

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

КУРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Энергетика и технология металлов»

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

**Методические указания
к выполнению практических занятий
и контрольных работ
для студентов очной и заочной
форм обучения специальности 140211**

Курган 2011

Кафедра: «Энергетика и технология металлов»

Дисциплина: «Электромагнитная совместимость в электроэнергетике» (направление 140200, специальность 140211 «Электроснабжение»)

Составил: доцент И.И. Копытин

Утверждены на заседании кафедры «12» ноября 2009 г.

Рекомендованы методическим советом университета
«22» октября 2010 г.

Введение

Решение практических задач по определению ПКЭ является одним из завершающих этапов обучения студентов в вузе, когда полученные студентом знания обобщаются и углубляются, расширяется технический кругозор студента.

Данные методические указания включают в себя:

1. Алгоритм составления схемы замещения элементов СЭС и энергоприемников.
2. Методы расчетов сопротивлений элементов схем замещения токам высших гармоник.
3. Методики расчетов несинусоидальности напряжений, размахов напряжений несимметрии напряжений, с примерами конкретных расчетов ПКЭ.

Данные методики могут быть использованы студентами очной и заочной форм обучения на практических занятиях, при подготовке к Междисциплинарному экзамену, при дипломном проектировании для расчетов ПКЭ. Кроме того, студенты заочной формы обучения могут воспользоваться этими методиками для выполнения контрольного задания по дисциплине «ЭМС в электроэнергетике».

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

1.1 Расчет несинусоидальности напряжения

1.1.1 Схемы замещения элементов СЭС

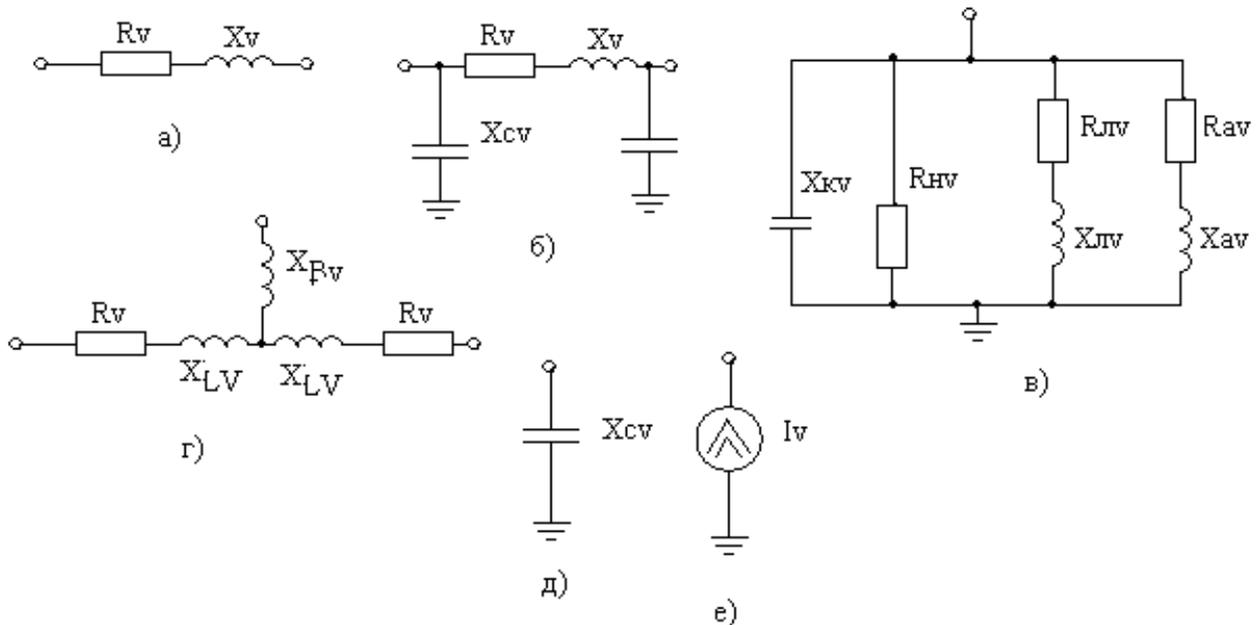
Схему замещения СЭС составляют на одну фазу. Нулевые точки схем замещения генераторов, эквивалентных нагрузок, батарей конденсаторов и емкостных проводимостей кабельных и воздушных линий соединяют между собой [28]. Пассивные элементы СЭС (трансформаторы, реакторы, линии и т.д.) замещают в общем случае активными R_V , индуктивным X_{LV} и емкостным X_{CV} сопротивлениями. В качестве активных элементов принимают электроприемники, генерирующие высшие гармоники, которые представляют в схемах замещения источниками токов высших гармоник неограниченной мощности. Схемы замещения элементов СЭС представлены на рисунке 1.1.

Сопротивления элементов схемы замещения токам высших гармоник в общем случае вычисляют по формулам:

$$R_V = R_2 K_2 K_{2V}; \quad X_{LV} = X_2 K_X K_{XV} V; \quad X_{CV} = \frac{1}{BK_{BL} V},$$

где R_2 , X_2 – активное и индуктивное сопротивления элемента току обратной последовательности промышленной частоты; B – емкостная проводимость элемента; K_2 , K_X – коэффициенты, учитывающие влияние вытеснения тока высших

гармоник в проводниках на активное и индуктивное сопротивления элемента; K_{2V} , K_{XV} , K_{BV} – коэффициенты, учитывающие распределенность параметров элемента на частотах гармоник; V – номер гармоники.



а) – двухобмоточный трансформатор; синхронный и асинхронный двигатели, одиночный реактор; б) – воздушная и кабельная линии электропередачи; в) – узел нагрузки напряжением 380 В; г) –сдвоенный реактор; д) – батареи конденсаторов; е) – электроприемник, генерирующий высшие гармоники
Рисунок 1.1 – Схемы замещения элементов СЭС

Сопротивления R_2 , X_2 и проводимость B основной частоты для линий электропередачи, трансформаторов, реакторов, двигателей и батарей конденсаторов определяют по известным в литературе выражениям, исходя из усредненных значений параметров, приводимых в справочниках и каталогах.

Вытеснение тока в проводниках на частотах высших гармоник приводит к увеличению активных сопротивлений и уменьшению индуктивности элементов СЭС. При расчетах режимов гармоник, $V \leq 25$, коэффициент Kx принимают в среднем равным для трансформаторов 0,9, синхронных машин- 0,7...0,9, асинхронных двигателей –0,8...0,9.

Коэффициенты K_{2V} , K_{XV} , K_{BV} используют, главным образом, для расчетов СЭС напряжением 110 кВ и выше. При расчетах параметров несинусоидальности в электрических сетях напряжением выше 1000 В допускается схемы замещения составлять только из реактивных элементов, а при напряжении ниже 1000 В необходимо учитывать и активные сопротивления. Следует отметить, что активные сопротивления элементов оказывают заметное влияние только на режим гармоник, частоты которых близки к резонансным частотам электриче-

ской сети. Например, если резонанс сети возникает на частоте 12-й гармоники, то активные сопротивления необходимо учитывать при расчетах режимов только 11, 12 и 13-й гармоник [28].

Ниже приведены соотношения для определения сопротивлений конкретных элементов СЭС [6, 8, 28]. Рассмотрим их последовательно:

1. Энергетическая система:

$$X_{CV} = 0,65 X_C V = 0,65 V U_{CT}^2 / S_K,$$

где X_C - сопротивление КЗ на шинах подстанции, приведенное к напряжению ступени U_{CT} , В, для которой проводится расчет высших гармоник; S_K - фактическая мощность КЗ для рассматриваемой ступени СЭС, ВА.

2. Силовой трансформатор:

$$X_{TV} = \frac{U_K U_{CT}^2}{100\% S_{T,НОМ}} V K_X,$$

где U_K - напряжение КЗ трансформатора, %; $S_{T,НОМ}$ - номинальная мощность трансформатора, ВА; $K_X = 0,88$.

Данное выражение для индуктивного сопротивления трансформатора используют при расчетах в СЭС напряжением выше 1000 В. Для цеховых понижающих трансформаторов 10/0,38 кВ рекомендуют [6, 8] следующее соотношение для полного сопротивления

$$Z_{TV} = R_T \sqrt{V} + jX_{TV}, \quad R_{TV} = \frac{\sqrt{V} \Delta P_K U_{CT}^2}{S_{T,НОМ}^2},$$

где ΔP_K - активные потери КЗ трансформатора, Вт.

3. Воздушная (кабельная) линия, продольное сопротивление:

$$X_{LV} = X_0 l \frac{U_{CT}^2}{U_{НОМ}^2} V,$$

где X_0 - удельное индуктивное сопротивление линии, Ом/км; l - длина линии, км; $U_{НОМ}$ - номинальное напряжение линии, В.

Кабельная линия, поперечное сопротивление:

$$X_{KЛЛ} = \frac{U_{CT}^2}{U_{НОМ}^2 \sum_{i=1}^n b_{oi} l_i} \cdot \frac{1}{V},$$

где b_{oi} - емкостная проводимость i -й линии $1/(Ом \cdot км)$; l_i - длина i -й линии, км; n - количество кабельных линий, подключенных к рассматриваемой секции подстанции.

Проведенные численные эксперименты показали, что емкостными проводимостями кабельных линий напряжением до 1000 В можно пренебрегать, а емкостные проводимости кабелей напряжением выше 1000 В необходимо учитывать при расчетах режимов высших гармоник порядков $V \geq 20$ [28].

4. Реактор одиночный:

$$X_{pV} = \frac{X_{p\%} U_{CT}^2}{100\% I_{p.НОМ} \sqrt{3} U_{p.НОМ}} \cdot V = X_p V \frac{U_{CT}^2}{U_{p.НОМ}^2},$$

где $X_{p\%}$ - сопротивление реактора, %; $I_{p.НОМ}$ - номинальный ток реактора, А; $U_{p.НОМ}$ - номинальное напряжение реактора, В; X_p - сопротивление реактора, Ом.

