

# 1. Расчет коэффициента несинусоидальности

## 1.1. Вентильные преобразователи

В настоящее время самой распространенной схемой выпрямления для мощных преобразователей является трехфазная мостовая схема (схема Ларионова), представленная на рис. 1.1, *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 напряжения осуществляется применением соответствующих схем соединения первичных или вторичных обмоток трансформатора:  $Y$  — звезда,  $\Delta$  — треугольник,  $Z$  — зигзаг, которые позволяют осуществить практически схемы любой фазности (импульсности) выпрямления.

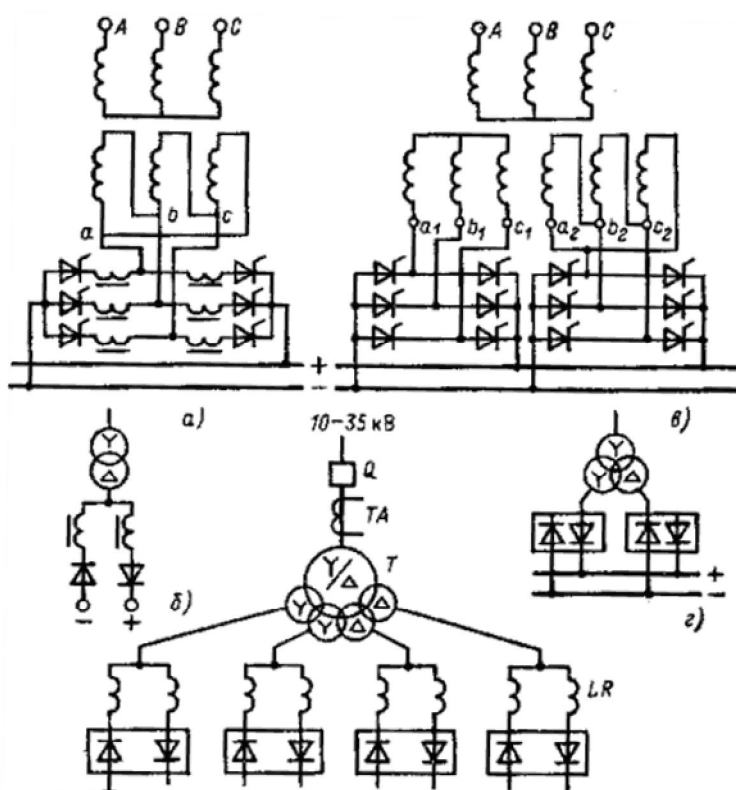


Рис. 1.1. Схемы полупроводниковых преобразовательных агрегатов:

*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 формулой  $n = mk \pm 1$ , где  $m$  — 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:  $n=5, 7, 11, 13, 17, 19, 23\dots$ ; 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.

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 удастся 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 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.

Коэффициент несинусоидальности напряжения питающей сети определяется по формуле [2]

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_{\text{НОМ}}} 100 \quad (1.1)$$

Общий коэффициент несинусоидальности питающей сети при работе вентильных преобразователей может быть определен по формуле [2]

$$k_u = 100 \cdot x_c \sqrt{\frac{0,955 \cdot \sin \varphi}{x_c + x_{\text{пр}}} - 0,91} \quad (1.2)$$

где  $x_c = \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{КЗ},6}}$  - 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  $k_U$ ;  $S_{\text{КЗ}}$  — 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  $k_U$ .

Формула (1.3) справедлива для преобразователей с любой последовательностью чередования фаз.

Кроме коэффициента несинусоидальности ГОСТ нормирует коэффициенты n-ой гармонической составляющей. Согласно [4]

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

При определении  $k_U$  особое внимание следует обращать на  $x_{\text{пр}}$ . 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  $x_{\text{пр}}$  равно сопротивлению преобразовательного трансформатора и определяется по формуле [2]

