

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт энергетики и природопользования

Безик В.А., Никитин А.М.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Методические указания по выполнению лабораторно-практических работ
для студентов направлений подготовки

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника,

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника,

15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств,

35.03.06 Агроинженерия

Брянская область 2018

УДК 621.318.3 (076)
ББК 31.264
Б 39

Безик, В. А. Электромагнитная совместимость: методические указания по выполнению лабораторно-практических работ для студентов направлений подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника, 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств, 35.03.06 Агроинженерия / В. А. Безик, А. М. Никитин. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2018. – 31 с.

В настоящих методических указаниях даны основные теоретические положения и опирающиеся на них практические методы расчетов показателей качества электроэнергии, а также рассмотрено влияние качества электроэнергии на работу электроприемников, рассмотрены примеры выполнения расчетов, приведены контрольные задания по вариантам.

Рецензент:

к.э.н., доцент, заведующий кафедрой информатики, информационных систем и технологий Ульянова Н.Д. (ФГБОУ ВО Брянский ГАУ).

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

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

Содержание

Введение	4
1. Расчет коэффициента несинусоидальности в сетях с вентильными преобразователями	5
2. Расчет коэффициента несинусоидальности в сетях со сварочными установками	10
3. Расчет коэффициентов несинусоидальности и несимметрии в сетях с разрядными лампами	13
4. Расчет коэффициента несимметрии в электрических сетях с однофазной нагрузкой	17
5. Влияние качества электроэнергии на работу электроприемников	20
Рекомендуемая литература	30

Введение

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

Поэтому данное учебное пособие рассматривает основные вопросы возникающие при анализе электромагнитной совместимости, практические методы расчетов показателей качества электроэнергии, а также показано влияние качества электроэнергии на работу электроприемников

Методические указания предназначены для проведения практических занятий студентами направления подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника, могут быть использованы при изучении соответствующего раздела студентами направлений подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств, 35.03.06 Агроинженерия, а также выполнения контрольных работ студентами заочной формы обучения.

Указания содержат необходимый теоретический материал, достаточный для выполнения практических заданий по расчетам показателей качества электроэнергии и оценки влияния качества электроэнергии на работу электроприемников. Приведены примеры решения задач и варианты для выполнения самостоятельных работ.

При выполнении работ, студент изучает теоретический материал по теме, разбирает пример решения задачи, проводит необходимые расчеты и защищает работу.

1. Расчет коэффициента несинусоидальности в сетях с вентильными преобразователями

В настоящее время самой распространенной схемой выпрямления для мощных преобразователей является трехфазная мостовая схема (схема Ларионова), представленная на рисунке 1., а. Эта схема выпрямления позволяет осуществить так называемую шестифазную или шестиимпульсную схему выпрямления. Соединение последовательно или параллельно двух или нескольких выпрямительных мостов при питании их напряжением, сдвинутым на соответствующий угол, позволяет получить 12, 18, 24, 36, 48...-фазные схемы выпрямления (кратные шести). Сдвиг угла питающего напряжения осуществляется применением специальных схем соединения первичных или вторичных обмоток трансформатора: Y — звезда, Δ — треугольник, Z — зигзаг с получением необходимого фазового сдвига, которые позволяют осуществить практически схемы любой фазности (импульсности) выпрямления.

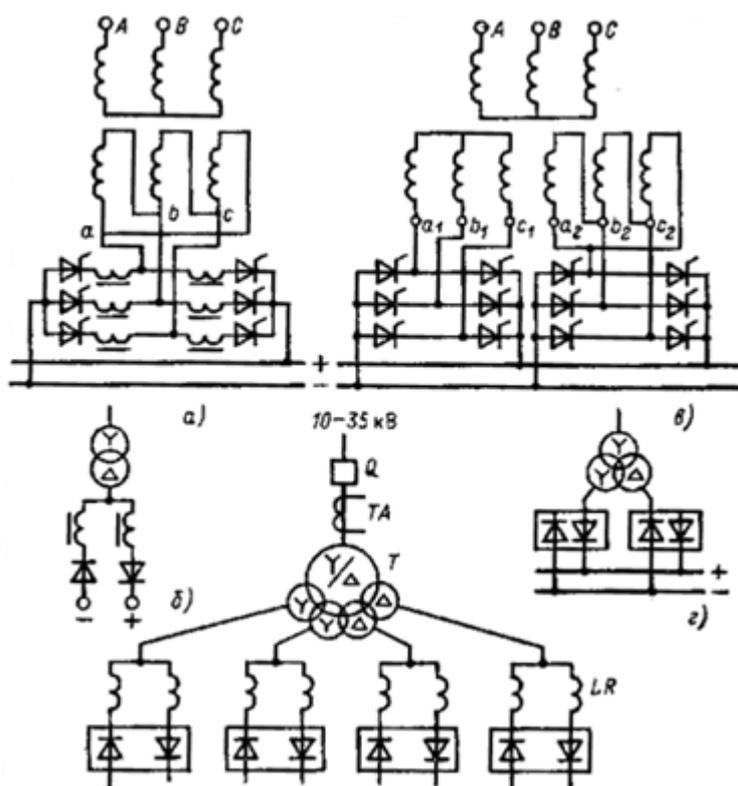


Рисунок 1. Схемы полупроводниковых выпрямительных агрегатов:

а — агрегат до 6300 А шестифазного режима выпрямления (трехлинейная схема); б — однолинейная схема; в — трехлинейная схема агрегата 12500 А двенадцати-фазного режима выпрямления; г — однолинейная схема; д — однолинейная схема агрегата 25 000 А и его коммутационная аппаратура

Первичным является появление в питающей сети коммутационных искажений напряжения, а гармонический анализ их позволяет выявить наличие высших гармоник напряжения. Порядок высших гармоник определяется фор-

мулой $n = tk \pm 1$, где t — число фаз выпрямления; $k=0, 1, 2, 3...$ — последовательный ряд натуральных чисел.

Для шестифазной системы напряжения в кривой питающего напряжения имеются высшие гармоники следующего порядка, называемые каноническими: $n=5, 7, 11, 13, 17, 19, 23...$; для 12-фазной схемы $n=11, 13, 23, 25, 35, 37...$; для 24-фазной схемы $n=23, 25, 47, 49, 71, 73$ и т. д.

Методика расчета коэффициента несинусоидальности напряжения 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 вентильных преобразователей нет необходимости определять уровни отдельных гармоник. При этом удается избежать ошибки, возникающей при учете только определенного числа высших гармоник.

Методика позволяет вычислять k_U в любой точке питающей сети, используя параметры, полученные при вычислении токов КЗ, и основывается на следующих допущении, что проводимости элементов питающей сети являются не емкостными. При этом допущении ошибка в расчете не превышает 10—15%. Предполагается, что в узлах сети, расположенных в непосредственной близости от вентильных преобразователей, отсутствуют батареи конденсаторов, предназначенные для компенсации реактивной мощности; не учитываются аномальные гармоники.

Коэффициент несинусоидальности напряжения питающей сети определяется по формуле

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum_2^{40} U_n^2}}{U_{ном}} \quad (1.1)$$

Общий коэффициент несинусоидальности питающей сети при работе вентильных преобразователей может быть определен по формуле

$$k_U = 100x_c \sqrt{\frac{0,955 \sin \varphi}{x_c + x_{кр}}} \quad (1.2)$$

где $x_c = S_{пр}/S_{кз}$ - эквивалентное сопротивление системы в относительных единицах, приведенное к мощности преобразователя $S_{пр}$, т. е. сопротивление от условной точки сети бесконечной мощности до точки сети, в которой определяется k_U ; $S_{кз}$ — мощность короткого замыкания (КЗ) в точке, в которой определяется k_U ; $x_{пр}$ — индуктивное сопротивление цепи преобразователя в относительных единицах, приведенное к $S_{пр}$, т. е. сопротивление от точки возникновения коммутационных КЗ до точки, в которой определяется k_U .

Формула справедлива для преобразователей с любой последовательностью чередования фаз.

Кроме коэффициента несинусоидальности ГОСТ нормирует коэффициенты n -ой гармонической составляющей как

$$k_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{ном}} 100, \% \quad (1.3)$$

При определении k_U особое внимание следует обращать на $x_{пр}$. Чаще всего требуется определять k_U на шинах питания мощных тиристорных преобразователей. Под преобразователем подразумеваются выпрямительный мост (или их группа) и питающий понижающий трансформатор.

