 9	130	150	170
1- мощность (квар), БК	0, 3, 5	2000	2200	-
	1, 4, 6	2600	-	2800
	2, 7, 8, 9	-	2400	-
2 - мощность (кВА) и $\cos\varphi$ нагрузки S_{AB}	0, 3, 5	1500\0,8	2000\0,7	2000\0,7
	1, 4, 6	2500\0,8	1500\0,8	2500\0,8
	2, 7, 8, 9	2500\0,8	2000\0,7	1500\0,8
3 - мощность (кВА) и $\cos\varphi$ нагрузки S_{BC}	0, 3, 5	1500\0,7	2000\0,8	2000\0,6
	1, 4, 6	2500\0,6	1500\0,7	2500\0,8
	2, 7, 8, 9	2500\0,7	2000\0,8	1500\0,6
4 - мощность (кВА) и $\cos\varphi$ симметричной нагрузки	0, 3, 5	1000\0,84	1250\0,9	1300\0,81
	1, 4, 6	1200\0,81	1400\0,84	1550\0,9
	2, 7, 8, 9	1350\0,9	3000\0,81	2000\0,84

1.2. Методические указания к решению задачи № 1

1.2.1. Общие сведения

Несимметричный режим многофазной системы электроснабжения (несимметричный режим) – это режим работы многофазной системы электроснабжения, при котором фазные напряжения или токи не образуют симметричных многофазных систем. То есть, несимметрия трехфазной системы напряжения возникает, если фазные или междуфазные напряжения не равны по амплитуде или угол сдвига между ними не равен 120 электрическим градусам.

Несимметрия трехфазной системы напряжений может быть вызвана тремя причинами:

- несимметрией параметров воздушных линий вследствие отсутствия транспозиции проводов или применения удлиненных циклов транспозиции. Этот фактор проявляется преимущественно на линиях высокого напряжения;

- неравенством нагрузок фаз вследствие неравномерного распределения их между фазами (систематическая несимметрия) либо не одновременностью их работы (вероятностная несимметрия);

- неполнофазными режимами линий электропередач (после отключения одной из фаз вследствие повреждения).

Степень несимметрии напряжений, вызываемая несимметрией параметров линий электропередач, как правило, невелика (до 1%). Наиболее существенная несимметрия возникает при неполнофазных режимах работы линий электропередач, однако, такие режимы бывают весьма редко. Поэтому основной наиболее распространенной причиной несимметрии являются нагрузки сети. В сетях промышленных предприятий источниками несимметрии могут быть:

- мощные однофазные нагрузки - индукционные плавильные и нагревательные печи, сварочные агрегаты, печи электрошлакового переплава;

- трехфазные электроприемники длительно работающие в несимметричном режиме - электродуговые сталеплавильные печи.

Несимметрия трехфазной системы напряжений приводит к возникновению токов обратной последовательности, а в четырехпроводных сетях дополнительно и токов нулевой последовательности.

Токи обратной последовательности вызывают дополнительный нагрев вращающихся машин, появление нехарактерных гармоник при работе многофазных преобразователей. Нагрев оборудования осуще-

ствляется за счет расхода дополнительной энергии, что снижает к.п.д. электрооборудования.

При несимметрии напряжения в 2 % сроки службы асинхронных двигателей сокращаются на 10,8 %, синхронных двигателей - на 16,2 %, трансформаторов - на 4 %, конденсаторов - на 20 %.

Если технологические установки оснащены защитой от несимметрии напряжений, то при больших уровнях несимметрии они могут отключаться, что приводит к технологическому ущербу.

Тем не менее, основным эффектом несимметрии напряжений является нагрев оборудования, поэтому в течение некоторого времени допустимые значения могут повышаться, если в последующие моменты это компенсируется пониженным уровнем несимметрии. Данное положение относится к изменению несимметрии в течение времени, не превышающем время допустимого нагрева оборудования.

Несимметрия напряжений характеризуется следующими показателями КЭ [2]:

- коэффициентом несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} ;

- коэффициентом несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} .

В соответствии с табл. А1 [2] наиболее вероятным виновником ухудшения КЭ в отношении несимметрии трехфазной системы напряжений является потребитель с несимметричной нагрузкой.

На показатели несимметрии трехфазной системы напряжений установлены два вида норм КЭ [2]: нормально допустимые и предельно допустимые.

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

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

1.2.2. Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U}

Значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной

последовательности K_{2U} для междуфазных напряжений в соответствии с [2] допускается определять по следующему выражению.

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{\text{ном.мф}}} \cdot 100 \%, \quad (1.1)$$

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

$U_{\text{ном.мф}}$ - номинальное значение междуфазного напряжения, В, кВ.