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

где  $S_{\text{ном,Г}}$  — 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 шестифазных (трехфазных мостовых) схемах выпрямления,  $k_p = 0$ , трехобмоточных трансформаторов, применяемых в преобразователях, выполненных по двенадцатифазной схеме, в общем виде

$$k_p = \frac{u_{k(\text{НН1-НН2})}}{u_k}$$

где  $u_{k(\text{НН1-НН2})}$  — 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 [2]

$$U_n = \frac{m}{\pi \cdot n} U_{\text{ном}} \frac{x_c}{x_c + x_{\text{пр}}} \sin \varphi \cdot \sin(n \cdot \gamma) \quad (1.5)$$

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

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

$$I_n = \frac{m}{\sqrt{3}\pi} \frac{S_{пр}}{U_{ном} (x_c + x_{пр}) n^2} \sin \varphi \cdot \sin(n \cdot \gamma) \quad (1.6)$$

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:

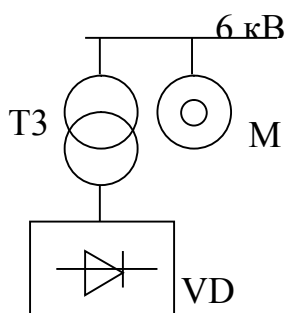
$$k_{U\Sigma} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^p U_{n\Sigma}^2}}{U_{ном}} 100$$

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:

$$p = n_{max} = 4qm + 1, \quad (1.7)$$

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:

C:  $S_{к3,6} = 150$  МВА

T3:  $S_{T3} = 10$  МВА;  $U_{ном} = 6$  кВ;  $u_{к,\%} = 10,5\%$

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

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

**Решение:** Считаем сопротивление преобразователя по формуле (1.4)

$$x_{пр} = \frac{u_{к,\%}}{100} \left(1 + \frac{k_p}{4}\right) \frac{S_{пр}}{S_{T3}} = \frac{10,5}{100} \left(1 + \frac{0}{4}\right) \frac{10}{150} = 0,066$$

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)

$U_n = \frac{m}{\pi \cdot n} U_{ном} \frac{x_c}{x_c + x_{пр}} \sin \varphi \cdot \sin(n \cdot \gamma), [\text{кВ}]$	$k_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{ном}} 100, [\%]$
$U_5 = \frac{6}{\pi \cdot 5} 6 \frac{0,067}{0,067 + 0,066} 0,6 \cdot \sin(5 \cdot 0,11) = 0,36 \text{ кВ}$	$k_{U(5)} = \frac{0,36}{6} 100 = 6\%$
$U_7 = \frac{6}{\pi \cdot 7} 6 \frac{0,067}{0,067 + 0,066} 0,6 \cdot \sin(7 \cdot 0,11) = 0,35 \text{ кВ}$	$k_{U(7)} = \frac{0,35}{6} 100 = 5,8\%$
$U_{11} = \frac{6}{\pi \cdot 11} 6 \frac{0,067}{0,067 + 0,066} 0,6 \cdot \sin(11 \cdot 0,11) = 0,29 \text{ кВ}$	$k_{U(11)} = \frac{0,29}{6} 100 = 4,8\%$
$U_{13} = \frac{6}{\pi \cdot 13} 6 \frac{0,067}{0,067 + 0,066} 0,6 \cdot \sin(13 \cdot 0,11) = 0,26 \text{ кВ}$	$k_{U(13)} = \frac{0,26}{6} 100 = 4,3\%$

## 1.2. Дуговые сталеплавильные печи

Искажения питающего тока и напряжения при работе дуговых сталеплавильных печей возникают за счет нелинейной характеристики дуги и за счет нелинейной характеристики печного трансформатора, работающего при повышенных значениях магнитной индукции. Уровень высших гармоник тока при работе дуговых сталеплавильных печей сравнительно невелик, особенно по сравнению с высшими гармониками, генерируемыми вентильными пре-

образователями. Однако с ними следует считаться, так как мощность дуговых печей постоянно растет.

На основании экспериментальных исследований [2] получено соотношение для определения максимальных значений уровней отдельных гармоник тока при работе дуговых печей.

$$I_n = \frac{I_T}{n^2} \quad (1.8)$$

где  $I_T$  — ток печного трансформатора в расчетном режиме (для расчета максимальных значений гармоник надо брать в расчет номинальный ток печного трансформатора);  $n=2, 3, 4, 5, \dots$  — номер соответствующей гармоники. Из соотношения видно, что достаточно в расчетах учитывать только до 7-й гармоники, так как остальные гармоники малы.