В этом случае $x_{пр}$ равно сопротивлению преобразовательного трансформатора и определяется по формуле

$$x_{пр} = \frac{u_{к\%}}{100} \left(1 + \frac{k_p}{4}\right) \frac{S_{пр}}{S_{ном,Т}} \quad (1.4)$$

где $S_{ном, Т}$ - номинальная мощность преобразовательного трансформатора; k_p - коэффициент расщепления обмоток этого трансформатора; $u_{к\%}$ - напряжение КЗ трансформатора, приведенное к полной номинальной мощности трансформатора.

Для двухобмоточных трансформаторов, применяемых в шестифазных (трехфазных мостовых) схемах выпрямления, $k_p = 0$, трехобмоточных трансформаторов, применяемых в преобразователях, выполненных по двенадцатифазной схеме, в общем виде

$$k_p = \frac{u_{к(НН1-НН2)}}{u_k} \quad (1.5)$$

где $u_{к(НН1-НН2)}$ — напряжение КЗ между расщепленными вторичными обмотками трансформатора.

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

Действующее значение высшей гармоники напряжения в любой точке питающей сети при работе преобразователя с любой последовательностью чередования фаз выпрямления может быть определено по формуле

$$U_n = \frac{m}{\pi \cdot n} U_{ном} \frac{X_c}{X_c + X_{пр}} \sin \varphi \cdot \sin(n \cdot \gamma) \quad (1.6)$$

где $\gamma = \frac{3(X_c + X_{пр})}{m \cdot \sin \varphi}$ - угол коммутации, рад.

Действующее значение тока любой гармоники в цепи преобразователя определяется из выражения [2]

$$I_n = \frac{m}{\sqrt{3\pi}} \frac{S_{пр}}{U_{ном} (x_c + x_{пр}) n^2} \sin \varphi \cdot \sin(n \cdot \gamma) \quad (1.7)$$

При работе группы вентильных преобразователей порядок расчета k_U следующий:

По приведенным формулам определяются уровни высших гармоник напряжения для каждого преобразователя.

Одинаковые гармоники напряжения всех преобразователей геометрически суммируются

$$\dot{U}_{n\Sigma} = \sum_{i=2}^p \dot{U}_{ni}$$

, затем определяется коэффициент несинусоидальности:

$$k_{U\Sigma} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^p U_{n\Sigma}^2}}{U_{ном}} \cdot 100 \quad (1.8)$$

Особое внимание необходимо обращать на количество учитываемых гармоник, чтобы избежать ошибки в вычислении k_U . Чем больше количество преобразователей и фаз выпрямления, тем большее количество гармоник необходимо учитывать. Предлагается следующая эмпирическая формула:

$$p = n_{\max} = 4q + m + 1, \quad (1.9)$$

где n_{\max} — наибольшая гармоника; q — число работающих преобразователей; m — число фаз выпрямления.

Пример 1. Для вентильного выпрямителя рассчитать коэффициенты n -ой гармонической составляющей напряжения и коэффициент несинусоидальности на шинах 6 кВ.

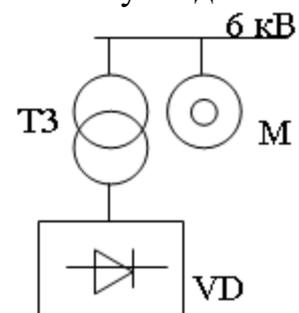
Исходные данные:

С: $S_{кз,6} = 150$ МВА

ТЗ: $S_{ТЗ} = 10$ МВА; $U_{ном} = 6$ кВ; $u_{к\%} = 10,5$ %

VD: $S_{пр} = 10$ МВА; $\cos \varphi = 0,8$; $m = 6$

М: $P_M = 220$ кВт; $\cos \varphi = 0,9$; $K_M = 1,2$; $K_I = 5,1$



Решение: Считаем сопротивление преобразователя по формуле (1.4)

$$x_{пр} = \frac{u_{к\%}}{100} \left(1 + \frac{k_p}{4}\right) \frac{S_{пр}}{S_{ТЗ}} = \frac{10,5}{100} \left(1 + \frac{0}{4}\right) \frac{10}{150} = 0,066$$

где k_p – коэффициент расщепления обмоток (для двухобмоточного трансформатора равен 0)

Сопротивление системы

$$x_c = \frac{S_{пр}}{S_{кз,6}} = \frac{10}{150} = 0,067$$

Коэффициент несинусоидальности по упрощенной формуле (1.2)

$$k_u = 100 \cdot x_c \sqrt{\frac{0,955 \cdot \sin \varphi}{x_c + x_{пр}} - 0,91} = 100 \cdot 0,067 \sqrt{\frac{0,955 \cdot 0,6}{0,067 + 0,066} - 0,91} = 12\%$$

Согласно [1] допустимый коэффициент несинусоидальности для напряжения 6 кВ составляет 5%. Так как расчетный коэффициент больше допустимого, необходима установка фильтрующих устройств.

Согласно [2] для вентильных преобразователей необходимо учитывать в расчетах только 5, 7, 11, 13 гармоники.

Угол коммутации в радианах

$$\gamma = \frac{3(x_c + x_{пр})}{m \cdot \sin \varphi} = \frac{3(0,067 + 0,066)}{6 \cdot 0,6} = 0,11 \text{ рад}$$

где m – число фаз преобразователя.

Напряжения высших гармоник и коэффициенты n -ной гармонической составляющей по (1.5) и (1.3)

$$U_n = \frac{m}{\pi \cdot n} U_{ном} \frac{x_c}{x_c + x_{пр}} \sin \varphi \cdot \sin(n \cdot \gamma), \text{ [кВ]} \quad k_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{ном}} 100, \text{ [%]}$$

$$U_5 = \frac{6}{\pi \cdot 5} 6 \frac{0,067}{0,067 + 0,066} 0,6 \cdot \sin(5 \cdot 0,11) = 0,36 \text{ кВ}$$

$$k_{U(5)} = \frac{0,36}{6} 100 = 6\%$$

$$U_7 = \frac{6}{\pi \cdot 7} 6 \frac{0,067}{0,067 + 0,066} 0,6 \cdot \sin(7 \cdot 0,11) = 0,35 \text{ кВ}$$

$$k_{U(7)} = \frac{0,35}{6} 100 = 5,8\%$$

$$U_{11} = \frac{6}{\pi \cdot 11} 6 \frac{0,067}{0,067 + 0,066} 0,6 \cdot \sin(11 \cdot 0,11) = 0,29 \text{ кВ}$$

$$k_{U(11)} = \frac{0,29}{6} 100 = 4,8\%$$

$$U_{13} = \frac{6}{\pi \cdot 13} 6 \frac{0,067}{0,067 + 0,066} 0,6 \cdot \sin(13 \cdot 0,11) = 0,26 \text{ кВ}$$

$$k_{U(13)} = \frac{0,26}{6} 100 = 4,3\%$$

2. Расчет коэффициента несинусоидальности в сетях со сварочными установками

По своему воздействию на несинусоидальность питающей сети сварочные нагрузки можно разделить на две категории: установки дуговой и контактной электросварки переменного тока, установки дуговой электросварки постоянного тока.

Установки дуговой электросварки переменного тока воздействуют на питающую сеть аналогично дуговым сталеплавильным печам. Включение сварочных машин контактной электросварки производится с помощью игнитронных или тиристорных ключей, которые для плавного регулирования сварочного тока снабжаются системами фазового регулирования угла зажигания, что приводит к искажению тока высшими гармониками, уровень которых аналогичен уровню гармоник для дуговой сварки переменного тока.

В общем случае для единичной установки электросварки переменного тока токи гармоник (рекомендуется учитывать только третью и пятую гармоники) равны:

$$I_n = S_{\text{ном,т}} \beta_{\text{св}} \sqrt{\text{ПВ}} / (n^2 U_{\text{ном}}) \quad (2.1)$$

где $S_{\text{ном,т}}$ — номинальная мощность трансформатора; $\beta_{\text{св}}$ — коэффициент загрузки; ПВ — продолжительность включения.

Определение токов гармоник, генерируемых установками дуговой электросварки постоянного тока, аналогично определению гармоник для вентилярных преобразователей. Токи гармоник (рекомендуется учитывать только 5, 7, 11, 13-ю гармоники) единичной установки дуговой электросварки постоянного тока определяются по формуле

$$I_n = \frac{I_{\text{св}}}{n} \quad (2.2)$$

где $I_{\text{св}}$ — номинальный первичный ток установки.

Для группы установок электросварки независимо от режима работы суммарные отдельные токи гармоник определяются согласно [2]

$$I_{n,r} = \sqrt{\sum_i^N I_{ni}^2} \quad (2.3)$$

где I_{ni} — ток n -й гармоники i -й установки; N — общее число работающих установок.