Основным моментом расчета является определение напряжения обратной последовательности U_2 согласно выражению

$$U_2 = I_{2\Sigma} \cdot Z_{2\Sigma}, \quad (1.2)$$

где $I_{2\Sigma}$ - эквивалентный ток обратной последовательности, обусловленный несимметричными нагрузками;

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

Схема замещения сети для определения напряжения обратной последовательности приведена на рис. 1.2. На схеме обозначено: I_2 - ток обратной последовательности несимметричной нагрузки; $b_{2к}$ и $b_{2б}$ - проводимости короткого замыкания сети мощностью S_k и трехфазной батареи конденсаторов Q_b (если она имеется); $b_{2н}$ и $g_{2н}$ - проводимости остальной нагрузки подстанции.

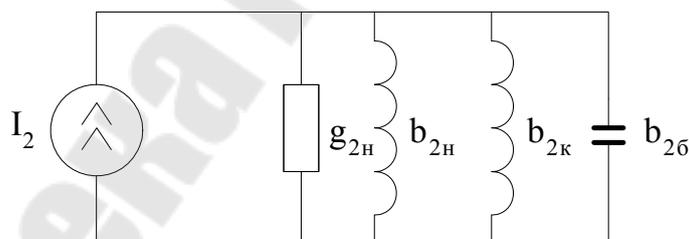


Рис. 1.2. Схема замещения сети для определения напряжения обратной последовательности

Ток обратной последовательности I_2 и его фазовый угол при подключении однофазных нагрузок на линейные напряжения ab и bc :

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{6} \sqrt{3I_{ab}^2 + (I_{ab} - 2I_{bc})^2}; \quad (1.3)$$

$$\varphi_{I_2} = \frac{\sqrt{3}I_{ab}}{I_{ab} - 2I_{bc}} - \varphi_n,$$

где φ_n - фазовый угол нагрузки.

При задании полных мощностей нагрузок

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{6U_{ном}} \sqrt{3S_{ab}^2 + (S_{ab} - 2S_{bc})^2}; \quad (1.4)$$
$$\varphi_{I_2} = \frac{\sqrt{3}S_{ab}}{S_{ab} - 2S_{bc}} - \varphi_n.$$

Если однофазные нагрузки включены на линейные напряжения U_{bc} и U_{ca} то к значениям φ_{I_2} прибавляются соответственно $(2/3)\pi$ и $(4/3)\pi$.

Относительное значение (в долях полного сопротивления прямой последовательности) модуля $Z_{2\Sigma^*}$ эквивалентного сопротивления обратной последовательности секции (системы) шин согласно [3] имеет вид:

$$Z_{2\Sigma^*} = \frac{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n S_{ном.i} \cos \varphi_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n S_{ном.i} \sin \varphi_i\right)^2}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n S_{ном.i} Y_i \cos \varphi_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n S_{ном.i} Y_i \sin \varphi_i\right)^2}}, \quad (1.5)$$

где $S_{ном.i}$, Y_i , φ_i - полная номинальная мощность, относительное значение проводимости и фазовый угол i -го присоединения линейной (нелинейной) части нагрузки.

Выражения для определения сопротивлений обратной последовательности элементов систем электроснабжения приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Определение сопротивлений обратной последовательности для различных нагрузок

Вид нагрузки	Выражение для расчета сопротивлений обратной последовательности	Примечания
Синхронный электродвигатель	$X_2 = U_{ном}^2 \cdot X_{2*} / S_{ном}$	При отсутствии данных принимается $X_{2*} = 1/k_{II}$, где – k_{II} кратность пускового тока
Асинхронный двигатель	$X_2 = U_{ном}^2 \cdot X_{K*} / S_{ном}$	
Двухобмоточный трансформатор и реактор	$X_2 = U_{ном}^2 \cdot U_{K*} / S_{ном}$	U_{K*} - относительное значение напряжения КЗ, при отсутствии каталожных данных принимается $U_{K*}=0,1$, для реакторов вместо U_{K*} берется X_{P*}
Трехобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой, сдвоенный реактор (для каждой обмотки)	$X_2 = U_{ном}^2 \cdot X_* / S_{ном}$	X_* - относительное реактивное сопротивление обмотки
Батарея конденсаторов	$X_2 = U_{ном}^2 / Q_{б.к.}$	
Вентильный преобразователь	$Z_2 = 2,5U_{ном}^2 / S$	S- полная нагрузка преобразователя сопротивлением $Z = Z \cos \varphi + jZ \sin \varphi$, где $\cos \varphi$ - коэф. мощности преобразователя с нагрузкой
Электродуговая сталеплавильная печь	$Z_2 = U_{ном}^2 / S$	То же
Нагрузка осветительная	$r_2 = 4U_{ном}^2 / P$	P – мощность нагрузки
Питающая энергосистема	$X_2 = U_{ном}^2 / S_K$	S_K - мощность КЗ энергосистемы