5. Сдвоенный реактор:

$$X_{p1V} = -K_{CB} X_p V \frac{U_{CT}^2}{U_{p.НОМ}^2}; \quad X_{p2V} = (1 + K_{CB}) X_p V \frac{U_{CT}^2}{U_{p.НОМ}^2},$$

где X_{p1V} - общее сопротивление; X_{p2V} - сопротивление ветви; K_{CB} - коэффициент связи.

6. Батарея конденсаторов:

$$X_{KV} = -\frac{U_{CT}^2}{Q_K V},$$

где Q_K - мощность батареи конденсаторов, вар.

7. Синхронная машина:

$$X_{CMV} = X_d'' \frac{U_{CT}^2}{S_{CM.НОМ}} K_X V,$$

где X_d'' - сверхпереходное индуктивное сопротивление синхронной машины по продольной оси, относительные единицы; (при отсутствии данных допускается принимать $X_d'' = 0,24$); $S_{CM.НОМ}$ - номинальная мощность машины, В А; $K_X = 0,71$

8. Асинхронный двигатель:

$$X_{qV} = \frac{U_{CT}^2}{K_{II} S_{д.НОМ}} K_X V,$$

где K_{II} - кратность пускового тока; $S_{д.НОМ}$ - номинальная мощность двигателя, ВА, $K_X = 0,88$

9. Электродуговая сталеплавильная печь:

$$X_{пV} = \frac{U_{CT}^2}{S_{ТП}} V,$$

где $S_{ТП}$ - номинальная мощность печного трансформатора ВА .

10. Сопротивление узла нагрузки напряжением 380 В токам высших гармоник состоит из эквивалентных сопротивлений различных групп электроприемников, входящих в узел. Эквивалентные сопротивления характерных групп нагрузок, приведенные к напряжению U_{CT} , определяют по следующим выражениям (рисунок 1.1 в):

- нагревательные устройства и лампы накаливания установленной мощностью P_{HV} , Вт:

$$R_{HV} = \frac{U_{CT}^2}{P_{HV}};$$

- люминесцентная осветительная установка с лампами типа ДРЛ установленной мощностью $P_L, Вт$:

$$R_{LV} = 0,27 \frac{U_{CT}^2}{P_L}; \quad X_{LV} = 0,39 \frac{VU_{CT}^2}{P_L};$$

- группа АД установленной мощностью $S_a, ВА$:

$$R_{AV} = \frac{0,0632U_{CT}^2}{8a} \sqrt{V}; \quad X_{AV} = \frac{0,105U_{CT}^2}{S_a} \left(0,66 + \frac{0,33}{\sqrt{V}} \right) V;$$

- батарея конденсаторов мощностью $Q_K, вар$:

$$X_{RV} = -\frac{U_{CT}^2}{Q_K V}$$

1.1.2 Параметры источников токов высших гармоник

Источники токов высших гармоник в схемах замещения представляют источниками тока бесконечной мощности. Рассмотрим параметры характерных источников токов высших гармоник.

Вентильный нерегулируемый одиночный преобразователь переменного тока в постоянный генерирует токи V -х гармоник, A :

$$I_V = \frac{I}{V} = \frac{S_{II}}{\sqrt{3}U_{CT}V},$$

где S_{II} – полная расчетная мощность преобразователя, $ВА$.

Эквивалентные токи гармоник, генерируемые несколькими однотипными преобразователями при их неизменной нагрузке, рассчитывают по выражению:

$$I_{V\Sigma} = \frac{S_{II\Sigma}K_{VE}}{\sqrt{3}U_{CT}V},$$

где $S_{II\Sigma}$ - суммарная полная мощность преобразователей, $ВА$; K_{VE} – коэффициент, учитывающий наличие сдвига фаз между гармониками тока отдельных преобразователей, для $V=11$ и $V=13$ – $K_{VE}=0,75$.

При шестифазной схеме выпрямления преобразователя рассчитывают 5, 7, 11, 13, 17, 19 и т.д. генерируемые гармоники тока, а при двенадцатифазной схеме выпрямления 11, 13, 23, 25 и т.д. гармоники.

Если к системе шин подключены шести и двенадцатифазные преобразователи, полные мощности которых равны соответственно $S_{6\Phi}$ и $S_{12\Phi}$, для определения эквивалентных токов гармоник применяют выражение:

$$I_{VX} = \frac{\sqrt{S_{6\Phi}^2 + S_{12\Phi}^2}}{\sqrt{3}U_{CT}V}.$$

Тиристорный преобразователь с трехфазной схемой выпрямления генерирует токи высших гармоник [2]:

$$I_V = \frac{I_1}{1,11(V \pm 1)}, \quad I_1 = \frac{S_{II}}{\sqrt{3}U_{CT}} \quad \text{или} \quad I_1 = \frac{0,9U_{d.HOM}I_{d.HOM}}{\sqrt{3}U_{CT} \cos \varphi},$$

где I_1 – номинальный ток первой гармоники преобразователя, A ; $U_{d.ном}$ и $I_{d.ном}$ – номинальные значения выпрямленного напряжения и тока, B и A ; $\cos\varphi$ – коэффициент реактивной мощности преобразователя; для гармоник $V=5$ и $V=13$ в знаменателе берется знак (+), для $V=7$ и $V=11$ – знак (-).

Для группы реверсивных преобразователей значения тока V -й гармоники находят по формуле [4]:

$$I_{VE} = \frac{1}{\sqrt{3}U_{CT}V} \sqrt{\sum_{i=1}^n S_{ni}^2}.$$

Дуговые сталеплавильные печи

Нелинейность вольтамперной характеристики дуги приводит к генерации дуговыми сталеплавильными печами токов высших гармоник, состав и уровни которых зависят от периода плавки [28]. Наибольших значений уровни высших гармоник достигает во время расплава, наименьших – при завершении плавки. Для расчетов обычно принимают режим расплава, т.е. используют выражение:

$$I_V = \frac{1.25I_{ТП.НОМ}}{V^2} = \frac{1.25S_{ТП.НОМ}}{\sqrt{3}U_{CT}V^2},$$

где $I_{ТП.НОМ}$ – номинальное значение, тока печного трансформатора, A ; $S_{ТП.НОМ}$ – номинальная мощность печного трансформатора, $ВА$.

Для дуговых сталеплавильных печей рассматривают 2, 3, 5, 7, 11 и 13 гармоники [2]. Ток второй гармоники принимают равным току третьей гармоники ($I_2 = I_3$) [7]. Для группы одинаковых печей:

$$I_{VГГ} = I_V \sqrt[4]{N},$$

где N – число печей, одновременно работающих в режиме расплавления. Для группы печей разной мощности:

$$I_{VГГ} = I_{VMAX} \sqrt[4]{\sum_{i=1}^n \frac{S_{ТПi}}{S_{ТПMAX}}},$$

где $S_{ТПi}$ – мощность i -го печного трансформатора; $S_{ТПMAX}$, I_{VMAX} – наибольшая мощность трансформатора в группе печей и ее ток высшей гармоники, n – общее число работающих печей.

Тиристорные регуляторы мощности применяются для управления режимом работы, например печей сопротивления [10]. В схемах используется встречно-параллельное включение тиристорov. Мощность установок достигает 2500 $кВА$. Кривые тока печного трансформатора несинусоидальны. Наиболее характерными высшими гармониками являются 2, 3, 5, 7, 11, 13. Для единичной установки токи 5, 7, 11, 13-й гармоники определяют:

$$I_V = \frac{0.7S_{ТП}}{\sqrt{3}U_{CT}V},$$

а токи 2, 3, 4-й гармоник:

$$I_V = \frac{0.4S_{ТП}}{\sqrt{3}U_{CT}V}.$$

В случае, если к одной секции шин подключено несколько установок, токи 5, 7, 11, 13-й гармоник определяют:

$$I_{VE} = \frac{0.7}{\sqrt{3}U_{CT}V} \sqrt{\sum_{i=1}^n S_{THi}^2},$$

для $V= 2, 3, 4$

$$I_{VE} = \frac{0.1}{\sqrt{3}U_{CT}V} \sqrt{\sum_{i=1}^n S_{THi}^2}.$$

Сварочные установки. По своему воздействию на несинусоидальность питающей сети сварочные нагрузки можно разделить на две категории: установки дуговой и контактной электросварки переменного тока и установки дуговой электросварки постоянного тока. Установки дуговой электросварки переменного тока воздействуют на питающую сеть аналогично дуговым сталеплавильным печам. В общем случае для единичной установки токи гармоник равны [7, 8]:

$$I_V = \frac{I_1}{V^2},$$

где для однофазных установок:

$$I_1 = S_{ПАСЛ} K_3 \frac{\sqrt{ПВ}}{U_{CT}},$$

для трехфазных:

$$I_1 = S_{ПАСЛ} K_3 \frac{\sqrt{ПВ}}{\sqrt{3}U_{CT}},$$

где $S_{ПАСЛ}$ - номинальная мощность сварочного трансформатора, ВА; K_3 – коэффициент загрузки; ПВ – продолжительность включения, в относительных единицах.

Дуговые сварочные установки переменного тока генерируют в СЭС 3, 5 и 7-ю гармоники тока.

Сварочные машины постоянного тока и сварочные выпрямители, имеющие трехфазный мостовой выпрямитель, генерируют 5, 7 и 11-ю гармоники. Токи отдельных гармоник рассчитывают по выражению:

$$I_V = \frac{I_1}{V} = \frac{S_{ПАСЛ} K_3 \sqrt{ПВ}}{\sqrt{3}U_{CT}V}.$$

Для группы установок электросварки независимо от режима работы суммарные токи отдельных гармоник определяют по формуле [7]:

$$I_{VTГ} = \sqrt{\sum_{i=1}^n I_{Vi}^2}.$$

Однофазные установки контактной электросварки, снабженные тиристорными контакторами с фазовым управлением ключей (параллельно-встречное включение тиристорov), генерируют высшие гармоники [10, 28]:

для одноточечных машин:

$$I_V = \frac{S_{ПАСЛ} K_3 K_V}{U_{CT} V^2},$$

для многоточечных машин:

$$I_V = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{S_{ПАСЛ} n K_3 K_V}{U_{СТ} V^2},$$

где n и m – число трансформаторов в одной группе и число групп; K_V – коэффициенты гармоник, для $V = 1, 3, 5, 7$ принимают соответственно $K_1=0,97, K_3=2,0, K_5=2,3, K_7=1,4$.