Для оценки влияния сварочных нагрузок на сеть предприятия определяется общий коэффициент несинусоидальности по формуле

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum_5^{13} U_n^2}}{U_{\text{НОМ}}} 100 \quad (2.4)$$

где $U_n = \frac{\sqrt{3} I_n n U_{\text{НОМ}}^2}{S_k}$ - напряжение n-й гармоники.

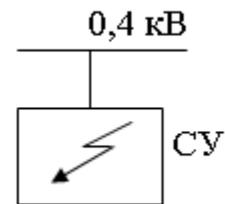
Пример 2. Для группы сварочных установок переменного тока рассчитать коэффициенты n-ой гармонической составляющей напряжения и коэффициент несинусоидальности на шинах 0,4 кВ.

Исходные данные:

Сеть 0,4кВ: $S_{\text{кз}} = 2$ МВА

Сварочная установка:

$S_{\text{НОМ}}=30$ кВА; $U_{\text{НОМ}}=0,4$ кВ; ПВ=60%; $\beta_{\text{св}}=0,5$; $N=6$



Решение: Согласно [2] в практических расчетах для сварочных установок переменного тока учитываются 3 и 5 гармоники.

Токи высших гармоник для группы сварочных установок рассчитываем по формулам (1.13) и (1.15), где n – номер гармоники

$$I_n = \frac{S_{\text{НОМ}} \beta_{\text{св}} \sqrt{\text{ПВ}}}{n^2 U_{\text{НОМ}}} \quad I_{n,r} = \sqrt{\sum_i^N I_{ni}^2}$$

$$I_3 = \frac{30 \cdot 0,5 \cdot \sqrt{0,6}}{3^2 \cdot 0,4} = 3,23 \text{ А} \quad I_{3,r} = \sqrt{6 \cdot 3,23^2} = 7,91 \text{ А}$$

$$I_5 = \frac{30 \cdot 0,5 \cdot \sqrt{0,6}}{5^2 \cdot 0,4} = 1,16 \text{ А} \quad I_{5,r} = \sqrt{6 \cdot 1,16^2} = 2,84 \text{ А}$$

Напряжения высших гармоник и коэффициенты n-ой гармонической составляющей рассчитываем по формулам (2.1) и (2.2)

$$U_n = \frac{\sqrt{3} I_n n U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{кз},0,4}} \text{ , [кВ]} \quad k_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{\text{НОМ}}} 100 \text{ , [\%]}$$

$$U_3 = \frac{\sqrt{3} \cdot 7,91 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 0,4^2}{2} = 3,29 \cdot 10^{-3} \text{ кВ} \quad k_{U(3)} = \frac{3,29 \cdot 10^{-3}}{0,4} 100 = 0,82$$

$$U_5 = \frac{\sqrt{3} \cdot 2,84 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 0,4^2}{2} = 1,97 \cdot 10^{-3} \text{ кВ} \quad k_{U(5)} = \frac{1,97 \cdot 10^{-3}}{0,4} 100 = 0,5\%$$

Коэффициент несинусоидальности напряжения на шинах 0,4 кВ

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum_3^5 U_n^2}}{U_{\text{ном}}} 100 = \frac{\sqrt{0,82^2 + 0,5^2}}{0,4} 100 = 2,4\%$$

Согласно [1] допустимый коэффициент несинусоидальности для напряжения 0,4 кВ составляет 8%. Так как расчетный коэффициент не превышает допустимый, установка фильтрующих устройств на шины 0,4 кВ не требуется.

Задача 1. Для заданной схемы рассчитать коэффициенты n-ой гармонической составляющей напряжения, коэффициент несинусоидальности на шинах 110 и 6 кВ.

Исходные данные:

C: $S_{кз,110}$ – по таблице; $S_{кз,6}=170$

МВА; $S_{кз,0,4}=3$ МВА

T2: $S_{T2}=50$ МВА; $U_{\text{ном}}=110$ кВ

T3: $S_{T3}=10$ МВА; $U_{\text{ном}}=6$ кВ;

$u_k, \%=10,5\%$

T4: $S_{T4}=1$ МВА; $U_{\text{ном}}=6$ кВ;

$u_k, \%=5,5\%$; $\Delta P_{кз}=10,5$ кВт; $\Delta P_{xx}=1,9$

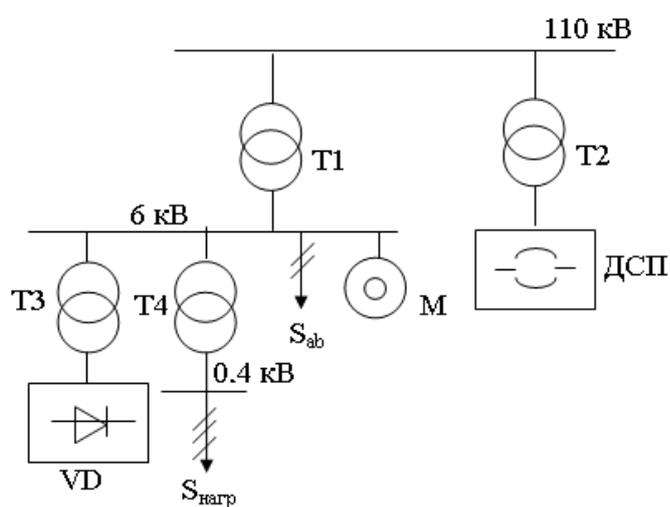
кВт

M: P_M – по таблице; $\cos \varphi=0,9$;

$K_M=1,2$; $KI=5,1$

VD: $S_{пр}=8$ МВА; $\cos \varphi=0,8$; $m=6$

H: $S_{нагр}=2$ МВА; $S_{ab}=4$ МВА



Данные для задачи

Первая цифра варианта	$S_{кз,110}$, МВА	Вторая цифра варианта	P_M , кВт
0	1500	0	200
1	1600	1	210
2	1700	2	220
3	1800	3	230
4	1900	4	240
5	2000	5	250
6	2100	6	260
7	2200	7	270
8	2300	8	280
9	2400	9	290

3. Расчет коэффициентов несинусоидальности и несимметрии в сетях с разрядными лампами

Анализ искажений тока и возникновение несимметрии

При синусоидальной форме напряжения $u_c(t)$, поступающего на разрядную лампу с индуктивным дросселем форма кривой тока через лампу $i_l(t)$ отличается от синусоидальной и имеет вид, показанный на рисунке 2.

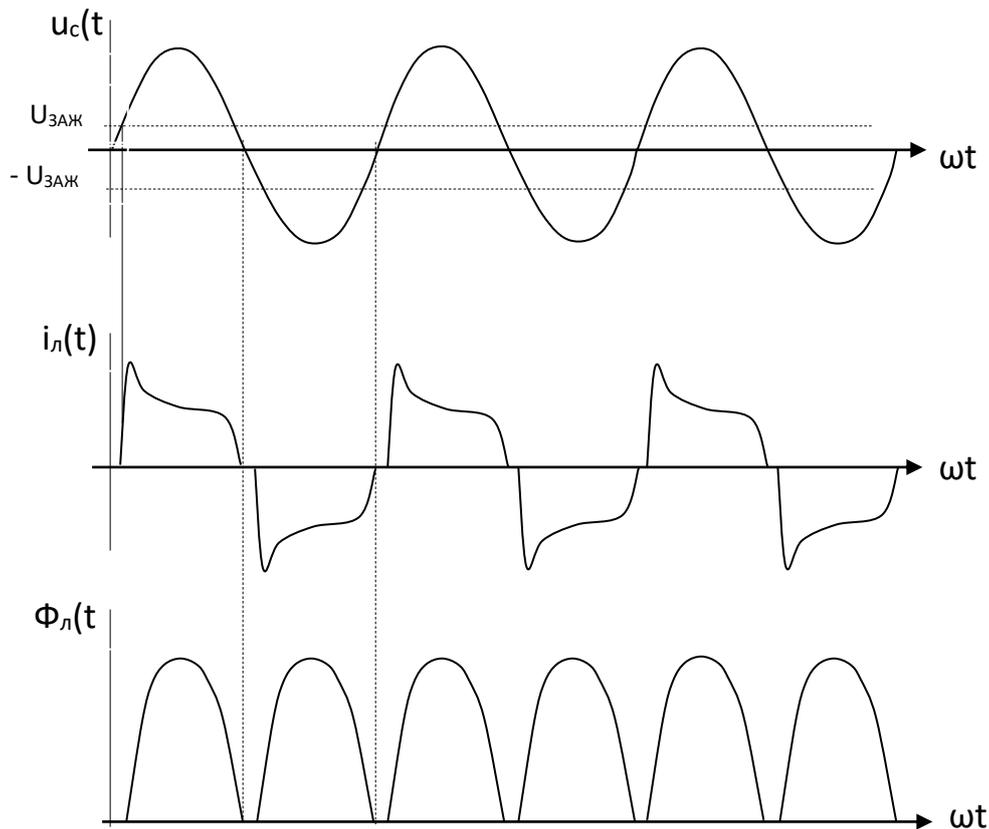


Рисунок 2. Формы кривых напряжения сети $u_c(t)$, тока $i_l(t)$ газоразрядной лампы с индуктивным балластом и светового потока $\Phi_l(t)$ лампы

С достаточной для практики точностью кривую тока аппроксимируем трапецией, тогда получаем упрощенную кривую тока лампы, изображенную на рисунке 2 б).