Относительное значение (в долях полного сопротивления прямой последовательности) модуля эквивалентного сопротивления обратной последовательности секции (системы) шин и питающей энергосистемы:

$$Z_{2экв*} = \frac{Z_{2\Sigma*} \cdot Z_{K*}}{Z_{2\Sigma*} + Z_{K*}}, \quad (1.6)$$

где Z_{K*} , $Z_{2\Sigma*}$ – соответственно относительное значение сопротивлений короткого замыкания энергосистемы и обратной последовательности секции (системы) шин нагрузки.

В приближенных расчетах несимметричных режимов для узлов сетей 110 кВ нагрузку можно рассматривать как обобщенную и учитывать значением полного сопротивления обратной последовательности, отн.ед., (табл. 1.3).

В распределительных сетях предприятий при мощности КЗ на шинах 6-10 кВ $S_K \geq 200$ МВ А можно принимать $Z_{2\Sigma} = X_K$, где $X_K = U_{\text{ном}}^2 / S_K$.

Таблица 1.3

Сопротивления обратной последовательности для узлов сетей 110 кВ

Производство	$Z_{2\Sigma^*}$	$ Z_{2\Sigma^*} $
Промышленный центр	0,50+j0,68	0,83
Прокатный цех	0,52+j0,68	0,85
Машиностроительный завод	0,33+j0,49	0,59
Завод цветных металлов	0,49+j0,52	0,72
Бумагоделательный завод	0,15+j0,59	0,38
Тяговая подстанция	1,12+j0,36	1,24
Химический завод	0,21+j0,46	0,51

2. Расчет параметров несинусоидальности напряжения

2.1. Задача № 2

Определить коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_U на шинах 10 кВ подстанции, к которым подключен 6 (12)-фазный вентильный преобразователь, работающий с согласующим трансформатором (схема замещения представлена на рис.2.1.). Сравнить расчетное значение K_U с установленными нормами и сделать выводы. Исходные данные к расчету для соответствующих вариантов приведены в табл. 2.1. Эквивалентное сопротивление сети для соответствующих гармоник:

$$X_{\Sigma(n)} = X_{\Sigma} \cdot n = \frac{X_c \cdot X_n}{X_c + X_n} \cdot n,$$

где X_c , X_n , n – соответственно сопротивление энергосистемы, нагрузки и порядок учитываемой гармоники.

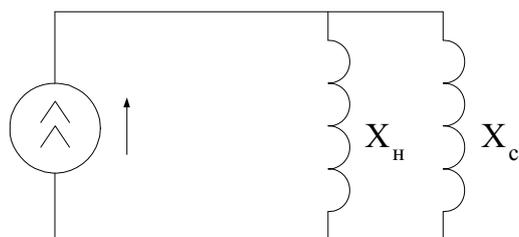


Рис.2.1. Схема замещения к задаче 2

Таблица 2.1

Исходные данные к расчету коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения K_U

Наименование	Ед. изм	Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра		
			0, 3, 5	1, 4, 6	2, 7, 8, 9
n - номер учитываемых гармоник	-	0, 3, 5	5, 7, 11, 13	11, 13, 19, 23	5, 7, 11, 13
		1, 4, 6	11, 13, 19, 23	5, 7, 11, 13	11, 13, 19, 23
		2, 7, 8, 9	5, 7, 11, 13	11, 13, 19, 23	5, 7, 11, 13
I_1 - принимается равным действующему значению сетевого тока преобразователя	А	0, 3, 5	500	550	600
		1, 4, 6	650	700	750
		2, 7, 8, 9	800	850	900
X_c	Ом	0, 3, 5	0,25	0,26	0,27
		1, 4, 6	0,28	0,29	0,30
		2, 7, 8, 9	0,31	0,32	0,33
X_n	Ом	0, 3, 5	0,5	0,6	0,7
		1, 4, 6	0,4	0,55	0,8
		2, 7, 8, 9	0,65	0,75	0,3

2.2. Методические указания к решению задачи № 2

2.2.1. Общие сведения

Форма кривой напряжения определяется содержанием гармоник и фазовыми углами (угол сдвига) гармоник по отношению к основной частоте. На рис.2.2 приведена обобщенная форма несинусоидальности напряжения в соответствии с [2].