Современные сварочные цехи имеют большое разнообразие сварочных машин и установок. Среднестатистические значения коэффициентов загрузки $K_{3,С}$ и продолжительности включения ПВ с, приведенные в таблице 1.1, позволяют производить расчеты [8].

Таблица 1.1 – Среднестатистические значения коэффициентов загрузки $K_{3,С}$ и продолжительности включения ПВ

Вид машины	$K_{3,С}$, о.е.	ПВ _с , %
Одноточечные стационарные (при нерегулируемых тиристорных контакторах)	0,8-1,0	3-5
Одноточечные стационарные (при регулируемых тиристорных контакторах)	0,5-0,8	3-5
Одноточечные подвесные	1,1-2*	3-5
Рельефные машины	0,7-0,8	7-10
Шовные машины	0,7-0,8	50-60
Многоточечные машины	0,9-2,3	0,5-2,0
Стыковые сварочные машины (сварка сопротивлением)	0,3-0,75	30-50
Стыковые сварочные машины (сварка непрерывным оплавлением):		
оплавление	0,23-0,45	30-45
осадка	0,8-1,1	3-5
Стыковые сварочные машины (сварка оплавлением с подогревом):		
подогрев	0,7-0,9	5-15
оплавление	0,03-0,15	8-20
осадка	0,8-1,1	3-5
Дуговые автоматы	0,7-0,9	85-95
Аппараты дуговой сварки	0,3-0,6	40-55

* **Примечание.** Понятие коэффициента загрузки для электросварочных машин отличается от принятого в теории расчета электрических нагрузок. Вследствие малых значений ПВ средний ток (мощность) за время сварки может превышать номинальное значение и, следовательно, коэффициент загрузки может быть больше единицы.

Эквивалентные токи гармоник дуговых и люминесцентных ламп находят арифметическим суммированием гармоник отдельных источников [4]:

$$I_{VE} = \sum_{i=1}^n I_{VI}.$$

Токи 3 и 5-й гармоник определяют по выражениям:

$$I_3 = 0,1I_1, \quad I_5 = 0,03I_3,$$

где I_1 - первая гармоника тока, потребляемого лампой [2].

1.1.3 Расчет напряжений и токов высших гармоник в электрических сетях

Для проведения расчета необходимы следующие исходные данные: расчетная схема электрической сети; параметры всех элементов сети; параметры нагрузок, получающих питание от данной сети; значение мощности КЗ питающей сети [10].

Составляют однофазную схему замещения электрической сети, для которой определяют сопротивления элементов сети токам высших гармоник и параметры источников тока гармоник. Производят последовательное свертывание схемы замещения в направлении источников тока. После этого определяют токи гармоник в ветвях схемы. Например, ток V -й гармоники в q -й ветви I_{Vq} , обусловленный источником тока I_V , определяют как:

$$I_{Vq} = K_{Vq} I_V,$$

где K_{Vq} – коэффициент распределения токов V -й гармоники между q -й ветвью и остальными ветвями схемы замещения.

Например, для схемы (рисунок 1.2 а) коэффициенты распределения будут равны:

$$K_1 = \frac{X_2}{X_1 + X_2}, \quad K_2 = \frac{X_1}{X_1 + X_2}.$$

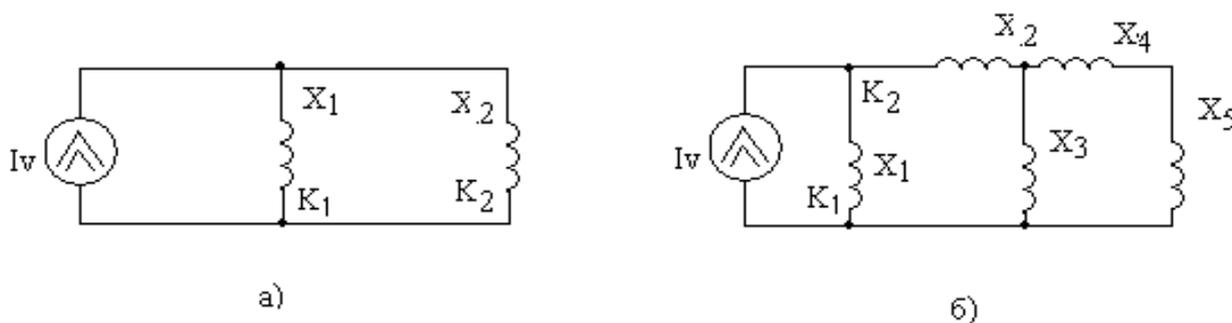


Рисунок 1.2 – Схемы замещения включения нагрузок

Для схемы, приведенной на рисунке 1.2 б, распределение токов в ветвях 3, 4, 5 можно произвести после определения тока в ветви 2. Коэффициенты распределения для 1 и 2-й ветвей определяют по выражениям:

$$K_1 = \frac{X_2 + X_E}{X_1 + X_2 + X_E}, \quad K_2 = \frac{X_1}{X_1 + X_2 + X_E}, \quad K_E = \frac{X_3(X_4 + X_5)}{X_3 + X_4 + X_5}.$$

Расчет напряжения высших гармоник в ветвях электрической сети производится по очевидной формуле:

$$U_{Vq} = X_{Vq} I_{Vq}$$

где U_{Vq} - напряжение V -й гармоники на зажимах q -й ветви; X_{Vq} – индуктивное

сопротивление ветви на частоте этой гармоники; I_{Vq} – ток V -й гармоники в q -й ветви.

Полученные расчетные значения токов $I_{Vq\Sigma}$ и напряжений $U_{Vq\Sigma}$ высших гармоник в дальнейшем используют для оценки величин коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, а также оценки воздействия высших гармоник на электрическую сеть.

1.1.4 Примеры расчетов

Пример 1.1. Проведем расчет токов и напряжений высших гармоник на сборных шинах напряжением 10 кВ промышленного предприятия (рисунок 1.3а). Предприятие питается от энергосистемы через понижающий трансформатор Т1 ($S_{T.ном} = 16$ МВА; $U_K = 10,5\%$). Мощность системы $S_K = 4000$ МВА. Трансформатор Т1 соединен со сборными шинами через токоограничивающий реактор ($I_{рном} = 1500$ А; $X_{P\%} = 8\%$). К сборным шинам подключены 7 цеховых ТП ($S_{T.ном} = 1000$ кВА; $U_K = 5,5\%$), 2 синхронных двигателя ($P_{сд.ном} = 500$ кВт; $Q_{сд.ном} = 264$ квар) и тиристорный преобразователь частоты ТПЧ ($U_d = 800$ В; $I_d = 1550$ А; $\cos\varphi = 0,95$). Расчетная активная нагрузка $P_P = 9,2$ МВт, реактивная $Q_P = 8$ Мвар. Для компенсации реактивной мощности дополнительно подключена конденсаторная батарея $Q_K = 5,2$ Мвар.

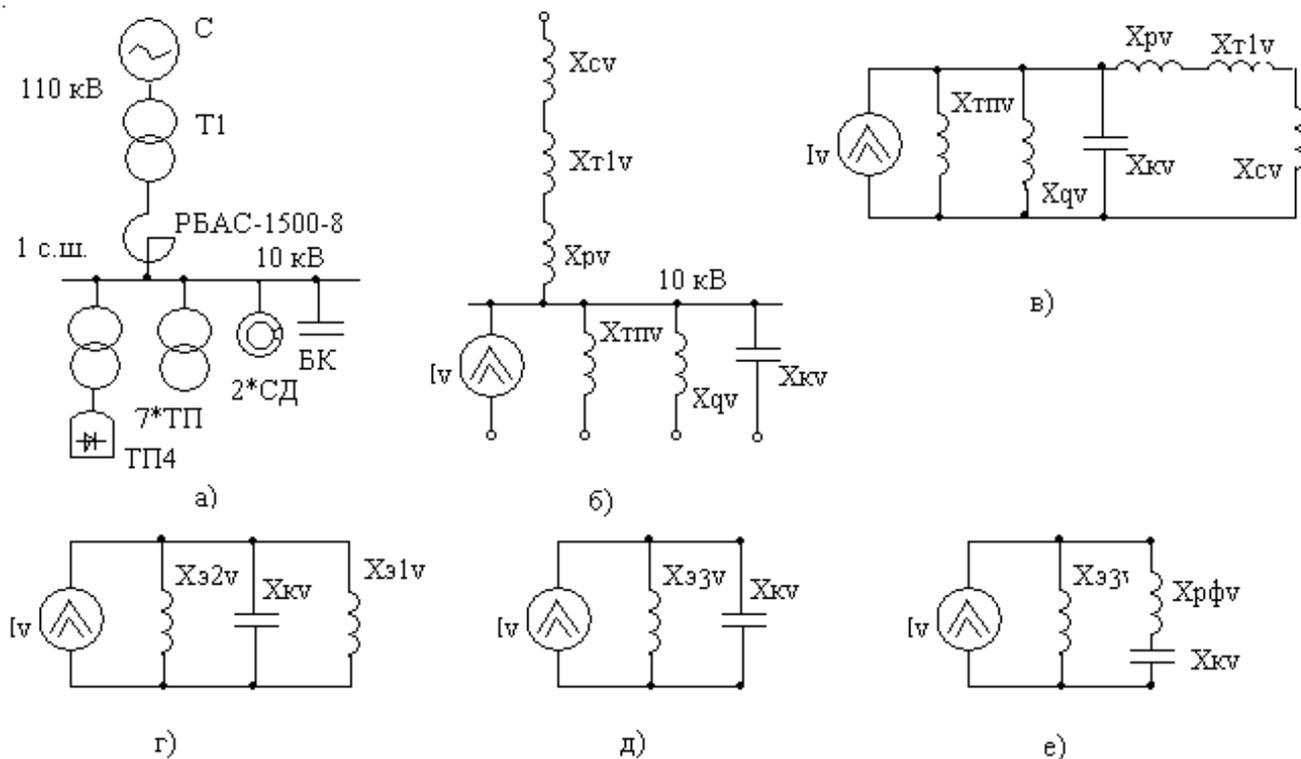


Рисунок 1.3 – Исходная схема электроснабжения и ее схемы замещения

На рисунке 1.3 б показана схема замещения, которую преобразуют путем объединения концов всех нагрузочных ветвей, ветвей питающей энергосистемы и вентильных преобразователей. Затем производят свертывание схемы от-

носителем секций сборных шин напряжением 10 кВ, для которых должен быть проведен расчет напряжений и токов высших гармоник (рисунок 1.3 в, г, д). При расчётах использованы положения, изложенные в пп. 1.1.1...1.1.3. Рассчитываем сопротивления элементов схемы замещения V -й гармоники.