Для группы одинаковых дуговых сталеплавильных печей

$$I_{n,\Gamma} = I_n \sqrt[4]{N} \quad (1.9)$$

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

Для группы печей разной мощности

$$I_{n,\Gamma} = I_{n,\max} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N S_{n,\Gamma i}}{S_{n,\Gamma \max}}} \quad (1.10)$$

где  $S_{n,\Gamma i}$  — мощность  $i$ -го печного трансформатора;  $S_{n,\Gamma \max}$  — наибольшая мощность трансформатора в группе дуговых печей;  $I_{n,\max}$  — ток  $n$ -ой гармоники печного трансформатора наибольшей мощности;  $N$  — общее число работающих печей.

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

$$U_n = \frac{\sqrt{3} I_n n U_{\text{НОМ}}^2}{S_K} \quad (1.11)$$

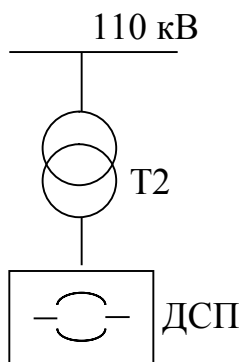
где  $I_n$  — действующее значение фазного тока  $n$ -ой гармоники;  $n$  — порядковый номер гармоники;  $U_{\text{НОМ}}$  — номинальное линейное напряжение в расчетной точке;  $S_K$  — мощность КЗ в расчетной точке.

Общий коэффициент несинусоидальности в расчетной точке при работе дуговых сталеплавильных печей, %,

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^7 U_n^2}}{U_{\text{НОМ}}} 100 \quad (1.12)$$

где  $U_{\text{НОМ}}$  — номинальное напряжение основной частоты в расчетной точке.

**Пример 2.** Для дуговой сталеплавильной печи рассчитать коэффициенты n-ой гармонической составляющей напряжения и коэффициент несинусоидальности на шинах 110 кВ.



Исходные данные:

$$C: S_{кз,110}=2300 \text{ МВА}$$

$$T2: S_{T2}=60 \text{ МВА}; U_{ном}=110 \text{ кВ}$$

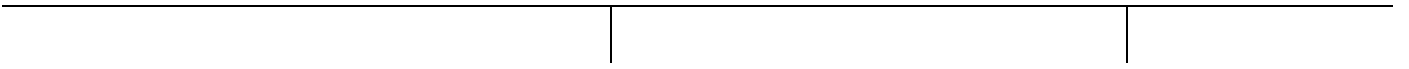
**Решение:** Считаем номинальный ток печного трансформатора

$$I_T = \frac{S_{T2}}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{60}{\sqrt{3} \cdot 110} = 0,31 \text{ кА}$$

Согласно [2] в практических расчетах для дуговых сталеплавильных печей учитываются гармоники со 2-ой по 7-ю.

Токи, напряжения высших гармоник и коэффициенты n-ой гармонической составляющей напряжения рассчитываем по формулам (1.8), (1.11) и (1.3), где n – номер гармоники