Так как кривая б) симметрична относительно оси абсцисс, то в разложении трапециевидной кривой тока, полученном с помощью преобразования Фурье, будут отсутствовать постоянная составляющая I_0 и четные (косинусные) гармоники с индексами $n = 2, 4, 6, \dots$, т.е. $I_{2m} \cos(2\omega t + \varphi_2) = 0$, $I_{4m} \cos(4\omega t + \varphi_4) = 0$, и т.д.

Тогда мгновенный ток через газоразрядную лампу можно записать выражением

$$i_l(t) = I_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1) + I_{3m} \sin(3\omega t + \varphi_3) + I_{5m} \sin(5\omega t + \varphi_5) + \dots \quad (3.1)$$

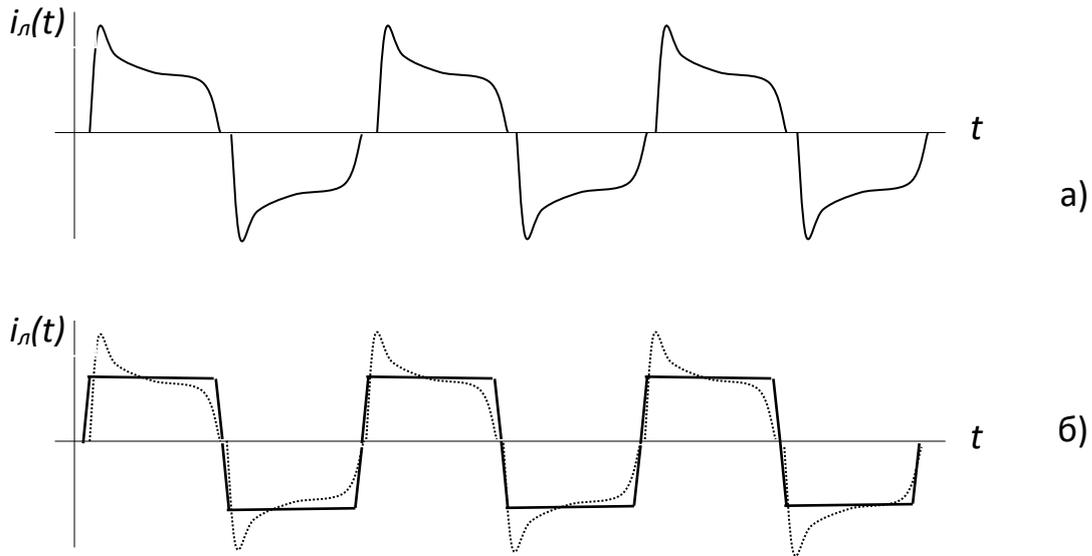


Рисунок 3. Аппроксимация кривой тока $i_n(t)$ а) лампы с индуктивным балластом трапецевидной кривой б)

Изображение полученного несинусоидального трапецевидного тока можно получить, используя свойства симметрии трапеции. Для этого рассмотрим детальное пояснение параметров, показанное на рисунке 4.

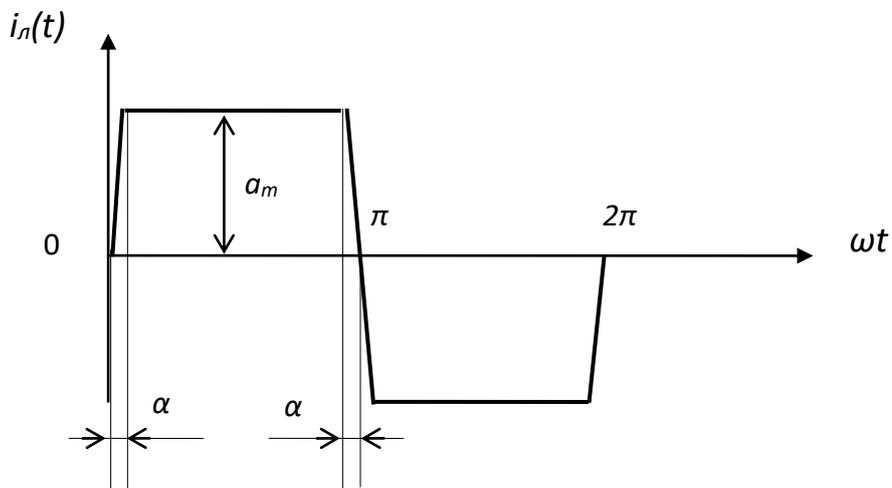


Рисунок 4. Параметры аппроксимированной кривой тока $i_n(t)$.
 a_m – амплитудное значение кривой $i_n(t)$; $\alpha = \pi/12$

Пользуясь табличным представлением данной кривой, приведенной в [4], разложение в ряд Фурье кривой, изображенной на рисунке 4, можно записать формулой:

$$f(t) = \frac{4a_m}{\alpha \cdot \pi} (\sin\alpha \cdot \sin\omega t + \frac{1}{9} \cdot \sin 3\alpha \cdot \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \cdot \sin 5\alpha \cdot \sin 5\omega t + \frac{1}{49} \cdot \sin 7\alpha \cdot \sin 7\omega t + \dots)$$

Известно из теории трехфазных электрических цепей [4], что гармоники с номерами $n = 1, 7, 13, 19, \dots$ в трехфазной сети образуют симметричные составляющие прямой последовательности, гармоники с $n = 5, 11, 17, 23, \dots$ - симметричные составляющие обратной последовательности, а гармоники с $n = 3, 9, 15, 21, \dots$ - симметричные составляющие нулевой последовательности. Наличие несимметрии в сети электроснабжения потребителей блока приводит к снижению эффективности работы электрооборудования, средств управления КИП и автоматики, ухудшает в целом эксплуатационные параметры аппаратов и силового электрооборудования.

Пример 3. Расчет коэффициентов несинусоидальности и несимметрии

Проведем расчет на примере лампы ДНаТ-1000 с ПРА, обеспечивающим коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,85$.

Действующее значение тока лампы:

$$I_{л} = S_{0.норм}/U_c = P_{усм}/\cos\varphi/U_{сф} = 1000/0,85/220 = 5,35 \text{ A.}$$

Таким образом, получаем параметр амплитуды трапеции тока $a_m = 5,35 \text{ A}$, а параметр фазы, принятый ранее из рисунка 4, равен $\alpha = \pi/12$.

Следовательно, выражение несинусоидального тока одной лампы ДНаТ-1000 имеет вид:

$$i_{л}(t) = \frac{4 \cdot 5,35}{\pi^2 / 12} \left(\sin \frac{\pi}{12} \cdot \sin\omega t + \frac{1}{9} \cdot \sin \frac{3\pi}{12} \cdot \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \cdot \sin \frac{5\pi}{12} \cdot \sin 5\omega t + \frac{1}{49} \cdot \sin \frac{7\pi}{12} \cdot \sin 7\omega t + \dots \right).$$

После несложных преобразований получим

$$\begin{aligned} i_{л}(t) = & 26 \left(0,259 \sin\omega t + \frac{0,707}{9} \sin 3\omega t + \frac{0,966}{25} \sin 5\omega t + \frac{0,966}{49} \sin 7\omega t + \frac{0,707}{81} \sin 9\omega t + \right. \\ & + \frac{0,966}{121} \sin 11\omega t + \frac{0,966}{169} \sin 13\omega t + \frac{0,707}{225} \sin 15\omega t + \frac{0,966}{289} \sin 17\omega t + \\ & + \frac{0,966}{361} \sin 19\omega t + \dots \left. \right) = 6,7 \sin\omega t + 2 \sin 3\omega t + \sin 5\omega t + 0,5 \sin 7\omega t + 0,23 \sin 9\omega t \\ & + 0,21 \sin 11\omega t + 0,15 \sin 13\omega t + 0,08 \sin 15\omega t + 0,09 \sin 17\omega t + 0,06 \sin 19\omega t + \dots \end{aligned}$$