Энергосистема:

$$X_{CV} = 0.65 \frac{U_{CT}^2}{S_K} V = 0.65 \frac{10^2}{4000} V = 0.016V \text{ Ом.}$$

Трансформатор:

$$X_{TV} = \frac{U_K U_{CT}^2}{100\% S_{T.HOM}} K_X V = \frac{10,5 \cdot 10^2 \cdot 0,88}{100 \cdot 16} V = 0.58V \text{ Ом.}$$

Реактор:

$$X_{PV} = \frac{X_{P\%}}{100\%} \frac{U_{CT}^2 V}{\sqrt{3} I_{P.HOM} U_{P.HOM}} = \frac{8 \cdot 10^2}{100 \cdot 10 \cdot 1,5 \cdot \sqrt{3}} V = 0.31V \text{ Ом.}$$

Трансформаторы цеховых ТП:

$$X_{TPV} = \frac{u_K}{100\%} \frac{U_{CT}^2 V}{S_{T.HOM}} = \frac{5,5 \cdot 10^2}{100 \cdot 7 \cdot 1} V = 0.785V \text{ Ом.}$$

Синхронные двигатели:

$$X_{qV} = X_d'' \frac{U_{CT}^2}{S_{CDE}} K_X V = \frac{10^2 \cdot 0,24}{2 \cdot \sqrt{0,5^2 + 0,264^2}} 0,71 \cdot V = 15.07V \text{ Ом.}$$

Конденсаторная батарея:

$$X_{KV} = -\frac{U_{CT}^2}{Q_K V} = -\frac{10^2}{5,2V} = -19.23/V \text{ Ом.}$$

Суммарное сопротивление системы, трансформатора ГПП, реактора:

$$X_{\Sigma 1V} = X_{CV} + X_{TV} + X_{PV} = 0.016V + 0.58V + 0.31V = 0.906V \text{ Ом.}$$

Суммарное сопротивление трансформаторов ТП и СД:

$$X_{\Sigma 2V} = \frac{X_{TPV} X_{qV}}{X_{TPV} + X_{qV}} = \frac{0.785 \cdot 15.07 \cdot V^2}{0.785V + 15.07V} = 0.746V \text{ Ом.}$$

Суммарное индуктивное сопротивление всей схемы:

$$X_{\Sigma 3V} = \frac{X_{\Sigma 1V} X_{\Sigma 2V}}{X_{\Sigma 1V} + X_{\Sigma 2V}} = \frac{0.906 \cdot 0,746 \cdot V^2}{0.906V + 0,746V} = 0.41V \text{ Ом.}$$

Величины гармоник тока, генерируемых одним тиристорным преобразователем частоты:

$$I_V = \frac{I_1}{1.11 \cdot (V \pm 1)},$$

$$I_1 = \frac{0.9 \cdot U_d I_d}{\sqrt{3} U_{CT} \cos \varphi},$$

$$I_1 = \frac{0.9 \cdot 800 \cdot 1550}{\sqrt{3} \cdot 10000 \cdot 0.95} = 67.9A,$$

$$I_3 = \frac{67.9}{1.11 \cdot (5+1)} = 10.19A,$$

$$I_7 = \frac{67.9}{1.11 \cdot (7-1)} = 10.19A,$$

$$I_{11} = \frac{67.9}{1.11 \cdot (11-1)} = 6.12A,$$

$$I_{13} = \frac{67.9}{1.11 \cdot (13+1)} = 4.37A.$$

Коэффициент (доля) распределения токов гармоник, протекающих по конденсаторной батарее (рисунок 1.3 д):

$$K_{KV} = \frac{X_{\text{ЭЗВ}}}{X_{\text{ЭЗВ}} + X_{KV}} = \frac{0.41 \cdot V}{0.41 \cdot V - 19.23/V}.$$

Токи гармоник, протекающие по конденсаторной батарее:

$$I_{KV} = K_{KV} I_V, \quad K_5 = \frac{10.19 \cdot 0.41 \cdot 5}{0.41 \cdot 5 - 19.23/5} = -11.63 \text{ A.}$$

$$I_7 = 238 \text{ A}, \quad I_{11} = 9.99 \text{ A}, \quad I_{13} = 6.06 \text{ A.}$$

Номинальный ток 1-й гармоники конденсаторной батареи:

$$I_1 = \frac{Q_K}{\sqrt{3} U_{\text{НОМ}}} = \frac{5200}{\sqrt{3} \cdot 10} = 300 \text{ A.}$$

Полный ток конденсаторной батареи с учетом высших гармоник:

$$I_{\text{КЗ}} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{V=1}^{13} I_V^2} = \sqrt{300^2 + 11.63^2 + 238^2 + 9.99^2 + 6.05^2} = 383 \text{ A} < I_{\text{ДОП}} = 130\% I_1.$$

Определим напряжения высших гармоник на сборных шинах напряжением 10кВ:

$$U_V = I_{KV} X_{KV}, \quad U_5 = (-11.63) \cdot (-19.23/5) = 44.72 \text{ В}, \\ U_7 = -653 \text{ В}, \quad U_{11} = -17,46 \text{ В}, \quad U_{13} = -8,95 \text{ В}.$$

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения:

$$K_U = \frac{100\% \cdot \sqrt{\sum U_V^2}}{U_{\text{Л}} / \sqrt{3}} = \frac{100 \cdot \sqrt{44,72^2 + 653,8^2 + 17,46^2 + 8,95^2}}{10000 / \sqrt{3}} = 11,74\% > 5\%, \text{ определяемых}$$

ГОСТ-13109-97 как допустимых.

Таким образом, токовая нагрузка конденсаторной батареи близка к предельно допустимой, а коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения на сборных шинах напряжением 10 кВ превышает допустимое значение в более чем в 2 раза. При этом следует отметить, что резонансная гармоника схемы равна $V_P = \sqrt{X_K / X_{\text{ЭЗ}}} = \sqrt{19.23 / 0.41} = 6.85$ и близка к 7-й гармонике сети.

Поэтому к сборным шинам целесообразно подключить силовой резонансный фильтр 5-й гармоники. Мощность конденсаторной батареи СРФ из условия компенсации реактивной мощности примем равной 5,2 Мвар. Тогда сопротивление фазы реакторов СРФ должно, быть равно:

$$X_{P\Phi} = \frac{X_K}{V_P^2} = \frac{19.23}{5^2} = 0.769 \text{ Ом}.$$

Схема замещения с учетом СРФ представлена на рисунке 1.3 е. Определим коэффициент распределения токов гармоник, протекающих через СРФ:

$$K_{\Phi V} = \frac{X_{\text{ЭЗВ}}}{X_{\text{ЭЗВ}} + (X_{P\Phi\Phi} + X_{KV})} = \frac{0.41 \cdot V}{0.41 \cdot V + 0.769 \cdot V - 19.23/V}.$$

Токи высших гармоник, протекающие по СРФ:

$$I_{\Phi V} = I_V K_{\Phi V}, \quad I_5 = \frac{10.19 \cdot 0.41 \cdot 5}{0.41 \cdot 5 + 0.769 \cdot 5 - 19.23/5} = 10.19 \text{ A},$$

$$I_7 = 5.31 \text{ A}; \quad I_{11} = 2.46 \text{ A}; \quad I_{13} = 1.52 \text{ A}.$$

Полный ток, протекающий через СРФ, в частности через его конденсатор-

ную батарею, станет равным:

$$I_{K\Sigma} = \sqrt{300^2 + 10.19^2 + 5.31^2 + 2.46^2 + 1.52^2} = 300.23A.$$

Расчет показывает, что использование в схеме СРФ существенно улучшает токовую нагрузку конденсаторной батареи.

Напряжения высших гармоник на сборных шинах напряжением 10 кВ (на СРФ):

$$U_V = I_V (X_{PФФ} + X_{KV}),$$

$$U_5 = 10.19 \cdot (0.769 \cdot 5 - 19.23/5) = 0,$$

$$U_7 = 28.6B; U_{11} = 16,51B; U_{13} = 12,95B.$$

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения после установки СРФ:

$$K_U = \frac{100\% \cdot \sqrt{0^2 + 28,6^2 + 16,51^2 + 12,95^2}}{10000/\sqrt{3}} = 0,61\% < 5\%, \text{ (ГОСТ 13109-97).}$$

Таким образом, после установки СРФ уровень высших гармоник стал ниже допустимого предела.

Примечание. Методика расчета напряжений и токов высших гармоник в СЭС, использованная в данном примере, является общей и позволяет принципиально рассчитывать электрические схемы любой конфигурации.

Пример 1.2. Рассмотрим изменение уровней напряжений и токов высших гармоник на сборных шинах напряжением 380 В цеховой трансформаторной подстанции (рисунок 1.4 а), от которых питается вентильный преобразователь переменного тока в постоянный для трех случаев:

- 1) при отсутствии конденсаторной батареи БК;
- 2) для компенсации реактивной мощности к сборным шинам подключена конденсаторная батарея БК;
- 3) для защиты батареи от токов высших гармоник установлен защитный реактор Р.