$I_n = \frac{I_T}{n^2}, [\text{кА}],$	$U_n = \frac{\sqrt{3}I_n n U_{ном}^2}{S_{кз,110}}, [\text{кВ}]$	$k_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{ном}} \cdot 100, [\%]$
$I_2 = \frac{0,31}{2^2} = 0,078 \text{ кА}$	$U_2 = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,078 \cdot 2 \cdot 110^2}{2300} = 1,42 \text{ кВ}$	$k_{U(2)} = \frac{1,42}{110} \cdot 100 =$
$I_3 = \frac{0,31}{3^2} = 0,034 \text{ кА}$	$U_3 = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,034 \cdot 3 \cdot 110^2}{2300} = 0,93 \text{ кВ}$	$k_{U(3)} = \frac{0,93}{110} \cdot 100 =$
$I_4 = \frac{0,31}{4^2} = 0,019 \text{ кА}$	$U_4 = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,019 \cdot 4 \cdot 110^2}{2300} = 0,7 \text{ кВ}$	$k_{U(4)} = \frac{0,7}{110} \cdot 100 =$
$I_5 = \frac{0,31}{5^2} = 0,012 \text{ кА}$	$U_5 = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,012 \cdot 5 \cdot 110^2}{2300} = 0,55 \text{ кВ}$	$k_{U(5)} = \frac{0,55}{110} \cdot 100 =$
$I_6 = \frac{0,31}{6^2} = 0,009 \text{ кА}$	$U_6 = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,009 \cdot 6 \cdot 110^2}{2300} = 0,49 \text{ кВ}$	$k_{U(6)} = \frac{0,49}{110} \cdot 100 =$
$I_7 = \frac{0,31}{7^2} = 0,006 \text{ кА}$	$U_7 = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,006 \cdot 7 \cdot 110^2}{2300} = 0,38 \text{ кВ}$	$k_{U(7)} = \frac{0,38}{110} \cdot 100 =$





Коэффициент несинусоидальности напряжения на шинах 110 кВ

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum_2^7 U_n^2}}{U_{\text{ном}}} 100 = \frac{\sqrt{1,42^2 + 0,93^2 + 0,7^2 + 0,55^2 + 0,49^2 + 0,38^2}}{110} 100 = 1,83\%$$

Согласно [1] допустимый коэффициент несинусоидальности для напряжения 110 кВ составляет 2%. Так как расчетный коэффициент не превышает допустимый, установка фильтрующих устройств на шины 110 кВ не требуется.

### 1.3. Сварочные установки

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 [2]) равны:

$$I_n = S_{\text{ном,т}} \beta_{\text{св}} \sqrt{\text{ПВ}} / (n^2 U_{\text{ном}}) \quad (1.13)$$

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 вентильных преобразователей. Токи гармоник (рекомендуется учитывать только 5, 7, 11, 13-ю гармоники) единичной установки дуговой электросварки постоянного тока определяются по формуле

$$I_n = \frac{I_{\text{св}}}{n} \quad (1.14)$$

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

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

$$I_{n,\Gamma} = \sqrt{\sum_i^N I_{ni}^2} \quad (1.15)$$

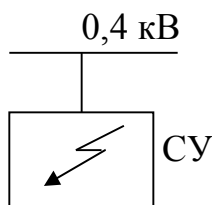
где  $I_{ni}$  — ток  $n$ -й гармоники  $i$ -й установки;  $N$  — общее число работающих установок.

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

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum_5^{13} U_n^2}}{U_{НОМ}} 100 \quad (1.16)$$

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

**Пример 3.** Для группы сварочных установок переменного тока рассчитать коэффициенты  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения и коэффициент несинусоидальности на шинах 0,4 кВ.



Исходные данные:

С:  $S_{к3,0,4}=2$  МВА

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

**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

$I_n = \frac{S_{НОМ} \beta_{св} \sqrt{ПВ}}{n^2 U_{НОМ}}$	$I_{n,r} = \sqrt{\sum_i^N I_{ni}^2}$
$I_3 = \frac{30 \cdot 0,5 \cdot \sqrt{0,6}}{3^2 \cdot 0,4} = 3,23 \text{ А}$	$I_{3,r} = \sqrt{6 \cdot 3,23^2} = 7,91 \text{ А}$
$I_5 = \frac{30 \cdot 0,5 \cdot \sqrt{0,6}}{5^2 \cdot 0,4} = 1,16 \text{ А}$	$I_{5,r} = \sqrt{6 \cdot 1,16^2} = 2,84 \text{ А}$

Напряжения высших гармоник и коэффициенты  $n$ -ой гармонической составляющей рассчитываем по формулам (1.11) и (1.3)

$U_n = \frac{\sqrt{3} I_n n U_{НОМ}^2}{S_{К3,0,4}}, [\text{кВ}]$	$k_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{НОМ}} 100, [\%]$
$U_3 = \frac{\sqrt{3} \cdot 7,91 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 0,4^2}{2} = 3,29 \cdot 10^{-3} \text{ кВ}$	$k_{U(3)} = \frac{3,29 \cdot 10^{-3}}{0,4} 100 = 0,82\%$
$U_5 = \frac{\sqrt{3} \cdot 2,84 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 0,4^2}{2} = 1,97 \cdot 10^{-3} \text{ кВ}$	$k_{U(5)} = \frac{1,97 \cdot 10^{-3}}{0,4} 100 = 0,5\%$

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.