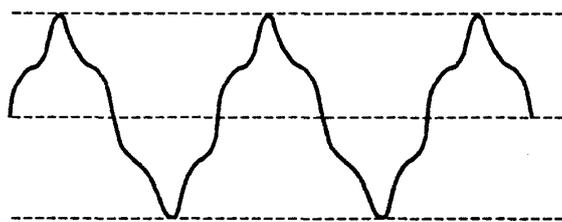


Рис.2.2. Несинусоидальность напряжения по ГОСТ 13109-97

Гармонические искажения напряжений и токов возникают из-за наличия в электрических сетях элементов или оборудования с нелинейной вольтамперной характеристикой. Основные источники гармонических помех - преобразовательные и выпрямительные установки, индукционные и дуговые печи (ДСП), сварочные машины, флуоресцентные лампы. Определенный уровень гармонических помех может создавать и оборудование энергосистем: вращающиеся машины, трансформаторы.

Высшие гармоники напряжения и тока оказывают влияние на элементы систем электроснабжения и линии связи.

Основными формами воздействия высших гармоник на системы электроснабжения являются:

- увеличение токов и напряжений высших гармоник вследствие параллельного и последовательного резонансов;
- снижение эффективности процессов генерации, передачи, использования электроэнергии;
- старение изоляции электрооборудования и сокращение вследствие этого срока его службы.

Резонансы в системах электроснабжения обычно рассматриваются применительно к конденсаторам. При превышении гармониками тока уровней, предельно допустимых для конденсаторов, последние не ухудшают свою работу, однако через некоторое время выходят из строя.

Влияние гармоник на вращающиеся машины выражается в форме потерь электроэнергии и создания дополнительных моментов вращения. Потери увеличиваются в проводниках статора и ротора из-за вихревых токов и поверхностного эффекта. Токи утечки, вызываемые гармониками в торцевых зонах статора и ротора, также приводят к дополнительным потерям. Потери приводят к повышению общей температуры машины и к местным перегревам, наиболее вероятным в роторе. Токи гармоник в статоре машины вызывают движущую силу, приводящую к появлению на валу вращающихся моментов в направле-

нии вращения магнитного поля гармоник.

В линиях электропередач гармоник тока приводят к дополнительным потерям электроэнергии и напряжения. В кабельных линиях гармоник напряжения увеличивают воздействие на диэлектрик пропорционально увеличению максимального значения амплитуды, что увеличивает в свою очередь число повреждений кабелей и стоимость ремонта.

В трансформаторах гармоник напряжения вызывают увеличение потерь на гистерезис и вихревые токи, сокращается срок службы изоляции. Отрицательный аспект воздействия гармоник на мощные трансформаторы состоит в циркуляции утроенного тока нулевой последовательности в обмотках соединенных в треугольник. Это может привести к их перегрузке.

В системах дистанционного управления токами наложенной частоты гармоник могут приводить либо к блокировке полезного сигнала либо к ложному срабатыванию реле. В зависимости от принципа действия устройств релейной защиты гармоник напряжения и тока могут ухудшать их характеристики либо нарушать их работу.

При содержании в балластных устройствах газоразрядных ламп конденсаторов гармоник могут вызвать резонанс, приводящий к выходу ламп из строя.

Вырезы на синусоиде напряжения, возникающие в процессе коммутации вентилей преобразовательного оборудования, могут влиять на синхронизацию другого подобного оборудования, управление которого осуществляется в момент перехода напряжения через нуль.

При измерениях мощности и энергии обычные индукционные счетчики завышают показания на несколько процентов (до 6%) при наличии у потребителя источника гармоник.

Несинусоидальность напряжения характеризуется следующими показателями:

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

Нормально допустимые и предельно допустимые значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения K_U [2] в точках общего присоединения к электрическим сетям с разным номинальным напряжением приведены в табл. 2.2.

Нормально допустимые значения коэффициента n -ой гармони-

ческой составляющей напряжения $K_{U(n)}$ [2] в точках общего присоединения к электрическим сетям с разным номинальным напряжением $U_{\text{ном}}$ приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.2

Значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения K_U , в %.

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

Предельно допустимое значение коэффициента n -ой гармонической составляющей напряжения вычисляют по формуле: $K_{U(n)\text{пред}} = 1,5K_{U(n)\text{норм}}$, где $K_{U(n)\text{норм}}$ – нормально допустимое значение коэффициента n -ой гармонической составляющей напряжения, определяемое по табл. 2.3.