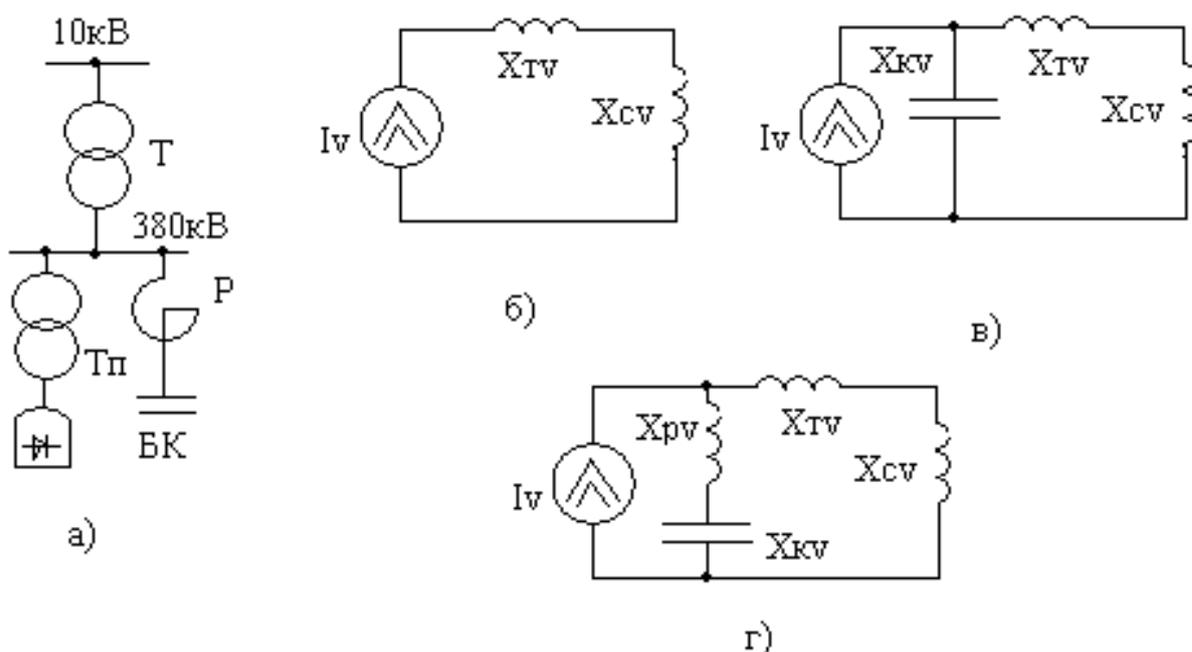


Рисунок 1.4 – Схема электроснабжения и ее схемы замещения

Преобразователь имеет мостовую шестифазную схему выпрямления и генерирует гармоники следующего порядка: $V = 5, 7, 11, 13$ и т.д. Данные преобразователя: $S_{II} = 300 \text{ кВА}$; $\cos\varphi = 0,82$. Цеховой понижающий трансформатор Т имеет номинальную мощность $S_{T.НОМ} = 400 \text{ кВА}$ и напряжение КЗ $U_k = 4,5 \%$. Мощность КЗ на сборных шинах напряжением 10 кВ составляет $S_k = 200 \text{ МВА}$.

Эквивалентная однофазная схема замещения для 1-го случая приведена на рисунке 1.4 б. Вентильный преобразователь замещен источником тока бесконечной мощности I_V с таким же спектром высших гармоник, что и у реального преобразователя. Сопротивления электрической сети до трансформатора Т и самого трансформатора на основной частоте, приведенные к ступени напряжения 380 В , равны:

$$X_C = \frac{U_{CT}^2}{S_K} = \frac{380^2}{200 \cdot 10^6} = 0.00072 \text{ Ом},$$

$$X_T = \frac{U_K U_{CT}^2}{100\% \cdot S_{T.НОМ}} = \frac{4,5 \cdot 380^2}{100 \cdot 400 \cdot 10^3} = 0.0162 \text{ Ом}.$$

Подведем расчет токов высших гармоник преобразователя (рассмотрим только 5, 7, 11 и 13-ю гармоники):

$$I_1 = \frac{S_{II}}{\sqrt{3} U_{CT}} = \frac{300 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} = 456 \text{ А}, \quad I_V = \frac{I_1}{V},$$

$$I_5 = 91.2 \text{ А}; \quad I_7 = 65.1 \text{ А}; \quad I_{11} = 41.5 \text{ А}; \quad I_{13} = 35 \text{ А}.$$

Фазные напряжения высших гармоник на сборных шинах напряжением 380 В :

$$U_V = I_V X_{EV} = I_V (X_C + X_T) V,$$

$$U_5 = 91.5 \cdot (0.00072 + 0.0162) \cdot 5 = 7.74 \text{ В},$$

$$U_7 = 7.74 \text{ В}, \quad U_{11} = 7.74 \text{ В}, \quad U_{13} = 7.74 \text{ В}.$$

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения:

$$K_U = \frac{100\% \cdot \sqrt{\sum U_V^2}}{U_\phi} = \frac{100 \cdot \sqrt{7,74^2 + 7,74^2 + 7,74^2 + 7,74^2}}{220} = 7,04\%, \text{ что меньше допустимых } 8\%, \text{ определяемых ГОСТ 13109-97.}$$

Для компенсации реактивной мощности, потребляемой преобразователем, к сборным шинам может быть подключена конденсаторная батарея (вариант 2; рисунок 1.4 в).

Реактивная мощность преобразователя составляет:

$$Q_{II} = S_{II} \sin\varphi = 300 \cdot 0.57 = 171 \text{ квар}.$$

Принимаем к установке конденсаторную батарею мощностью $Q_K = 150 \text{ квар}$.

Ее реактивное сопротивление на основной частоте равно:

$$X_K = -\frac{U_{CT}^2}{Q_K} = -\frac{380^2}{150 \cdot 10^3} = -0.963 \text{ Ом}.$$

Токи источника высших гармоник (преобразователя) остаются без изменения, а изменяются их фазные напряжения на сборных шинах подстанции:

$$U_V = \frac{I_V}{\frac{1}{(X_C + X_T)V} + \frac{1}{X_K}}$$

$$U_5 = \frac{91.2}{\frac{1}{(0.00072 + 0.0162)5} + \frac{1}{0.963}} = 13.76B.$$

$$U_7 = 55,6B, \quad U_{11} = -6,86B, \quad U_{13} = -3,91B.$$

Из данных расчета видно, что напряженно 7-й гармоники сопоставимо с напряжением основной частоты, т.е. схема работает в режиме, близким к резонансному ($V_P = 7,54$) Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения для 2-го варианта будет равен:

$$K_U = \frac{100 \cdot \sqrt{13.70^2 + 55.6^2 + 6.86^2 + 3.91^2}}{220} = 26.28\%, \text{ больше предельно допустимых } 12\%,$$

определяемых ГОСТ 13109-97.

Определяем токи высших гармоник, протекающие через конденсаторную батарею:

$$I_{KV} = \frac{U_V}{X_{KV}} = \frac{U_V V}{X_K}, \quad I_{K5} = \frac{13.76 \cdot 5}{-0.963} = -71.44A.$$

$$I_{K7} = -404.1A; \quad I_{K11} = 78,36A; \quad I_{K13} = 52,78A.$$

Номинальный ток первой гармоники конденсаторной батареи:

$$I_1 = \frac{Q_K}{\sqrt{3}U_{НОМ}} = \frac{150000}{380 \cdot \sqrt{3}} = 228,2A.$$

Полный ток конденсаторной батареи с учетом высших гармоник:

$$I_{K\Sigma} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{V=1}^{13} I_V^2} = \sqrt{228.2^2 + 71.44^2 + 404.1^2 + 78.36^2 + 52.78^2} = 478.96A,$$

$$I_{K\Sigma\%} = \frac{100\% I_{K\Sigma}}{I_1} = 209.99\% > I_{ДОП} = 130\% I_1.$$

Таким образом, действующее значение полного тока конденсаторной батареи превышает как ее номинальный ток (более чем в 2 раза), так и допустимый ток. Это может привести к отказу батареи. Для ее защиты и отстройки от резонансов используют последовательное включение защитного реактора или подключение к сети силовых резонансных фильтров.

Рассмотрим вариант с защитным реактором, включаемым последовательно с конденсаторной батареей. Сопротивление реактора рассчитывают из условия создания резонансной LC – цепи на гармонике меньше наименьшей гармоники, генерируемой вентиляльным преобразователем. В примере рассматривается $V_{MIN} = 5$. Следовательно:

$$X_P \geq \frac{1.1 \cdot X_K}{V_{MIN}^2} = 1.1 \cdot \frac{0.963}{5^2} = 0.0423 \text{ Ом.}$$

Примем $X_P = 0,045$ Ом. Новая эквивалентная схема замещения с защитным реактором примет вид, показанный на рисунке 1.4 г. Фазные напряжения выс-

ших гармоник на сборных шинах напряжением 380 В (на конденсаторной батарее с защитным реактором):

$$U_V = \frac{I_V}{\frac{1}{(X_C + X_T)V} + \frac{1}{X_P V + X_K / V}}$$

$$U_5 = \frac{91.2}{\frac{1}{(0.00072 + 0.0162)5} - \frac{1}{0.045 \cdot 5 - 0.963/5}} = 2.14B.$$

$$U_7 = 4,62B, \quad U_{11} = 5,3B, \quad U_{13} = 5,38B.$$

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения и действующее напряжение, %, на сборных шинах при этом составят:

$$K_U = \frac{100\% \cdot \sqrt{2.14^2 + 4.62^2 + 5.3^2 + 5.38^2}}{220} = 4.54\% < 8\% \text{ допустимого значения, определяемого ГОСТ 13109-97.}$$

$$U_{\%} = 100\% \sqrt{\frac{U_1^2 + \sum_{V=5}^{13} U_V^2}{U_{\phi}}} = 100.1\% < 110\% U_{НОМ} = U_{ДОП\%}.$$

Токи высших гармоник в конденсаторной батарее при защите ее защитным реактором:

$$I_{KV} = \frac{U_V}{X_P V + X_K / V},$$

$$I_{K5} = \frac{2.14}{0.045 \cdot 5 - 0.963/5} = 66.05A,$$

$$I_{K7} = 26.1A; \quad I_{K11} = 13,02A; \quad I_{K13} = 10,52A;$$

Действующее значение полного тока через конденсаторную батарею уменьшится до:

$$I_{K\Sigma} \% = 100\% \cdot \frac{\sqrt{I_1^2 + \sum_{V=1}^{13} I_V^2}}{I_1} = \frac{100 \cdot \sqrt{228.2^2 + 56.05^2 + 26.1^2 + 13.02^2 + 10.52^2}}{228.2} = 104.2\% < 130\% I_1$$

Проведенный анализ трех режимов работы сборных шин цеховой трансформаторной подстанции позволяет сделать следующие выводы:

1. Подключение конденсаторной батареи без защитного реактора ведет к значительному (в несколько раз) увеличению несинусоидальности напряжения.