## 2. Расчет коэффициента несимметрии

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]

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{6U_{\text{ном}}} \sqrt{3S_{ab}^2 + (S_{ab} - 2S_{bc})^2} \quad (2.1)$$

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

Схема замещения сети для нахождения напряжения обратной последовательности  $U_2$  приведена на рис.2.1 [4].

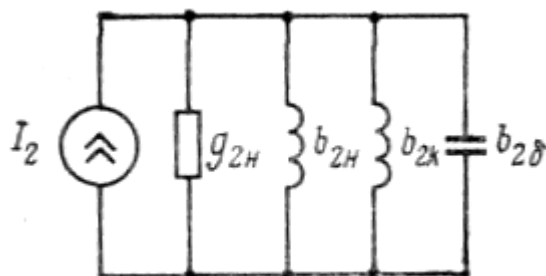


Рис. 2.1. Схема замещения сети для определения напряжения обратной последовательности. На схеме обозначено:  $I_2$  — ток обратной последовательности несимметричной нагрузки;  $b_{2K}$  и  $b_{2B}$  — проводимости короткого замыкания сети мощностью  $S_K$  и трехфазной батареи конденсаторов  $Q_B$  (если 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:

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

Модуль полного сопротивления обратной последовательности  $Z_{2\Sigma}$  сети после выполнения несложных преобразований представляется выражением [4]:

$$Z_{2\Sigma} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{\sqrt{4S_{\text{Н}}^2 + (S_{\text{К}} + 2,67S_{\text{Н}} - Q_{\text{б}})^2}} \quad (2.2)$$

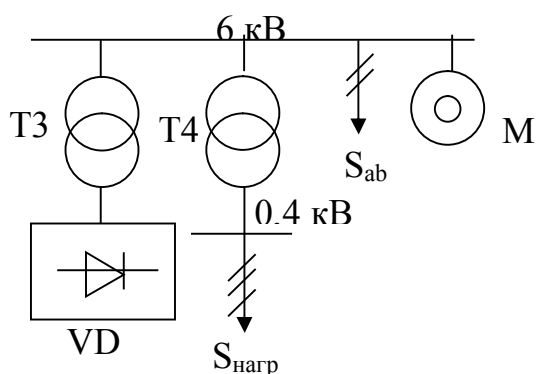
Напряжение обратной последовательности

$$U_2 = \sqrt{3}I_2Z_{2\Sigma} \quad (2.3)$$

Коэффициент несимметрии

$$\varepsilon_U = \frac{U_2}{U_{\text{НОМ}}} 100\% \quad (2.4)$$

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



Исходные данные:

С:  $S_{\text{КЗ},6}=150$  МВА

Т4:  $S_{\text{T4}}=1$  МВА;  $U_{\text{НОМ}}=6$  кВ;  $u_{\text{к},\%}=5,5\%$ ;

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

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

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

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

**Решение:** Ток обратной последовательности находим по формуле (2.1)

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

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

Суммарная нагрузка на шинах 6 кВ с учетом вентильного выпрямителя

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

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

Модуль сопротивления обратной последовательности по (2.2)

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

где  $S_{\text{КЗ},6}$  – мощность короткого замыкания системы на шинах 6 кВ, МВА;  $Q_{\text{б}}$  –

мощность конденсаторной батареи (в данном случае не установлена, принимаем равной 0), Мвар.

Напряжение обратной последовательности по (2.3)

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

Коэффициент несимметрии по (2.4)

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

Для напряжения 6 кВ допустимый коэффициент несимметрии согласно [1] составляет 2%. Так как расчетный коэффициент несимметрии превышает допустимый, необходима установка симметрирующих устройств.