2.2.2. Расчет коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения K_U

Значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения K_U в соответствии с [2] допускается определять по следующему выражению

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100, \quad (2.1)$$

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

Таблица 2.3

Значения коэффициента n -ой гармонической составляющей напряжения
 $K_{U(n)}$ в %

Нечетные гармоники, не-кратные 3, при $U_{\text{ном}}$, кВ					Нечетные гармоники, кратные 3**, при $U_{\text{ном}}$, кВ					Четные гармоники при $U_{\text{ном}}$, 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	>21	0,2	0,2	0,2	0,2	10	0,5	0,3	0,3	0,2
19	1,5	1,0	1,0	0,4						12	0,2	0,2	0,2	0,2
23	1,5	1,0	1,0	0,4						>12	0,2	0,2	0,2	0,2
25	1,5	1,0	1,0	0,4										
> 25	0,2 + +1,3 × × 25/n	0,2 + +0,8 × × 25/n	0,2 + +0,6 × × 25/n	0,2 + +0,2 × × 25/n										

* n — номер гармонической составляющей напряжения;

** нормально допустимые значения, приведенные для n , равных 3 и 9, относятся к однофазным электрическим сетям. В трехфазных трехпроводных электрических сетях эти значения принимают вдвое меньшими приведенных в таблице

Значение коэффициента n -ой гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$ в соответствии с [2] допускается определять по следующему выражению

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100. \quad (2.2)$$

Напряжение n -ой гармоники на i -м присоединении

$$U_{(n)i} = X_{(n)i} \cdot I_{(n)i\Sigma}, \quad (2.3)$$

где $I_{(n)i\Sigma}$ — ток n -ой гармоники на i -м присоединении, обусловленный всеми источниками гармоник;

$X_{(n)i}$ — сопротивление i -го присоединения для n -ой гармоники.

Число учитываемых гармоник n зависит от вида нелинейной нагрузки. В случае наличия в системе электроснабжения 6-фазных вентиляльных преобразователей в кривой питающего напряжения имеются гармоники порядка $n = 5, 7, 11, 13, 19, 23, \dots$; в случае 12-фазных —

$n = 11, 13, 19, 23, 25, 35, 37 \dots$; в случае 24-фазных – $n = 35, 47, 71, \dots$; называемые каноническими. Токи гармоник приближенно (без учета углов коммутации вентилей) можно определить по табл. 2.4.

Таблица 2.4

Определение порядка и токов гармоник различных нагрузок

Вид нелинейной нагрузки	Порядок гармоник сетевого тока	Расчетная формула определения тока гармоники	Примечание
Вентильный преобразователь	$n = mk \pm 1$	$I_{(n)*} = I_1/n$ (в долях полного тока преобразователя)	m – число фаз выпрямления; $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ – ряд натуральных чисел
Установка дуговой электросварки с выпрямителями	$n = 5, 7, 11, 13, \dots$	$I_{(n)} = I_1/n^2$	
Установки дуговой и контактной электросварки	$n = 5, 7, 11, 13, \dots$	$I_{(n)\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n I_{(n)i}^2}$	
Газоразрядные лампы	$n = 3, 5$	$I_{(3)} = 0,10 \cdot I_{(1)}$, $I_{(5)} = 0,03 \cdot I_{(1)}$	$I_{(1)}$ – ток первой гармоники
Группа преобразователей при их неизменной нагрузке	$n = mk \pm 1$	$I_{(n)\Sigma} = \frac{S_{\Sigma} \cdot k_{n\Sigma}}{\sqrt{3}U \cdot n}$	S_{Σ} – расчетная полная мощность преобразователей, МВА; $k_{n\Sigma}$ – коэффициент, учитывающий наличие сдвига фаз между гармониками отдельных преобразователей (для $n = 5$ и $n = 7$ $k_{n\Sigma} = 0,9$; для $n = 11$ и $n = 13$ $k_{n\Sigma} = 0,9$); U – напряжение в узле подключения источника, кВ.
Группа 6– и 12–фазных преобразователей	$n = 5, 7, 11, \dots$	$I_{(n)\Sigma} = \frac{\sqrt{S_{6\phi}^2 + S_{12\phi}^2}}{\sqrt{3}U \cdot n}$	$S_{6\phi}$ и $S_{12\phi}$ – расчетные (средне-квадратические) значения полных мощностей соответствующих преобразователей

Вид нелинейной нагрузки	Порядок гармоник сетевого тока	Расчетная формула определения тока гармоники	Примечание
Группа реверсивных и нереверсивных преобразователей	$n = mk \pm 1$	$I_{(n)\Sigma} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n S_{i\text{ср.кв}}^2}}{\sqrt{3}U \cdot n}$	$S_{i\text{ср.кв}}$ – средне-квадратическое значение полной мощности i -го преобразователя
Дуговые электропечи ЭДСП 25 - 100 т.	$n = 3, 5, 7, 11$	По рис. 2.3.	при выборе способа защиты конденсаторных батарей – для периода расплавления

Напряжения гармоник рассчитываются на основе линейных схем замещения сети, справедливых для каждой гармоники в отдельности. Сопротивления элементов линейных схем замещения сети для каждой гармоники определяются по выражениям, приведенным в табл. 2.5.