2. Включение конденсаторной батареи без защитного реактора недопустимо из-за ее перегруза токами высших гармоник.

3. Включение защитного реактора последовательно с конденсаторной батареей принципиально улучшает качество ЭЭ на сборных шинах напряжением 380 В, обеспечивая нормальную работу как конденсаторной батареи, так и других электроприемников.

Пример 1.3. Рассчитать СРФ для подстанции цеха электролиза с преобразователями переменного тока в постоянный. Исходные данные: $S_k = 330 \text{ MVA}$;

$S_{II} = 26 \text{ МВА}$, число фаз 12; $U_{CT} = U_{III} = 10,5 \text{ кВ}$; дефицит реактивной мощности $Q_g = 4500 \text{ квар}$.

Сопротивление системы на сборных шинах 10 кВ :

$$X_{CV} = 0.65 \frac{U_{CT}^2}{S_K} V = 0.65 \frac{10.5^2}{330} V = 0.217V \text{ Ом.}$$

Токи гармоник вентильных преобразователей:

$$I_V = \frac{S_{II}}{\sqrt{3}U_{CT}V}, \quad I_{11} = \frac{26000}{\sqrt{3} \cdot 10.5 \cdot 11} = 130.1A,$$

$$I_{13} = 110.1A; \quad I_{23} = 62,2A; \quad I_{25} = 57,2A;$$

Фазные напряжения высших гармоник на сборных шинах:

$$U_V = I_V X_{CV}, \quad U_{11} = 130.1 \cdot 0.217 \cdot 11 = 310.55B,$$

$$U_{13} = 310,55B, \quad U_{23} = 310,55B, \quad U_{25} = 310,55B$$

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения:

$$K_U = \frac{100 \cdot \sqrt{4 \cdot 310.55^2}}{10500 / \sqrt{3}} = 10.23\% > 5\%, \text{ что значительно превышает допустимое значение, определяемое ГОСТ 13109-97.}$$

К установке примем один СРФ, настроенный на частоту 11-й гармоники. Мощность конденсаторной батареи примем равной дефициту реактивной мощности на шинах

$$Q_P = Q_g = 4500 \text{ квар}; \quad K_P = Q_P / S_K = 4,5 / 330 = 0,0130.$$

Схема соединения конденсаторов в СРФ – звезда.

Определим долю тока 11, 13, 23 и 25-й гармоник, протекающих через СРФ:

$$\sigma_{Vq} = \frac{1}{\frac{1}{K_P V_P^2 \left[1 - \left(\frac{V_P}{V_q} \right)^2 \right] + 1}}, \quad \sigma_{11} = 1;$$

$$\sigma_{13} = \frac{1}{\frac{1}{\left[\frac{1}{0.136 \cdot 11^2} \left[1 - \left(\frac{11}{13} \right)^2 \right] \right] + 1}} = 0.853;$$

$$\sigma_{23} = \frac{1}{\frac{1}{\left[\frac{1}{0.136 \cdot 11^2} \left[1 - \left(\frac{11}{23} \right)^2 \right] \right] + 1}} = 0.681;$$

$$\sigma_{25} = \frac{1}{\frac{1}{\left[\frac{1}{0.136 \cdot 11^2} \left[1 - \left(\frac{11}{25} \right)^2 \right] \right] + 1}} = 0.671;$$

Ток гармоник в цепи конденсаторной батареи:

$$I_{V\Sigma} = \sqrt{\sum_{V=11}^{25} (I_{Vq} \sigma_{Vq})^2} = \sqrt{(130.1 \cdot 1)^2 + (110.1 \cdot 0.853)^2 + (62.2 \cdot 0.681)^2 + (57.2 \cdot 0.671)^2} = 170.3A.$$

Мощность конденсаторной батареи всего СРФ:

$$Q'_P = 1.2K_C U_{HB} I_{VB} = 1.2 \cdot 3 \cdot 170.3 \cdot 6.3 = 3862 \text{ квар, что } \leq 4500 \text{ квар.}$$

Проверим конденсаторную батарею на отсутствие перегрузки по мощности и превышение напряжения с помощью неравенства:

$$\frac{U_{ш}}{K_C U_{HB}} \cdot \frac{V_P^2}{V_P^2 - 1} \leq 1; \quad \frac{10,5}{3 \cdot 6,3} \cdot \frac{11^2}{11^2 - 1} = 0,56 \leq 1,$$

что подтверждает правильность выбора по указанным параметрам.

Сопротивления конденсатора и реактора одной фазы СРФ (рисунок 1.5) равны:

$$X_K = -\frac{U_{CT}^2}{Q_P} = -\frac{10,5^2}{4,5} = -24,5 \text{ Ом.}$$

$$X_P = \frac{|X_K|}{V_P^2} = \frac{24,5}{11^2} = 0,202 \text{ Ом.}$$

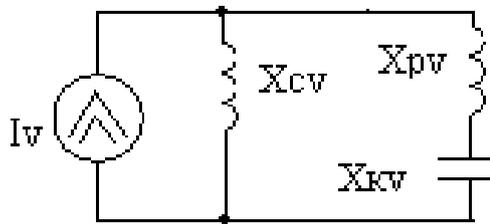


Рисунок 1.5 – Схемы замещения подключения СРФ

Напряжения высших гармоник после установки СРФ составят:

$$U_V = I_V (X_{PV} + X_{KV});$$

$$U_{11} = 130,1 \cdot (0,202 \cdot 11 - 24,5/5) = 0;$$

$$U_{13} = (110,1 \cdot 0,853) \cdot (0,202 \cdot 13 - 24,5/5) = 69,62 \text{ В};$$

$$U_{23} = 151,6 \text{ В}; \quad U_{25} = 156,2 \text{ В}.$$

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения на сборных шинах напряжением 10,5 кВ после установки СРФ составит:

$$K_U = \frac{100 \cdot \sqrt{69,62^2 + 151,6^2 + 156,2^2}}{10500/\sqrt{3}} = 3,76\% < 5\%, \text{ определяемых ГОСТ 13109-97.}$$

Таким образом, установка одного СРФ на 11-ю гармонику в данной схеме позволила снизить коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения до допустимого значения. Если бы этого не удалось достичь, то следовало бы рассмотреть дополнительную установку СРФ на 13-ю гармонику, а может быть и СРФ на 23 и 25-ю гармоники.

Примечание. Приведенная методика расчета СРФ применима только для схемы сети, от которой питаются только источники высших гармоник и нет других электроприемников (трансформаторы, двигатели и так далее). Эти электроприемники не учтены в соотношениях для определения долей тока, протекающих через СРФ.

1.2 Расчет размахов колебаний напряжения

Для определения допустимости колебаний напряжений в расчетной точке сети исходными данными являются графики резкопеременной нагрузки [7, 20, 29]. Если колебания нагрузки различны по значению, то необходимо определить эквивалентное колебание напряжения. Размах эквивалентного колебания напряжения определяют по формуле, %,

$$\delta U_{t.ЭКВ} = \frac{100\% \sqrt{\sum_{i=1}^m \delta Q_i^2 / m}}{S_K}.$$

где δQ_i - значение i -го размаха реактивной мощности, определенное по графику; m – суммарное число размахов за время расчетного цикла.

Для проверки допустимости $\delta U_{t.ЭКВ}$ вычисляют среднюю частоту колебаний по формуле $F_{CP} = m/T$ (где T – время цикла работы нагрузки по графику изменения потребляемой реактивной мощности) и анализируют в соответствии с графиком, приведенным в [3]. Данным способом определяют одиночные или эквивалентные размахи колебаний напряжения для ЭП, имеющих характерные графики электрических нагрузок, например, для прокатных станов.

Для ДСП при отсутствии графиков реактивной мощности рекомендуется определять размах эквивалентного колебания напряжения по следующим формулам [29]:

- для группы одинаковых ДСП:

$$\delta U_{t.ЭКВ} = \frac{100\% S_{ТП} \sqrt[4]{N}}{S_K},$$

- для группы печей разной мощности:

$$\delta U_{t.ЭКВ} = 100\% S_{ТПMAX} \sqrt[4]{\sum_{i=1}^n \frac{S_{ТПi}}{S_{ТПMAX}}} / S_K.$$

Размахи колебаний напряжения можно определить по известным колебаниям активной δP и реактивной δQ нагрузок и параметрам электрической сети [29,30]:

$$\delta U_t = \frac{\left[\delta P \cdot \frac{\tau_C}{X_C} + \delta Q \right]}{S_K},$$

где τ_C и X_C – активное и реактивное сопротивления между источником питания (например, энергосистемой) и точкой подключения резкопеременной нагрузки.

Зная броски тока δI резкопеременной нагрузки, можно также определить размахи колебаний напряжения:

$$\delta U_t = \sqrt{3} \delta I (\tau_C \cos \varphi + X_C \sin \varphi), \quad (1.1)$$

где φ – угол сдвига между вектором тока $\delta \underline{I}$ и вектором напряжений в общей точке.