### **3. Влияние качества электроэнергии на работу электроприемников**

#### **3.1. 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 увеличением действующего на его зажимах напряжения до 10 % от  $U_{\text{НОМ}}$  и действующего значения тока до 30% от  $I_{\text{НОМ}}$ .

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

Аналогично восприимчивы к ВГ и кабели, качество диэлектрика которых характеризуется током утечки. При  $k_U=6,85\%$  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:

$$\Delta P_{\text{м,п}} = 2\Delta P_{\text{м,НОМ}} K_I^2 \sum \left( k_{U(n)}^2 \frac{1}{n\sqrt{n}} \right) \quad (3.1)$$

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

для синхронных машин:

$$\Delta P_P = \frac{\sqrt{2}(r_2 - r_{CT})}{R_X^2 X_2^2} * P_{\text{НОМ}} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{K_{u(n)}^2}{n\sqrt{n}} \quad (3.2)$$

где  $r_2$ ,  $x_2$  — активное и реактивное сопротивление обратной последовательности статора СМ;  $r_{CT}$  — активное сопротивление статора;  $R_X$

коэффициент, равный 0,71 для явнополюсных машин и 0,88 – для неявнополюсных.

В статоре СМ:

$$\Delta P_{CT} = K_{CT} P_{НОМ} \sum_{n=2}^{40} \frac{K_{U(N)}^2}{n\sqrt{n}} \quad (3.3)$$

где  $K_{CT} = \frac{0,47P_{М1НОМ}}{R_x^2 X_2^2 P_{НОМ}}$  — коэффициент, учитывающий потери в меди обмотки от тока основной частоты, а также глубину проникновения тока в проводник;

для силовых трансформаторов:

$$\Delta P_{T,n} = \Delta P_{XX} \sum k_{U(n)}^2 + 0,6 \frac{\Delta P_{T,НОМ}}{u_{k,\%}} \sum \left( k_{U(n)}^2 \frac{1}{n\sqrt{n}} \right) \quad (3.4)$$

где  $\Delta P_{XX}$ ,  $\Delta P_{K3}$ ,  $u_K$  - параметры трансформатора.

для силовых косинусных конденсаторов:

$$\Delta P_{KB} = C \omega \operatorname{tg} \delta \sum_{n=2}^{40} U_n^2 n, \quad (3.5)$$

где  $\operatorname{tg} \delta$  — тангенс угла диэлектрических потерь конденсатора;  $U_n$  — действующее значение напряжения n-й ВГ;

для линий электропередачи:

$$\Delta P = 3 \sum_{n=2}^{40} I_n^2 r K_m,$$

### 3.2. 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 [4]

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{6U_{НОМ}} \sqrt{3S_{ab}^2 + (S_{ab} - 2S_{bc})^2} \quad (3.6)$$

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 ( $K_{2U} \leq 0,05—0,06$ ), 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 % [3].

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 [4]:

$$\Delta P_{\text{АД}} = 2,41 \Delta P_{\text{м1ном}} K_I \varepsilon_U^2 \quad (3.7)$$

где  $\Delta P_{\text{м1ном}}$  — потери в меди статора при номинальном токе основной частоты;  $K_I$  — кратность пускового тока при номинальном напряжении основной частоты;  $\varepsilon_U$  — 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  $K_{2u} = 2—4$  % 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



$$\Delta P_{\text{СМ}} = \Delta P_{\text{Дном}} \frac{U_2^2}{Z_{2\text{СМ}}^2}, \quad (3.8)$$

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

$$\Delta P_{\text{Т,нс}} = \left( \Delta P_{\text{ХХ}} + \frac{\Delta P_{\text{кз}}}{u_{\text{к, \%}}} \right) \varepsilon_U^2 \quad (3.9)$$

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

Срок службы трансформаторов при  $K_{2U} = 2—4$  % сокращается на 4 % [3].