Пренебрегая в выражении слагаемыми второго порядка малости, окончательно находим без учета фаз гармоник тока

$$i_{л}(t) = 6,7 \sin\omega t + 2 \sin 3\omega t + \sin 5\omega t + 0,5 \sin 7\omega t + 0,23 \sin 9\omega t + 0,21 \sin 11\omega t + 0,15 \sin 13\omega t, \text{ A.}$$

Далее определим коэффициент несинусоидальности тока в сети, используя формулу [3]

$$K_U = \frac{\sqrt{I_{3m}^2 + I_{5m}^2 + I_{7m}^2 + I_{9m}^2 + I_{11m}^2 + I_{13m}^2}}{\sqrt{2} \cdot I_{1m} / \sqrt{2}} \cdot 100\%;$$

$$K_U = \frac{\sqrt{2^2 + 1^2 + 0,5^2 + 0,23^2 + 0,21^2 + 0,15^2}}{6,7} \cdot 100\% = 3,4\%, \text{ что больше } K_{U.\text{don}} = 2\%.$$

Определяем действующее значение симметричной составляющей обратной последовательности, которая складывается из гармоник с номерами $n = 5$ и $n = 11$:

$$I_2 = \sqrt{(I_{5m})^2 / 2 + (I_{11m})^2 / 2} = \sqrt{(1)^2 / 2 + (0,21)^2 / 2} = 0,72 \text{ A}.$$

Тогда коэффициент обратной последовательности тока в сети [3] будет равен

$$K_{n2} = \frac{I_2}{I_1} \cdot 100\% = \frac{0,72}{6,7} \cdot 100\% = 10,7\%, \text{ что также больше } K_{n2.\text{don}} = 5\%.$$

Задача 3.

В трехфазной сети с нулевым проводом для заданной преподавателем разрядной лампы рассчитать:

1. Амплитуды и действующие значения гармоник тока (с 1-й по 17-ю) в фазах.
2. Амплитуду и действующее значение суммарного тока в фазах.
3. Значения токов гармоник в нулевом проводе.
4. Ток в нулевом проводе.

4. Расчет коэффициента несимметрии в электрических сетях с однофазной нагрузкой

При расчете напряжения обратной последовательности и коэффициента несимметрии однофазные нагрузки учитываются введением в схему замещения задающих токов обратной последовательности.

Модуль тока обратной последовательности, потребляемого однофазными нагрузками [4]

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{6U_{\text{ном}}} \sqrt{3S_{ab}^2 + (S_{ab} - 2S_{bc})^2} \quad (4.1)$$

где S_{ab} и S_{bc} – однофазная нагрузка соответственно между фазами а и в и в с.

Схема замещения сети для нахождения напряжения обратной последовательности U_2 приведена на рисунке 5.

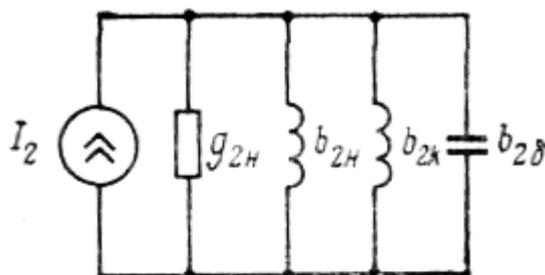


Рисунок 5. Схема замещения сети для определения напряжения обратной последовательности. На схеме обозначено: I_2 — ток обратной последовательности несимметричной нагрузки; b_{2K} и b_{26} — проводимости короткого замыкания сети мощностью S_K и трехфазной батареи конденсаторов Q_6 (если последняя имеется); b_{2H} и g_{2H} — проводимость остальной нагрузки подстанции, рассматриваемой в качестве обобщенной; в относительных единицах

$$Y_{2H} = \frac{1}{0,18 + j0,24} = 2 - j2,67$$

Выражения для активных и реактивных проводимостей имеют вид:

$$b_{2K} = \frac{S_K}{U_{\text{ном}}^2}; \quad b_{26} = \frac{Q_6}{U_{\text{ном}}^2}; \quad b_{2H} = \frac{2,67S_H}{U_{\text{ном}}^2}; \quad g_{2H} = \frac{2S_H}{U_{\text{ном}}^2};$$

Модуль полного сопротивления обратной последовательности $z_{2\Sigma}$ сети после выполнения несложных преобразований представляется выражением:

$$z_{2\Sigma} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{\sqrt{4S_{\text{H}}^2 + (S_{\text{K}} + 2,67S_{\text{H}} - Q_{\text{б}})^2}} \quad (4.2)$$

Напряжение обратной последовательности

$$U_2 = \sqrt{3}I_2z_{2\Sigma} \quad (4.3)$$

Коэффициент несимметрии

$$\varepsilon_U = \frac{U_2}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100\% \quad (4.4)$$

Пример 4. Для схемы на рисунке определить коэффициент несимметрии при подключении однофазной печи к фазам а и б.

Исходные данные:

С: $S_{\text{КЗ},6} = 150 \text{ МВА}$

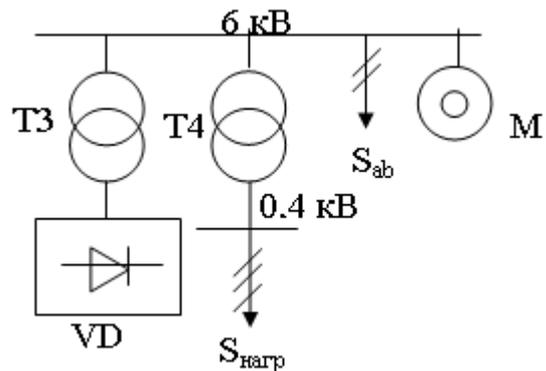
Т4: $S_{\text{Т4}} = 1 \text{ МВА}$; $U_{\text{НОМ}} = 6 \text{ кВ}$; $u_{\text{к}} = 5,5\%$;

$\Delta P_{\text{КЗ}} = 10,5 \text{ кВт}$; $\Delta P_{\text{ХХ}} = 1,9 \text{ кВт}$

VD: $S_{\text{пр}} = 10 \text{ МВА}$; $\cos \varphi = 0,8$; $m = 6$

М: $P_{\text{М}} = 220 \text{ кВт}$; $\cos \varphi = 0,9$

Н: $S_{\text{нагр}} = 1 \text{ МВА}$; $S_{\text{аб}} = 5,5 \text{ МВА}$



Решение: Ток обратной последовательности находим по формуле (4.1)

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{6U_{\text{НОМ}}} \sqrt{3S_{\text{аб}}^2 + (S_{\text{аб}} - 2S_{\text{bc}})^2} = \frac{\sqrt{3}}{6 \cdot 6} \sqrt{3 \cdot 5500^2 + (5500 - 2 \cdot 0)^2} = 530 \text{ А}$$

где $S_{\text{аб}}$ и S_{bc} – однофазная нагрузка соответственно между фазами аб и bc, кВА.

Суммарная нагрузка на шинах 6 кВ с учетом вентильного выпрямителя

$$S_{\text{H}} = S_{\text{пр}} + S_{\text{нагр}} + S_{\text{M}} = 10 + 1 + 0,22/0,9 = 11,24 \text{ МВА}$$

где $S_{\text{пр}}$ – мощность вентильного преобразователя, МВА; $S_{\text{нагр}}$ – мощность нагрузки, МВА; S_{M} – мощность двигателя, МВА.

Модуль сопротивления обратной последовательности по (2.2)

$$z_{2\Sigma} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{\sqrt{4S_{\text{H}}^2 + (S_{\text{КЗ},6} + 2,67S_{\text{H}} - Q_{\text{б}})^2}} = \frac{6^2}{\sqrt{4 \cdot 11,24^2 + (150 + 2,67 \cdot 11,24 - 0)^2}} = 0,2 \text{ Ом}$$

где $S_{кз,6}$ – мощность короткого замыкания системы на шинах 6 кВ, МВА;
 Q_b – мощность конденсаторной батареи (в данном случае не установлена, принимаем равной 0), Мвар.

Напряжение обратной последовательности по (4.3)

$$U_2 = \sqrt{3}I_2 z_{2\Sigma} = \sqrt{3} \cdot 530 \cdot 0,2 = 182,17В$$

Коэффициент несимметрии по (2.4)

$$\varepsilon_U = \frac{U_2}{U_{ном}} 100\% = \frac{182,17}{6000} 100\% = 3\%$$

Для напряжения 6 кВ допустимый коэффициент несимметрии составляет 2%. Так как расчетный коэффициент несимметрии превышает допустимый, необходима установка симметрирующих устройств.