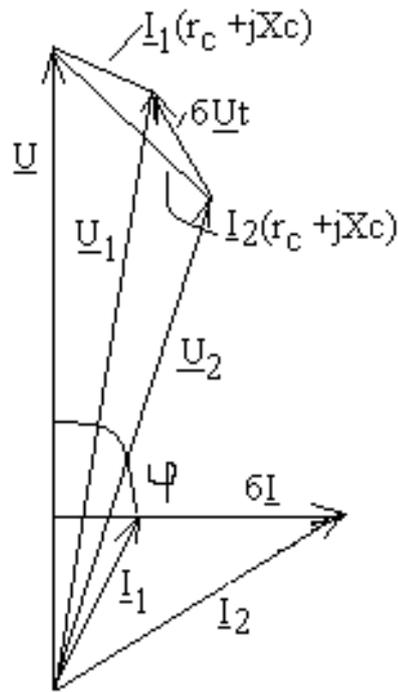


Рисунок 1.6 – Векторная диаграмма изменения напряжения

На рисунке 1.6 показана векторная диаграмма изменения напряжения «в общей точке» при изменении тока в сети: \underline{I}_1 , \underline{I}_2 – первоначальный и изменившийся токи; $\delta \underline{I}$ – приращение тока; φ - угол сдвига между напряжением \underline{U} и приращением тока $\delta \underline{I}$; \underline{U}_1 и \underline{U}_2 - напряжения при токах \underline{I}_1 и \underline{I}_2 ; $\delta \underline{U}_t$ – изменение напряжения, обусловленное броском тока $\delta \underline{I}$.

Для оценки колебаний напряжения следует исходить из предельно вероятного случая, при котором размах колебания тока ДСП равен номинальному току:

$$\delta I = I_H = \frac{S_{III}}{\sqrt{3}U_C}.$$

Учитывая, что СЭС ДСП большой и средней мощности имеют индуктивное сопротивление X_C почти на порядок больше активного η_0 , а так же, что $\varphi = 70 \dots 75^\circ$, можно принять: $\eta_0 \cos \varphi \leq X_C \sin \varphi$; то $\sin \varphi \approx 1$.

Следовательно, выражение (1.1) можно упростить: $\delta U_t = \sqrt{3} \delta I X_C$ или в относительных единицах значение размаха колебаний напряжения, %,

При частоте колебаний напряжений, определяемой работой ДСП (0,1 Гц и более), размах допустимых колебаний напряжения δU_t составляет 1 %.

Для резкопеременных нагрузок, когда технико-экономическим анализом доказана нецелесообразность схемных решений, способных снизить до необходимого уровня влияние толчковой нагрузки, рекомендуется предусматривать устройства динамической и статической компенсации реактивной мощности, в частности, статические компенсирующие устройства косвенного действия типа ТКРМ. Рассмотрим определение его основных параметров [7, 29].

При отсутствии графиков потребляемой мощности ДСП параметры СКУ рекомендуется определять:

а) для группы одинаковых ДСП установленную мощность реактора и установленную мощность конденсаторных батарей или фильтров высших гармоник соответственно определяют, *Мвар*:

$$Q_P \geq S_{ТП} \sqrt[4]{N} - \delta U_{t,ДОП} S_K / 100\% ;$$

$$Q_K \geq (S_{ТД} \sqrt[4]{N} - \delta U_{t,ДОП} S_K / 200\%) K_{CP} ,$$

где $S_{ТП}$ - номинальная мощность одного печного трансформатора, МВА; N - число одинаковых печей; $\delta U_{t,ДОП}$ - допустимые размахи колебания напряжения, %; S_K - мощность КЗ на шинах питающей сети, для которой производят расчет, МВА;

$K_{CP} = 1 - tq\varphi_{дон} / tq\varphi_{cp}$; $tq\varphi_{дон}$ - допустимое значение коэффициента реактивной мощности для питающей сети; $tq\varphi_{cp}$ - среднее значение коэффициента реактивной мощности печи;

б) для группы печей разной мощности:

$$Q_P \geq S_{ТПМАХХ} \sqrt[4]{\sum_{i=1}^n S_{ТПi} / S_{ТМАХ}} - \delta U_{t,ДОП} S_K / 100\% ;$$

$$Q_K \geq \left(S_{ТПМАХХ} \sqrt[4]{\sum_{i=1}^n S_{ТПi} / S_{ТМАХ}} - \delta U_{t,ДОП} S_K / 200\% \right) / K_{CP} .$$

Если известен график потребления реактивной мощности резкопеременной нагрузки, то мощности реактора и конденсаторной батареи или фильтров высших гармоник можно определить из соотношений:

$$Q_P \geq \Delta Q_{PH.MAX} - \delta U_{t,ДОП} S_K / 100\% ;$$

$$Q_K \geq (\Delta Q_{PH.MAX} - \delta U_{t,ДОП} S_K / 200\%) / K_{CP} ,$$

где $\Delta Q_{PH.MAX}$ - максимальный размах резкопеременной реактивной мощности по графику нагрузки, *Мвар*.

Пример 1.4. Рассчитать колебания напряжения в электрической сети напряжением 10кВ, от которой питается блюминг «1150». Мощность КЗ в питающей сети 300 МВА. График потребления блюмингом реактивной мощности за цикл длительностью $T = 34$ с дает $\sum_{i=1}^{28} \delta Q_i = 1620$ *Мвар*. Число набросов (положительных и отрицательных) реактивной мощности за один цикл составляет $m = 28$.

Величина размаха эквивалентного колебания определяется по формуле:

$$\delta U_{t,ЭА} = \frac{100\% \sqrt{\sum_{i=1}^m \delta Q_i^2 / m}}{S_K} .$$

Величина $\sum_{i=1}^{28} \delta Q_i^2 = 1620$ *Мвар*², тогда $\delta U_{t,ЭКВ} = \frac{100\% \sqrt{1620 / 28}}{300} = 2,54\%$.

Средняя частота колебаний $F = m/T = 28/34 = 0,825$ *сек*⁻¹ = 49,5 *мин*⁻¹.

По кривой допустимых значений размахов колебаний в функции частоты ПКЭ [3] находим допустимое значение размахов $\delta U_{t.ЭКВ} = 1.8\%$. Таким образом, определенные размахи колебания напряжения в электрической сети напряжением 10 кВ недопустимы.

Пример 1.5. Определить размах колебания напряжения на сборных шинах напряжением 10,5 кВ, от которых питается прокатный стан (тиристорный преобразователь). Данные схемы: мощность КЗ на стороне напряжения 10 кВ, $S_K = 4000$ МВА. Трансформатор ГПП: $S_{T.НОМ} = 40$ МВА; $\Delta P_K = 175$ кВт; $U_K = 20\%$. Кабельная линия, состоящая из двух кабелей: $l = 2,7$ км; $\eta_0 = 0,169$ Ом/км; $X_0 = 0,077$ Ом/км. Размах изменений активной мощности $\Delta P = 11,9$ МВт, реактивной $\Delta Q = 2$ Мвар.

Определим величины реактивных и активных сопротивлений по отношению к расчетной точке ($U_0 = 10,5$ кВ):

Система:

$$X_C = \frac{U_\delta^2}{S_K} = \frac{10,5^2}{4000} = 0,028 \text{ Ом.}$$

Трансформатор:

$$X_T = \frac{U_K U_\delta^2}{100\% S_{T.НОМ}} = \frac{20 \cdot (10,5 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,88}{100 \cdot 40 \cdot 10^6} = 0,551 \text{ Ом;}$$

$$\eta_T = \frac{\Delta P_K U_e^2}{S_{T.НОМ}^2} = \frac{175 \cdot 10 \cdot (10,5 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,88}{(40 \cdot 10^6)^2} = 0,012 \text{ Ом.}$$

Кабельная линия:

$$X_L = X_0 l / n = 0,077 \cdot 2,7 / 2 = 0,103 \text{ Ом;}$$

$$\eta_L = \eta_0 l / n = 0,169 \cdot 2,7 / 2 = 0,228 \text{ Ом.}$$

Суммарные сопротивления:

$$X_\Sigma = X_C + X_T + X_L = 0,028 + 0,551 + 0,103 = 0,682 \text{ Ом;}$$

$$\eta_\Sigma = \eta_T + \eta_L = 0,012 + 0,228 = 0,24 \text{ Ом.}$$

Определяем размах колебания напряжения:

$$\delta U_t = 100\% \cdot \frac{(\Delta I_a \eta_\Sigma + \Delta I_P X_\Sigma)}{U_\delta},$$

где $\Delta I_a = \frac{\Delta P}{\sqrt{3} U_\delta} = \frac{11,9 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 10^3} = 650 \text{ А;}$

$$\Delta I_P = \frac{\Delta Q}{\sqrt{3} U_\delta} = \frac{2 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 10^3} = 110 \text{ А;}$$

$$\delta U_t = 100 \cdot \sqrt{3} \frac{(650 \cdot 0,24 + 110 \cdot 0,682)}{10,5 \cdot 10^3} = 3,81\% > 1,5\%$$

Расчет показал, что размах колебания напряжения превышает допустимые значения.

Пример 1.6. Определить основные параметры СКУ косвенного действия для схемы с двумя дуговыми сталеплавильными печами (рисунок 1.7). Шинами общего питания являются сборные шины напряжением 220 кВ.