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

$$\Delta Q_{\text{НОМ}} = Q_{\text{НОМ}} \frac{U_{\text{НОМ}}^2 - U_1^2 (1 + \varepsilon_U^2)}{U_{\text{НОМ}}^2} = Q_{\text{НОМ}} \frac{U_{\text{НОМ}}^2 - U_1^2}{U_{\text{НОМ}}^2}, \quad (3.10)$$

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 % [3]

$$\Delta P_{\text{КБ}} = Q_{\text{НОМ}} \text{tg} \varepsilon_U, \quad (3.11)$$

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

угла диэлектрических потерь;  $\epsilon_U$  — относительное значение коэффициента несимметрии.

Несимметрии напряжений и токов отрицательно влияет на работу рудно-термических печей, вызывая снижение их производительности, увеличение расхода электроэнергии и, тем самым, уменьшение КПД печи. Ухудшение основных показателей работы рудно-термических печей после некоторых граничных значений несимметрии, когда наблюдается резкое падение производительности и КПД печи при резком возрастании расхода электроэнергии. Последнее объясняется возникновением зон активного и пассивного хода реакции и, тем самым, неравномерностью распределения энергии по объему ванны печи. Увеличение напряжения обратной последовательности на 20 % приводит к снижению производительности рудно-термических печей на 30—40 % [3].

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.

### 3.3. 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.

Согласно [4] прирост температуры от токов высших гармоник и токов обратной последовательности

$$\Delta\tau = \tau_{\text{норм}} \frac{\Delta P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{нс}}}{\Delta P_{\text{ном}}} \quad (3.12)$$

где  $\tau_{\text{норм}}$  – рабочая температура электрооборудования без воздействия токов высших гармоник и токов обратной последовательности, °С,  $\Delta P_{\text{н}}$  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 [4]

$$\frac{\Delta t}{t} = 0,086\Delta\tau + \frac{(0,086\Delta\tau)^2}{2} \quad (3.13)$$

Снижение срока службы электрооборудования под воздействием токов высших гармоник и токов обратной последовательности [4]

$$\Delta t = t_{\text{норм}} \frac{\Delta t}{t} \quad (3.14)$$

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

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

Активное сопротивление обмотки статора

$$R_{\text{м}} = \frac{K_{\text{м}} U_{\text{ном}}^2}{K_{\text{I}}^2 S_{\text{ном}}} = \frac{1,2 \cdot 6^2 \cdot 0,9}{5,1^2 \cdot 0,22} = 6,8 \text{Ом}$$

Номинальные потери мощности

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

Дополнительные потери от токов высших гармоник считаем по формуле (3.1)

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

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

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

Дополнительные потери от токов обратной последовательности при несимметрии напряжения считаем по (3.7)

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

где  $\varepsilon_{\text{U}}$  – коэффициент несимметрии напряжения на шинах 6 кВ из примера 4, о.е.

Прирост температуры от токов высших гармоник и токов обратной последовательности по (3.12)

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

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

Коэффициент снижения срока службы двигателя под воздействием токов

высших гармоник и токов обратной последовательности по (3.13)

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

Снижение срока службы двигателя под воздействием токов высших гармоник и токов обратной последовательности по (3.14)

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

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

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

где  $\Delta P_{\text{xx}}$  – потери мощности холостого хода трансформатора, кВт.

Дополнительные потери от токов высших гармоник по (3.4)

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

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

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{Т4,n}} &= 1,9 \cdot \sum (0,06^2 + 0,058^2 + 0,048^2 + 0,043^2) + \\ &+ 0,6 \cdot \frac{12,35}{0,055} \sum \left( 0,06^2 \frac{1}{5\sqrt{5}} + 0,058^2 \frac{1}{7\sqrt{7}} + 0,048^2 \frac{1}{11\sqrt{11}} + 0,043^2 \frac{1}{13\sqrt{13}} \right) = 0,103 \text{ кВт} \end{aligned}$$

Дополнительные потери от токов обратной последовательности по (3.9)

$$\Delta P_{\text{Т4,нс}} = \left( \Delta P_{\text{xx}} + \frac{\Delta P_{\text{Т4,ном}}}{u_{k,\%}} \right) \varepsilon_U^2 = \left( 1,9 + \frac{12,35}{0,055} \right) 0,03^2 = 0,2 \text{ кВт}$$