Методы расчета несинусоидальных режимов, основанные на представлении преобразователей в виде источников тока гармоник, обеспечивают достаточную точность расчетов лишь в отсутствие резонансных или близких к ним режимов, а также в случае линейной частотной характеристики входного сопротивления энергосистемы. Значительную погрешность (до 30 %) в расчеты несинусоидальных режимов вносит допущение отсутствия влияния емкостей на процессы коммутации.

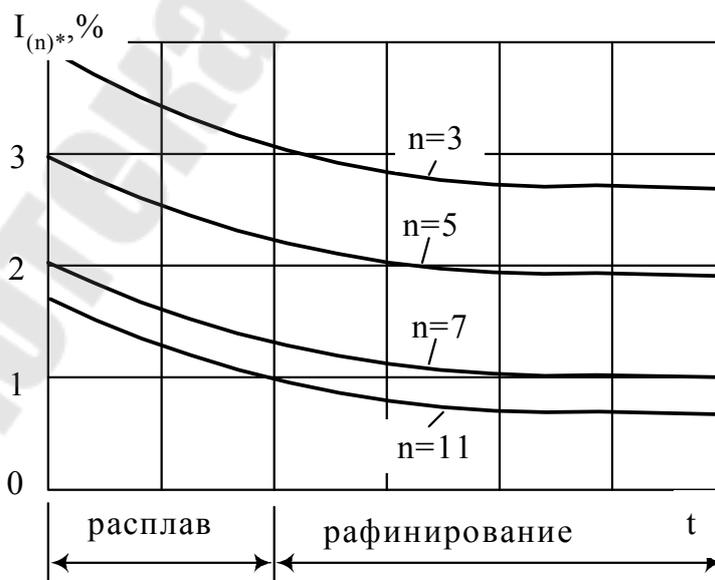


Рис. 2.3. Усредненные относительные значения гармоник тока, генерируемых ЭДСП в период расплава

Таблица 2.5

Определение сопротивления элементов сети для отдельных гармоник

Потребитель	Расчетная формула сопротивления n -ой гармоники, Ом	
	Сеть 6 кВ	Сеть 10 кВ
Электродвигатель, турбогенератор с номинальной мощностью $S_{\text{НОМ}}$, МВА	$\frac{6 \cdot n}{S_{\text{НОМ}}}$	$\frac{17 \cdot n}{S_{\text{НОМ}}}$
Нагруженный трансформатор цеховой подстанции с номинальной мощностью $S_{\text{НОМ}}$, МВ·А	$\frac{12 \cdot n}{S_{\text{НОМ}}}$	$\frac{34 \cdot n}{S_{\text{НОМ}}}$
Двухобмоточный трансформатор связи с энергосистемой с номинальной мощностью $S_{\text{НОМ}}$, МВ·А	$\frac{0,4 \cdot n \cdot U_K \%}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}}$	$\frac{11 \cdot n \cdot U_K \%}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}}$
Батарея конденсаторов с номинальной мощностью $Q_{\text{БК}}$, квар, при напряжении 6,3 – 10,5 кВ	$\frac{40 \cdot n}{Q_{\text{БК}}}$	$\frac{110 \cdot n}{Q_{\text{БК}}}$

3. Расчет снижения потерь электроэнергии от внедрения мероприятий по повышению качества электроэнергии

3.1. Задача № 3

Рассчитать снижение потерь мощности в:

- цеховых трансформаторах 6-10 кВ,
- асинхронных двигателях,
- синхронных двигателях без демпферной обмотки,
- батареях конденсаторов,

происходящее при проведении мероприятий, в результате которых происходит снижение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности и снижение напряжения соответствующих высших гармоник. Исходные данные к расчету для соответствующих вариантов приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Исходные данные к расчету снижения потерь электроэнергии от внедрения мероприятий по повышению качества электроэнергии

Наименование	Ед. изм	Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра		
			0, 3, 5	1, 4, 6	2, 7, 8, 9
Мощность цеховых трансформаторов	кВ·А	0, 3, 5	1000	1600	2500
		1, 4, 6	2500	1000	1600
		2, 7, 8, 9	1600	2500	1000
Мощность асинхронных двигателей,	кВт	0, 3, 5	500\4,5	800\20	1000\101
		1, 4, 6	1000\101	500\4,5	800\20