Задача 4. Для заданной в примере схемы рассчитать коэффициент несимметрии согласно варианта из таблицы.

Данные для задачи

Первая цифра варианта	$S_{кз,6}$, МВА	Вторая цифра варианта	P_M , кВт
0	150	0	200
1	160	1	210
2	170	2	220
3	180	3	230
4	190	4	240
5	200	5	250
6	210	6	260
7	220	7	270
8	230	8	280
9	240	9	290

5. Влияние качества электроэнергии на работу электроприемников

Расчет дополнительных потерь при несинусоидальности напряжения

Несинусоидальность напряжения влияет на все виды электроприемников. Вызвано это не только тепловым дополнительным нагревом ЭП от высших гармоник (ВГ) тока, но и тем, что ВГ образуют составляющие прямой последовательности (1, 4, 7 и т. д.), обратной последовательности (2, 5, 8 и т. д.) и нулевой последовательности (гармоники кратные трем). В частности, токи нулевой последовательности создают дополнительное подмагничивание стали в электрических машинах, что приводит к ухудшению характеристик этих ЭП и дополнительному нагреву сердечников (статоры АД, магнитопроводы трансформаторов).

Обычно ВГ напряжения, суммируясь с основной гармоникой, способствуют повышению действующего значения напряжения на зажимах ЭП.

Высшие гармоники напряжения и тока неблагоприятно влияют на электрооборудование, системы автоматики, релейной защиты, телемеханики и связи: появляются дополнительные потери в электрических машинах, трансформаторах и сетях, ухудшаются условия работы батарей конденсаторов (БК), сокращается срок службы изоляции электрических машин и аппаратов, возрастает аварийность в кабельных сетях, ухудшается качество работы, а иногда появляются сбои в работе систем релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи.

Высшие гармоники напряжения и тока влияют также на значения коэффициента мощности, вращающего момента электродвигателей. Однако снижение этих характеристик, даже при коэффициенте искажения формы кривой напряжения 10—15 %, оказывается весьма небольшим. Уровень дополнительных активных потерь от ВГ в основных сетях электрических систем составляет несколько процентов от потерь при синусоидальном напряжении. В сетях предприятий, крупных промышленных центров, а также сетях электрифицированного железнодорожного транспорта эти потери могут достигать 10—15 %.

Во многих случаях в электрических сетях различных напряжений с источниками гармоник КБ, по существу, не работают: они или отключаются вследствие перегрузки по току, или в короткий срок выходят из строя в результате вспучивания, а иногда и разрушения. В условиях промышленных предприятий батареи конденсаторов способствуют созданию условий резонанса токов (или близких к этому режиму) на частоте какой-либо из гармоник, что приводит к опасной перегрузке их по току. В тяговых и промышленных электросетях с преобразователями такие перегрузки зафиксированы при резонансе на гармониках 40—50-го порядка, в сетях с электродуговыми печами и сварочными установками - на гармониках 3—7-го порядка.

Особенно чувствительны к появлению ВГ конденсаторные батареи и кабели. В конденсаторах потери пропорциональны частоте $\Delta P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$. ВГ приводят к дополнительному нагреву конденсаторов и быстрому выходу их из строя. Ограничение по дополнительному нагреву КБ заданы допустимым уве-

личением действующего на его зажимах напряжения до 10 % от $U_{ном}$ и действующего значения тока до 30% от $I_{ном}$.

Кроме того, увеличение kU приводит к старению изоляции, качество которой характеризуется $tg \delta$. Работа КБ с $kU=5\%$ в течение двух лет приводит к увеличению $tg \delta$ в 2 раза.

Аналогично восприимчивы к ВГ и кабели, качество диэлектрика которых характеризуется током утечки. При $kU=6,85\%$ за 2,5 года ток утечки возрастает на 36 %, а через 3,5 года - на 43 %.

При несинусоидальном напряжении наблюдается ускоренное старение изоляции электрических машин, трансформаторов, конденсаторов и кабелей в результате необратимых физико-химических процессов, протекающих под воздействием полей, создаваемых ВГ тока, а также повышенного нагрева токоведущих частей.

Для оценки дополнительных потерь мощности, обусловленных ВГ тока могут быть использованы следующие формулы [3]:

для асинхронных двигателей:

$$\Delta P_{м,н} = 2\Delta P_{м,ном} K_I^2 \sum \left(k_{U(n)}^2 \frac{1}{n\sqrt{n}} \right) \quad (5.1)$$

где $\Delta P_{м,ном}$ — потери в меди статора при номинальном токе основной частоты; K_I — кратность пускового тока при номинальном напряжении основной частоты; $K_{U(n)} = U_n/U_{ном}$ — относительное напряжение n -й гармоники.

для синхронных машин:

$$\Delta P_P = \frac{\sqrt{2}(r_2 - r_{СТ})}{R_X^2 X_2^2} * P_{НОМ} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{K_{U(n)}^2}{n\sqrt{n}} \quad (5.2)$$

где r_2, x_2 — активное и реактивное сопротивление обратной последовательности статора СМ; $r_{СТ}$ — активное сопротивление статора; R_X коэффициент, равный 0,71 для явнополюсных машин и 0,88 – для неявнополюсных.

В статоре СМ:

$$\Delta P_{СТ} = K_{СТ} P_{НОМ} \sum_{n=2}^{40} \frac{K_{U(n)}^2}{n\sqrt{n}} \quad (5.3)$$

где $K_{СТ} = \frac{0,47 P_{м,ном}}{R_X^2 X_2^2 P_{НОМ}}$ — коэффициент, учитывающий потери в меди обмотки от тока основной частоты, а также глубину проникновения тока в проводник;

для силовых трансформаторов:

$$\Delta P_{T,n} = \Delta P_{xx} \sum k_{U(n)}^2 + 0,6 \frac{\Delta P_{T,ном}}{u_{k,\%}} \sum \left(k_{U(n)}^2 \frac{1}{n\sqrt{n}} \right) \quad (5.4)$$

где ΔP_{xx} , $\Delta P_{кз}$, $u_{к,\%}$ - параметры трансформатора.

для силовых косинусных конденсаторов:

$$\Delta P_{кб} = C \omega \operatorname{tg} \delta \sum_{n=2}^{40} U_n^2 n, \quad (5.5)$$

где $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь конденсатора;

U_n — действующее значение напряжения n-й ВГ;

для линий электропередачи:

$$\Delta P = 3 \sum_{n=2}^{40} I_n^2 r_{лн},$$

Влияние несимметрии напряжения

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

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

Ток I_2 обратной последовательности

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{6U_{ном}} \sqrt{3S_{ab}^2 + (S_{ab} - 2S_{bc})^2} \quad (5.6)$$

где S_{ab} и S_{bc} — однофазная нагрузка соответственно между фазами ab и bc.

Этот ток создает вращающееся магнитное поле обратной последовательности, индуцируя в цепях роторов ЭДС и токи двойной частоты, что приводит к дополнительному нагреву машины.

В АД при коэффициентах обратной последовательности напряжения, встречающихся на практике ($K_{2U} = 0,05—0,06$), снижение вращающего момента оказывается пренебрежимо малым. Влияние несимметрии на потери в электродвигателе и, следовательно, нагрев и сокращение срока службы изоляции его

проявляются в большей мере. В целом срок службы АД при K_{2U} - 2—4 % сокращается на 11 % .

При работе электродвигателя с номинальным вращающимся моментом и коэффициентом несимметрии напряжений $K_{2U} = 4$ %, срок службы его сокращается примерно в 2 раза только за счет дополнительного нагрева. Если напряжение на одной из фаз будет значительно превышать номинальное значение, сокращение срока службы изоляции будет еще больше. Для обеспечения нормальных условий работы электродвигателей в этом случае необходимо снижать располагаемую мощность их, а при проектировании — увеличивать номинальную мощность электродвигателей, если не предусматриваются специальные мероприятия по симметрированию напряжений сети. Эти обстоятельства возникают, например, при проектировании электрифицированного железнодорожного транспорта, на горно-обогатительных и некоторых других промышленных предприятиях.

Для расчета дополнительных потерь, вызванных несимметрией напряжения на вводах АД может быть использовано следующее выражение:

$$\Delta P_{АД} = 2,41 \Delta P_{м1ном} K_1 \varepsilon_U^2 \quad (5.7)$$

где $\Delta P_{м1ном}$ — потери в меди статора при номинальном токе основной частоты; K_1 — кратность пускового тока при номинальном напряжении основной частоты; ε_U — коэффициент несимметрии напряжения в отн. ед.