Прирост температуры от токов высших гармоник и токов обратной последовательности по (3.12)

$$\Delta\tau = \tau_{\text{норм}} \frac{\Delta P_{\text{Т4,n}} + \Delta P_{\text{Т4,нс}}}{\Delta P_{\text{Т4,ном}}} = 75 \frac{0,103 + 0,2}{12,35} = 1,86^\circ\text{С}$$

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

Коэффициент снижения срока службы трансформатора под воздействием токов высших гармоник и токов обратной последовательности по (3.13)

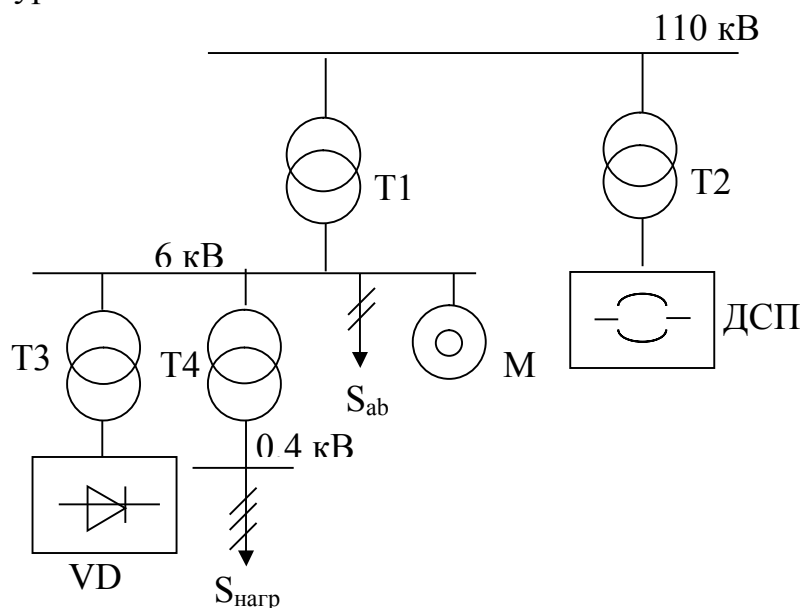
$$\frac{\Delta t}{t} = 0,086\Delta\tau + \frac{(0,086\Delta\tau)^2}{2} = 0,086 \cdot 1,86 + \frac{(0,086 \cdot 1,86)^2}{2} = 0,17$$

Снижение срока службы трансформатора под воздействием токов высших гармоник и токов обратной последовательности по (3.14)

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

## Задание на контрольную работу

Для заданной схемы рассчитать коэффициенты  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения, коэффициент несинусоидальности на шинах 110 и 6 кВ, 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;  $u_{к,\%}=10,5\%$   
 Т4:  $S_{Т4}=1$  МВА;  $U_{ном}=6$  кВ;  $u_{к,\%}=5,5\%$ ;  $\Delta P_{кз}=10,5$  кВт;  $\Delta P_{xx}=1,9$  кВт  
 М:  $P_M$  – по таблице;  $\cos \varphi=0,9$ ;  $K_M=1,2$ ;  $K_I=5,1$   
 VD:  $S_{пр}=8$  МВА;  $\cos \varphi=0,8$ ;  $m=6$   
 Н:  $S_{нагр}=2$  МВА;  $S_{ab}=4$  МВА

### Данные по шифру зачетной книжки

Предпоследняя цифра	$S_{кз,110}$ , МВА	Последняя цифра	$P_M$ , 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. Качество энергии в электрических сетях / Куско А., Томпсон М.: пер. с англ. Рабодзян А.Н. – М.: Додэка-XXI, 2008. – 336 с.: ил.
3. 8. Киреева, Э.А. Современные средства контроля и измерения в электроснабжении (Справочные материалы. Часть 1). – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2006. – 52 с.
4. 9. Суднова, В.В. Качество электрической энергии / В.В. Суднова. - М.: ЗАО «Энергосервис», 2000. - 80 с.
5. 10. Титов, А.Ф. Энергосбережение и качество электроэнергии /А.Ф. Титов. – Хабаровск: ДВГУПС, 2007. - 30 с.