суммарная \ единичная		2, 7, 8, 9	800\20	1000\101	500\4,5
Мощность синхронных двигателей без демпферной обмотки	кВт	0, 3, 5	600	700	800
		1, 4, 6	800	600	700
		2, 7, 8, 9	700	800	600
Мощность батарей конденсаторов	квар	0, 3, 5	300	400	600
		1, 4, 6	600	300	400
		2, 7, 8, 9	400	600	300
$K_{2U(н)}$	%	0, 3, 5	3	4	5
		1, 4, 6	5,5	6	6,5
		2, 7, 8, 9	7	7,5	8
$K_{2U(к)}$	%	0, 3, 5	1	1,2	1,3
		1, 4, 6	1,4	1,5	1,6
		2, 7, 8, 9	1,7	1,8	1,9
$U_{(н)н}$ (№ гармоники)\значение	%	0, 3, 5	(5)\7	(7)\6	(11)\5
		1, 4, 6	(13)\4,5	(17)\4	(19)\3,5
		2, 7, 8, 9	(23)\3	(25)\2,5	(5)\8
$U_{(н)к}$ (№ гармоники)\значение	%	0, 3, 5	(5)\4	(7)\4	(11)\3
		1, 4, 6	(13)\3	(17)\2	(19)\1,5
		2, 7, 8, 9	(23)\1	(25)\1	(5)\5

3.2. Методические указания к решению задачи № 3

Мероприятия по повышению качества электроэнергии приводят к снижению ее потерь. Для практических расчетов снижения потерь электроэнергии от внедрения мероприятий по повышению качества электроэнергии в соответствии с [5] могут использоваться следующие формулы.

Снижение потерь мощности, кВт, в линии за счет симметрирования токовых нагрузок фаз:

$$\delta P_{\text{лэ}} = \frac{R}{10^3} \sum_{i=1}^3 (I_{iн}^2 - I_{iк}^2), \quad (3.1)$$

где $I_{iн}$ и $I_{iк}$ – токовые нагрузки фаз до и после симметрирования.

При известных значениях токов обратной последовательности $I_{2н}$ и $I_{2к}$ до и после симметрирования снижение потерь определяют:

$$\delta P_{\text{лэ}} = \frac{3R}{10^3} (I_{2н}^2 - I_{2к}^2). \quad (3.2)$$

Снижение потерь мощности, кВт, в трехфазном оборудовании (трансформаторах, вращающихся машинах, БК):

$$\delta P_{\text{э}} = \frac{S}{10^4} \cdot k_{\text{э}} \cdot (K_{2U(н)}^2 - K_{2U(к)}^2), \quad (3.3)$$

где S – номинальная мощность оборудования, кВ·А, кВт, квар; k_ϵ – коэффициент по табл. 3.2; $K_{2U(n)}$ и $K_{2U(k)}$ – коэффициенты несимметрии напряжений по обратной последовательности до и после симметрирования.

Снижение потерь мощности за счет снижения токов и напряжений высших гармоник определяют:

для линии электропередач:

$$\delta P_{л.Г} = \frac{R}{10^3} \sum_{n=2}^{\infty} \alpha_{(n)} (I_{(n)н}^2 - I_{(n)к}^2); \quad (3.4)$$

для электрооборудования:

$$\delta P_{Г} = \frac{S}{10^4} k_{Г} \sum_{n=2}^{\infty} b_{(n)} (U_{(n)н}^2 - U_{(n)к}^2), \quad (3.5)$$

где $k_{Г}$ – коэффициент по табл. 3.2; коэффициенты $\alpha_{(n)}$ и $b_{(n)}$ по табл. 3.3;

$I_{(n)н}$ и $I_{(n)к}$, $U_{(n)н}$ и $U_{(n)к}$ – соответственно токи и напряжения гармоник до и после проведения мероприятий по снижению несинусоидальности в % от основной гармоники.

Значения коэффициентов k_ϵ и $k_{Г}$ для асинхронных двигателей определяют по формулам: $k_\epsilon = 2,4k_{Д}$; $k_{Г} = 2k_{Д}$,

где $k_{Д}$ в зависимости от номинальной мощности двигателя определяют по формулам:

если $P_{Д} \leq 5$ кВт,	$k_{Д} = 3 + 0,3(5 - P_{Д})$;
если $5 \leq P_{Д} \leq 100$ кВт,	$k_{Д} = 1 + 0,02(100 - P_{Д})$;
если $100 \leq P_{Д} \leq 1000$ кВт,	$k_{Д} = 0,4 + 0,0007 \cdot (1000 - P_{Д})$;
если $P_{Д} > 1000$ кВт,	$k_{Д} = 0,4$;

Таблица 3.2

Значения коэффициентов k_ϵ и $k_{Г}$ для различных видов оборудования*

Вид оборудования	k_ϵ	$k_{Г}$
Турбогенераторы	1,86	1,77
Гидрогенераторы и синхронные двигатели с демпферной обмоткой	0,68	1,12
Гидрогенераторы и синхронные двигатели без демпферной обмоткой	0,27	0,40
Синхронные компенсаторы	1,31	1,95
Трансформаторы 35-220 кВ	0,5	0,3