При несимметрии напряжений в синхронных машинах (СМ) наряду с возникновением дополнительных потерь и нагревом статора и ротора могут возникать опасные вибрации в результате появления знакопеременных вращающихся моментов и тангенциальных сил, пульсирующих с двойной частотой сети. При значительной несимметрии вибрация может оказаться опасной, в особенности при недостаточной прочности или наличии дефектов сварных соединений. При несимметрии токов, не превышающей 30 % опасные перенапряжения в элементах конструкций, как правило, не возникают. Снижение срока службы СД при $K_{2и} = 2$ — 4 % составляет 16 % [3].

Дополнительные потери мощности в СМ при несимметричной нагрузке вызывают появление местных (локальных) нагревов обмотки возбуждения, что приводит к необходимости снижать ток возбуждения и тем самым уменьшать значение реактивной мощности, выдаваемой в сеть. При этом может возникнуть необходимость снизить активную нагрузку генератора или момент на валу синхронного двигателя. Дополнительные потери в статоре СМ значительно меньше аналогичных потерь в обмотке ротора, поэтому ими обычно пренебрегают

$$\Delta P_{СМ} = \Delta P_{Дном} \frac{U_2^2}{Z_{2СМ}^2}, \quad (5.8)$$

где $\Delta P_{\text{Дном}} = 3I_{\text{НОМ}}^2 r_{2P}$ — дополнительные потери в СМ при токе обратной последовательности, равном номинальному; r_{2P} — активное сопротивление обратной последовательности обмотки ротора; $Z_{2\text{СМ}}$ — полное сопротивление обратной последовательности СМ.

Несимметрия напряжений не оказывает заметного влияния на работу воздушных и кабельных линий, в то же время нагрев трансформаторов и, следовательно, сокращение срока их службы могут оказаться существенными. В случае несимметрии токов трансформатора нагрев масла будет несколько меньше, чем в случае симметричной нагрузки при токе фаз, равном току наиболее загруженной фазы. Это объясняется более интенсивным охлаждением обмотки этой фазы. Такие условия имеют место в сетях 6—10—35 кВ промышленных предприятий, работающих с изолированной или компенсированной нейтралью. Расчеты показывают, что при номинальной нагрузке трансформатора и коэффициенте несимметрии токов равном 10 % срок службы изоляции трансформатора сокращается на 16 %.

Дополнительные потери в силовых трансформаторах можно оценить по формуле

$$\Delta P_{\text{Т,нс}} = \left(\Delta P_{\text{ХХ}} + \frac{\Delta P_{\text{кз}}}{u_{\text{к, \%}}^2} \right) \varepsilon_U^2 \quad (5.9)$$

где $\Delta P_{\text{ХХ}}$, $\Delta P_{\text{кз}}$, $u_{\text{к}}$ — расчетные данные трансформатора.

Срок службы трансформаторов при $K_{\text{ж}} = 2—4$ % сокращается на 4 %.

При несимметрии линейных напряжений реактивная мощность, генерируемая батареей конденсаторов, изменяется по сравнению с номинальным значением $Q_{\text{НОМ}}$ на величину

$$\Delta Q_{\text{НОМ}} = Q_{\text{НОМ}} \frac{U_{\text{НОМ}}^2 - U_1^2 (1 + \varepsilon_U^2)}{U_{\text{НОМ}}^2} = Q_{\text{НОМ}} \frac{U_{\text{НОМ}}^2 - U_1^2}{U_{\text{НОМ}}^2}, \quad (5.10)$$

где U_1 — линейное напряжение прямой последовательности;

$U_{\text{НОМ}}$ — номинальное напряжение батареи конденсаторов.

При $K_{2U} = 0,05—0,06$ значение $\Delta Q = (0,01—0,04)Q_{\text{НОМ}}$. Поскольку на практике напряжение U_1 может быть больше или меньше напряжения $U_{\text{НОМ}}$, то возможно как увеличение, так и уменьшение генерируемой реактивной мощности. В последнем случае в наиболее загруженной фазе значения тепловых потерь могут значительно превосходить номинальное значение, создавая местный перегрев изоляции, приводящий к сокращению срока ее службы на 20 %

$$\Delta P_{\text{КБ}} = Q_{\text{НОМ}} \text{tg} \varepsilon_U, \quad (5.11)$$

где $Q_{\text{НОМ}}$ — номинальная мощность конденсаторной батареи (КБ);

$\text{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь;

ε_U — относительное значение коэффициента несимметрии.

При появлении в 3-фазной сети 380 В напряжения нулевой последовательности ухудшаются режимы однофазных ЭП. Токи нулевой последовательности постоянно протекают через заземлители и значительно высушивают грунт, увеличивая сопротивление заземляющих устройств. Это может быть недопустимо для работы релейной защиты, из-за усиления воздействия токов нулевой последовательности на низкочастотные установки связи, устройства железнодорожных блокировок. При появлении токов обратной и нулевой последовательности увеличиваются суммарные токи в отдельных фазах сети.

Расчет снижения срока службы электрооборудования при несинусоидальности и несимметрии напряжения

При работе электрооборудования в номинальном режиме дополнительные потери от токов высших гармоник и несимметрии напряжения приводят к перегреву токоведущих частей выше допустимой температуры. К повышению температуры весьма чувствительна изоляция обмоток, срок службы которой снижается.

Прирост температуры от токов высших гармоник и токов обратной последовательности

$$\Delta\tau = \tau_{\text{норм}} \frac{\Delta P_n + \Delta P_{\text{нс}}}{\Delta P_{\text{ном}}} \quad (5.12)$$

где $\tau_{\text{норм}}$ — рабочая температура электрооборудования без воздействия токов высших гармоник и токов обратной последовательности,

$^{\circ}\text{C}$, ΔP_n и $\Delta P_{\text{нс}}$ — дополнительные потери соответственно от токов высших гармоник и несимметрии напряжения.

Коэффициент снижения срока службы электрооборудования под воздействием токов высших гармоник и несимметрии напряжения

$$\frac{\Delta t}{t} = 0,086 \Delta\tau + \frac{(0,086 \Delta\tau)^2}{2} \quad (5.13)$$

Снижение срока службы электрооборудования под воздействием токов высших гармоник и токов обратной последовательности

$$\Delta t = t_{\text{норм}} \frac{\Delta t}{t} \quad (5.14)$$

где $t_{\text{норм}}$ — нормальный срок службы оборудования, лет.

Пример 5. Для схемы из примера 4 рассчитать дополнительные потери от токов высших гармоник и несимметрии напряжения в асинхронном двигателе и цеховом трансформаторе Т4, а также снижение срока службы из-за перегрева токами высших гармоник и токами обратной последовательности. Нормальный срок службы принять 20 лет. Рабочая температура 75°C .

Решение:

а) Считаем дополнительные потери и снижение срока службы для асинхронного двигателя.

Номинальный ток двигателя

$$I_{м,ном} = \frac{P_m}{\sqrt{3}U_{ном} \cos\varphi} = \frac{0,22}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,9} = 0,024 \text{кА}$$

Активное сопротивление обмотки статора

$$R_m = \frac{K_m}{K_I^2} \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}} = \frac{1,2}{5,1^2} \frac{6^2 \cdot 0,9}{0,22} = 6,8 \text{Ом}$$

Номинальные потери мощности

$$\Delta P_{м,ном} = 3I_{ном}^2 R_m = 3 \cdot 24^2 \cdot 6,8 \cdot 10^{-3} = 11,74 \text{кВт}$$

Дополнительные потери от токов высших гармоник считаем по формуле (5.1)

$$\Delta P_{м,п} = 2\Delta P_{м,ном} K_I^2 \sum \left(k_{U(n)}^2 \frac{1}{n\sqrt{n}} \right),$$

где $k_{U(n)}$ – коэффициенты n-ной гармонической составляющей напряжения, взятые в относительных единицах. В данном случае значения выбираем из примера 1.

$$\Delta P_{м,п} = 2 \cdot 11,74 \cdot 5,1^2 \sum \left(0,06^2 \frac{1}{5\sqrt{5}} + 0,058^2 \frac{1}{7\sqrt{7}} + 0,048^2 \frac{1}{11\sqrt{11}} + 0,043^2 \frac{1}{13\sqrt{13}} \right) = 0,37 \text{кВт}$$

Дополнительные потери от токов обратной последовательности при несимметрии напряжения считаем по (5.7)

$$\Delta P_{м,нс} = 2,41\Delta P_{м,ном} K_I^2 \varepsilon_U^2 = 2,41 \cdot 11,74 \cdot 5,1^2 \cdot 0,03^2 = 0,66 \text{кВт}$$

где ε_U – коэффициент несимметрии напряжения на шинах 6 кВ из примера 4, о. е.

Прирост температуры от токов высших гармоник и токов обратной последовательности по (5.12)

$$\Delta\tau = \tau_{\text{норм}} \frac{\Delta P_{\text{м,п}} + \Delta P_{\text{м,нс}}}{\Delta P_{\text{м,ном}}} = 75 \frac{0,37 + 0,66}{11,74} = 6,58^\circ\text{C}$$

где $\tau_{\text{норм}}$ – рабочая температура двигателя без воздействия токов высших гармоник и токов обратной последовательности, $^\circ\text{C}$.

Коэффициент снижения срока службы двигателя под воздействием токов высших гармоник и токов обратной последовательности по (5.13)

$$\frac{\Delta t}{t} = 0,086\Delta\tau + \frac{(0,086\Delta\tau)^2}{2} = 0,086 \cdot 6,58 + \frac{(0,086 \cdot 6,58)^2}{2} = 0,73$$

Снижение срока службы двигателя под воздействием токов высших гармоник и токов обратной последовательности по (5.14)

$$\Delta t = t_{\text{норм}} \frac{\Delta t}{t} = 20 \cdot 0,73 = 14,6 \text{года}$$

б) Считаем дополнительные потери и снижение срока службы для цехового трансформатора Т4.

Номинальный ток трансформатора

$$I_{\text{Т4,ном}} = \frac{S_{\text{Т4}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot 6} = 0,096 \text{кА}$$

Активное сопротивление трансформатора

$$R_{\text{Т4}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}} U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}^2} = \frac{0,0105 \cdot 6^2}{1^2} = 0,378 \text{Ом}$$

где $\Delta P_{\text{кз}}$ – потери мощности короткого замыкания трансформатора, МВт.

Номинальные потери мощности

$$\Delta P_{\text{Т4,ном}} = \Delta P_{\text{хх}} + 3I_{\text{Т4,ном}}^2 R_{\text{Т4}} = 1,9 + 3 \cdot 96^2 \cdot 0,378 \cdot 10^{-3} = 12,35 \text{кВт}$$

где $\Delta P_{\text{хх}}$ – потери мощности холостого хода трансформатора, кВт.
Дополнительные потери от токов высших гармоник по (5.4)

$$\Delta P_{\text{Т4,п}} = \Delta P_{\text{хх}} \sum k_{\text{U(n)}}^2 + 0,6 \frac{\Delta P_{\text{Т4,ном}}}{u_{\text{k, \%}}} \sum \left(k_{\text{U(n)}}^2 \frac{1}{n\sqrt{n}} \right),$$

где $k_{U(n)}$ – коэффициенты n-ной гармонической составляющей напряжения, взятые в относительных единицах. В данном случае значения выбираем из примера 1.

$$\Delta P_{T4,n} = 1,9 \cdot \sum (0,06^2 + 0,058^2 + 0,048^2 + 0,043^2) + 0,6 \cdot \frac{12,35}{0,055} \sum \left(0,06^2 \frac{1}{5\sqrt{5}} + 0,058^2 \frac{1}{7\sqrt{7}} + 0,048^2 \frac{1}{11\sqrt{11}} + 0,043^2 \frac{1}{13\sqrt{13}} \right) = 0,103 \text{ кВт}$$

Дополнительные потери от токов обратной последовательности по (5.9)

$$\Delta P_{T4,nc} = \left(\Delta P_{xx} + \frac{\Delta P_{T4,ном}}{u_{k,\%}} \right) \varepsilon_U^2 = \left(1,9 + \frac{12,35}{0,055} \right) 0,03^2 = 0,2 \text{ кВт}$$

Прирост температуры от токов высших гармоник и токов обратной последовательности по (5.12)

$$\Delta \tau = \tau_{норм} \frac{\Delta P_{T4,n} + \Delta P_{T4,nc}}{\Delta P_{T4,ном}} = 75 \frac{0,103 + 0,2}{12,35} = 1,86^\circ \text{C}$$

где $t_{норм}$ – рабочая температура трансформатора без воздействия токов высших гармоник и токов обратной последовательности, °C.

Коэффициент снижения срока службы трансформатора под воздействием токов высших гармоник и токов обратной последовательности по (5.13)

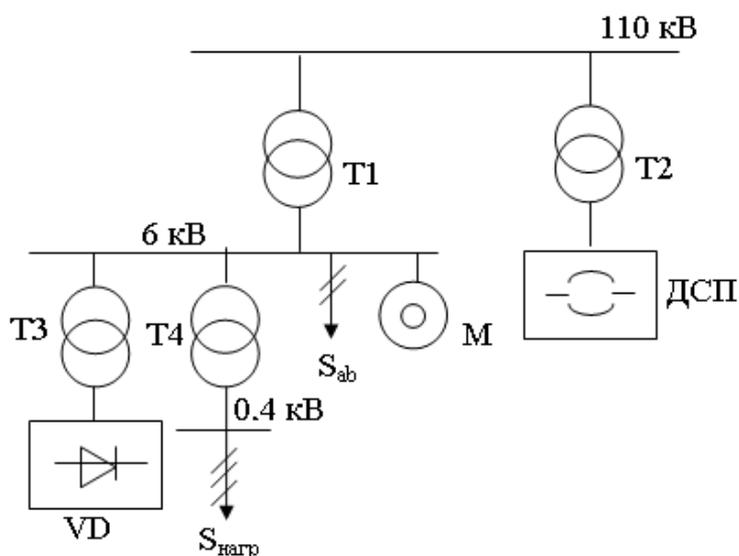
$$\frac{\Delta t}{t} = 0,086 \Delta \tau + \frac{(0,086 \Delta \tau)^2}{2} = 0,086 \cdot 1,86 + \frac{(0,086 \cdot 1,86)^2}{2} = 0,17$$

Снижение срока службы трансформатора под воздействием токов высших гармоник и токов обратной последовательности по (5.14)

$$\Delta t = t_{норм} \frac{\Delta t}{t} = 20 \cdot 0,17 = 3,45 \text{ года}$$

Задача 5.

Для схемы рассчитать дополнительные потери мощности и снижение срока службы цехового трансформатора Т4 и асинхронного двигателя М из-за перегрева токами высших гармоник и несимметрии напряжения. Нормальный срок службы принять 20 лет. Рабочая температура 75°C.



Исходные данные:

С: $S_{кз,110}$ – по таблице; $S_{кз,6}=170$ МВА; $S_{кз,0,4}=3$ МВА

Т2: $S_{Т2}=50$ МВА; $U_{ном}=110$ кВ

Т3: $S_{Т3}=10$ МВА; $U_{ном}=6$ кВ; $u_k, \%=10,5\%$

Т4: $S_{Т4}=1$ МВА; $U_{ном}=6$ кВ; $u_k, \%=5,5\%$; $\Delta P_{кз}=10,5$ кВт; $\Delta P_{xx}=1,9$ кВт

М: P_M – по таблице; $\cos \varphi=0,9$; $K_M=1,2$; $KI=5,1$

VD: $S_{пр}=8$ МВА; $\cos \varphi=0,8$; $m=6$

Н: $S_{нагр}=2$ МВА; $S_{ab}=4$ МВА

Данные для задачи

Первая цифра варианта	$S_{кз,110}$, МВА	Вторая цифра варианта	P_M , кВт
0	1500	0	200
1	1600	1	210
2	1700	2	220
3	1800	3	230
4	1900	4	240
5	2000	5	250
6	2100	6	260
7	2200	7	270
8	2300	8	280
9	2400	9	290

Рекомендуемая литература

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
2. Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1987. 336 с.
3. Карташов И.И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения. М.: Изд-во МЭИ, 2000. 120 с.
4. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях. М.: Энергия, 1977. 128 с.

Учебное издание

Безик Валерий Александрович

Никитин Антон Михайлович

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Методические указания по выполнению лабораторно-практических работ
для студентов направлений подготовки
13.04.02 Электроэнергетика и электротехника,
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника,
15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств,
35.03.06 Агроинженерия

Редактор Павлютина И.П.

Подписано к печати 06.11.2019 г. Формат 60x84. 1/16.
Бумага офсетная. Усл. п. 1,80. Тираж 25 экз. Изд. № 6526.

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