Вид оборудования	k_ϵ	k_Γ
Трансформаторы 6-10 кВ	2,67	1,62
Батареи конденсаторов	0,003	0,003

Таблица 3.3

Значения коэффициентов $\alpha_{(n)}$ и $b_{(n)}$ для различных видов оборудования

Номер гармоники	$\alpha_{(n)}$	$b_{(n)}$		
		трансформаторы	вращающиеся машины	батареи конденсаторов
2	2	0,44	0,350	2
3	2,8	0,23	0,125	3
5	3,2	0,19	0,089	5
7	3,7	0,19	0,054	7
11	4,7	0,19	0,027	11
13	5,1	0,20	0,021	13
17	5,8	0,22	0,014	17
19	6,2	0,23	0,012	19
23	6,8	0,25	0,009	23
25	7,1	0,26	0,008	25

4. Контрольные вопросы

Выбор номера контрольного вопроса для соответствующих вариантов осуществляется согласно табл. 4.1.

Таблица 4.1

Номера контрольных вопросов

Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра				
	0, 3	1, 5	4, 6	2, 7	8, 9
0, 3, 5	1	2	3	4	5
1, 4, 6	6	7	8	9	10
2, 7, 8, 9	11	12	13	14	15

1. Что определяется термином "несимметричный режим"?
2. Какими причинами вызывается несимметрия трехфазной системы напряжений и кто является наиболее вероятным виновником ухудшения этого свойства электрической энергии?
3. Какое влияние оказывает несимметрия напряжений на работу электрооборудования и потребители электрической энергии?
4. Какими показателями КЭ описывается несимметрия трехфазной системы напряжений?
5. Какие установлены нормы на показатели несимметрии трех-

фазной системы напряжений и, какая должна быть вероятность нахождения этих показателей в интервалах установленных норм?

6. Чему равен расчетный минимальный интервал времени измерений соответствия показателей несимметрии трехфазной системы напряжений установленным нормам, и какова общая продолжительность измерения этих показателей?

7. Какая периодичность измерения показателей несимметрии трехфазной системы напряжений и кто осуществляет контроль над соблюдением требований к качеству электроэнергии?

8. Чему равно значение допустимой погрешности измерений показателей несимметрии трехфазной системы напряжений?

9. Какими причинами вызывается несинусоидальность напряжения и кто является наиболее вероятным виновником ухудшения этого свойства электрической энергии?

10. Какое влияние оказывает несинусоидальность напряжения на работу электрооборудования и потребители электрической энергии?

11. Какими показателями КЭ описывается несинусоидальность напряжения?

12. Какие установлены нормы на показатели несинусоидальности напряжения и, какая должна быть вероятность нахождения этих показателей в интервалах установленных норм?

13. Чему равен расчетный минимальный интервал времени измерений соответствия показателей несинусоидальности напряжения установленным нормам и какова общая продолжительность измерения этих показателей?

14. Какая периодичность измерения показателей несинусоидальности напряжения и кто осуществляет контроль над соблюдением требований к качеству электроэнергии?

15. Чему равно значение допустимой погрешности измерений показателей несинусоидальности напряжения?

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 23875-88. Качество электрической энергии. Термины и определения. - Введ. 01.07.89. М.: Изд-во стандартов, 1988.- 15 с.
2. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 1.08.99. Мн.: Межгос. Совет по стандар., метрологии и сертификации. 1999.- 31 с.
3. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. М. Энергаторгоиздат, 1986г.
4. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий. - М.: Энергаторгоиздат, 1995. – 416 с.: ил.
5. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. –М.: Энергоатомиздат, 1985. -224 с., ил.
6. Курбацкий В.Г. Качество электроэнергии и электромагнитная совместимость технических средств в электрических сетях. Братск. – 1999 г., -219 с.
7. Практическое руководство к лабораторным занятиям по курсу "Электромагнитная совместимость электроприемников и питающих сетей" для студентов специальности Т.01.01. ротاپринт ГГТУ им. П.О. Сухого, Гомель, 1999.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Расчет несимметрии напряжений	3
2. Расчет параметров несинусоидальности напряжения	9
3. Расчет снижения потерь электроэнергии от внедрения мероприятий по повышению качества электроэнергии	17
4. Контрольные вопросы	20
Литература	22

Широков Олег Геннадьевич
Широков Глеб Олегович

ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Практикум
для студентов специальности
1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»
дневной формы обучения

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 04.11.09.

Рег. № 92Е.

E-mail: ic@gstu.gomel.by
<http://www.gstu.gomel.by>