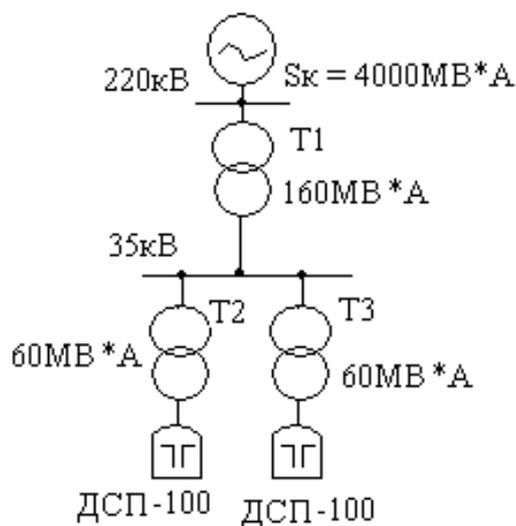


Рисунок 1.7 – Схема электроснабжения ДСП-100

Решение. Колебания напряжения на шинах напряжением 220 кВ составляют:

$$\delta U_{\text{т.э.кв}} = \frac{100\% S_{\text{III}} \sqrt[4]{N}}{S_K} = \frac{100 \cdot 60 \cdot \sqrt[4]{2}}{4000} = 1.78\%, \text{ т.е. превышает } \delta U_{\text{т.доп}} = 1\%. \text{ На этом ос-}$$

новании предполагается установить на шинах напряжением 35 кВ СКУ типа ТКРМ со следующими параметрами:

мощность регулируемого реактора

$$Q_P \geq S_{\text{III}} \sqrt[4]{N} - \delta U_{\text{т.доп}} S_K / 100\% = 60 \cdot \sqrt[4]{2} - 1 \cdot 4000 / 100 = 31.35 \text{ Мвар};$$

мощность силовых резонансных фильтров (конденсаторной батареи):

$$Q_K \geq (S_{\text{III}} \sqrt[4]{N} - \delta U_{\text{т.доп}} S_K / 200\%) K_{\text{CP}};$$

$$K_{\text{CP}} = 1 - \text{tg} \varphi_{\text{дон}} / \text{tg} \varphi_{\text{ср}} = 1 - 0,2 / 1 = 0,8$$

$$Q_K \geq (60 \cdot \sqrt[4]{2} - 1 \cdot 4000 / 200\%) \cdot 0,8 = 41,1 \text{ Мвар};$$

1.3 Расчет несимметрии напряжений

Напряжение обратной последовательности, В, в распределительной сети определяют по выражению [4, 20]:

$$U_2 = I_2 X_{\text{к.з.}},$$

где $X_{\text{к.з.}}$ - сопротивление КЗ на шинах распределительной сети, Ом; I_2 - значение тока обратной последовательности в сети, обусловленное подключением однофазной и несимметричной нагрузок, А.

В распределительных сетях, получающих питание от маломощных СЭС ($S_K \leq 200 \text{ МВА}$), при определении напряжения обратной последовательности рекомендуется использовать выражение $U_2 = I_2 X_{2\Sigma}$.

где $X_{2\Sigma}$ - эквивалентное сопротивление обратной последовательности сети, Ом.

Ток обратной последовательности I_2 , обусловленный подключением однофазных нагрузок I_{AB} и I_{BC} на линейные напряжения U_{AB} и U_{BC} , и начальную фазу этого тока ψ_{i2} рассчитывают по формулам [24]:

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{3I_{AB}^2 + (I_{AB} - 2I_{BC})^2};$$

$$\psi_{i2} = \arctg \frac{\sqrt{3}I_{AB}}{I_{AB} - 2I_{BC}} - \varphi_H,$$

где φ_H – фазный угол нагрузок.

Если известны полные мощности нагрузок S_{AB} и S_{BC} , то ток I_2 находят из выражений:

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{6U_{НОМ}} \sqrt{3S_{AB}^2 + (S_{AB} - 2S_{BC})^2};$$

$$\psi_{i2} = \arctg \frac{\sqrt{3}S_{AB}}{S_{AB} - 2S_{BC}} - \varphi_H.$$

При подключении только на одно линейное напряжение, например на U_{AB} , в формулах ток I_{BC} и мощность S_{BC} принимают равными нулю.

Комплекс полного сопротивления обратной последовательности узла СЭС ПП представляют выражением [4]:

$$Z_{2\Sigma} = \frac{U_{НОМ}^2}{\sqrt{4S_{НОМ}^2 + (S_K + 2.67S_{НОМ} - Q_K)^2}} e^{j\varphi_{2\Sigma}};$$

$$\psi_{2\Sigma} = \arctg \frac{1 + 2.67K_H - K_K}{2K_H},$$

где $S_{НОМ}$, S_K , Q_K – соответственно мощность обобщенной нагрузки, КЗ и БК; $K_H = S_{НОМ}/S_K$; $K_K = Q_K/S_K$.

Обычно для узлов нагрузки предприятий сопротивление обратной последовательности является реактивным, т.е. в выражениях за $X_{2\Sigma}$ принимают модуль сопротивления $Z_{2\Sigma}$.

Коэффициент по обратной последовательности напряжений определяют:

$$K_{2U} = 100\% U_2 / U_{НОМ} \leq 2\%.$$

1.4 Расчет параметров пуска и самозапуска электродвигателей

1.4.1 Общие положения

При коротких замыканиях в СЭС ПП или в электрических сетях энергосистемы резко понижается напряжение, при этом отключают поврежденные элементы СЭС и вновь восстанавливают ее питание благодаря действию устройств послеаварийной автоматики (АПВ, АВР) [2,7]. При этом в питании электроприемников получается перерыв или снижение напряжения на время 0,2...5 с.

При значительном снижении напряжения на зажимах электродвигателей (ЭД) и тем более при полном его отключении происходит выбег ЭД, т.е. снижение частоты его вращения. При восстановлении напряжения в сети, если ЭД не отключен выключателем, происходит его самозапуск, т.е. Восстановление частоты вращения. Во время выбега сопротивление ЭД $Z_{ДВ}$ уменьшается. Чем дольше длится бестоковая пауза, тем ближе $Z_{ДВ}$ к пусковому значению, а

ток самозапуска – к пусковому току, превышающему номинальный ток ЭД в 5...7 раз.

Групповой самозапуск, в котором участвуют несколько ЭД, приводит к возрастанию тока самозапуска в той же кратности по отношению к сумме номинальных токов двигателей всей группы. Такой большой ток создает повышенные потери напряжения в цепи источник – двигатели и вызывает пониженные напряжения в СЭС. При определенной величине снижения напряжения наступает предел, при котором самозапуск не происходит, т.к. момент вращения ЭД, пропорциональный квадрату напряжения на зажимах, становится меньше момента нагрузки на его валу, и электродвигатели затормаживаются. Это значит, что при кратковременном перерыве питания нужно оставлять включенными только выключатели наиболее ответственных ЭД. Остальные ЭД отключают и в процессе самозапуска они не участвуют.

Самозапуск ЭД можно считать успешным, если напряжение на шинах и частота вращения ЭД восстановились за время, в течение которого технологический процесс еще не нарушен и нагрев ЭД не вышел за допустимые пределы. Успешность самозапуска оценивается по минимальному допустимому напряжению в момент восстановления питания, при котором вращающий момент ЭД достаточен для самозапуска. Самозапуск асинхронного двигателя напряжением до 1 кВ при его нагрузке на 80% и более обычно бывает успешным, если перерыв питания не превышает 3 с и напряжение не снижается ниже $0,7U_{НОМ}$. При перерыве питания на время 0,5...0,7 с минимальное напряжение самозапуска может составлять $0,65U_{НОМ}$. При нагрузке асинхронного двигателя на 70% допускается минимальное напряжение $U_{MIN} = 0,6U_{НОМ}$ при перерыве до 2,5 с и $U_{MIN} = 0,55U_{НОМ}$, если перерыв питания составляет 0,5...0,7 с.

Самозапуск синхронных двигателей имеет особенности, обусловленные действием системы возбуждения. На их выбеге автоматические регуляторы и форсировка возбуждения поддерживают ток возбуждения на максимальном уровне и поэтому на выводах двигателей и на сборник шинах, к которым они подключены, долго удерживается напряжение. Это затрудняет действие АВР. Для устранения возникающей задержки применяют отключение тока возбуждения в момент резкого понижения или исчезновения напряжения в контролируемой точке. Это позволяет снизить токи пуска и ресинхронизации в процессе самозапуска синхронных двигателей. Другим способом уменьшения задержки в срабатывании АВР является применение пуска АВР от реле частоты, поскольку частота в отключенной части сети снижается быстрее, чем напряжение.

Самозапуск синхронного двигателя, как и пуск, производят в два этапа: сначала без возбуждения (как асинхронный двигатель) при замкнутой на сопротивление гашения обмотке возбуждения, затем при достижении частотой вращения подсинхронного значения включают возбуждение и происходит автоматическая самосинхронизация.

При запуске ЭД допускают следующие понижения напряжения [2, 7]:

1. На шинах питающих подстанций до 80 % номинального напряжения при питании число силовой резкопеременной нагрузки напряжением 6,10 кВ.

2. На шинах цеховых подстанций при редком пуске подключенных к ним ЭД (1 раз в смену) до 75 % номинального напряжения.

3. При питании осветительной и смешанной нагрузок до 85...90 % номинального напряжения.

1.4.2 Определение остаточного напряжения при пуске или самозапуске

Сверхпереходный ток, возникающий в момент подачи (восстановления) напряжения питания и определяющий электродинамическое воздействие на двигатель, затухает в течение 1...3 периодов промышленной частоты до значения, близкого к пусковому, и на дальнейший процесс никакого влияния не оказывает. Разгон двигателей, участвующих в пуске (самозапуске), происходит под воздействием полного электромагнитного момента, главная часть которого – асинхронный момент – зависит от квадрата напряжения [2, 31, 32]. Условием разворота ЭД в любой момент времени пуска t проверяют следующим соотношением:

$$M_n(t) \left(\frac{U_{\Delta t}}{U_{НОМ}} \right)^2 > M_c(t),$$

где $M_n(t)$ – пусковой момент; $U_{\Delta t}$ – напряжение на зажимах ЭД; $M_c(t)$ – статический момент на валу ЭД.

В связи с этим анализ процесса разгона ЭД невозможен без определения напряжения на его зажимах.

В общем случае расчет напряжения на зажимах ЭД, подключенных к той или иной точке сети, выполняют по схеме замещения, составляемой для расчета режимов КЗ или электрических расчетах сети. Как правило, активными сопротивлениями можно пренебречь и элементы СЭС (трансформаторы, реакторы, линии и т.д.) представляют своими индуктивными сопротивлениями, приведенными к базисным значениям:

- для линии: $X_L = X_0 l S_b / U_b^2$,

где X_0 – удельное реактивное сопротивление линии, Ом/км; l – длина линии, км; S_b – базисная мощность, МВА; U_b – базисное напряжение, кВ;

- для трансформаторов: $X_T = U_K S_b / 100\% S_{T.НОМ}$,

где $S_{T.НОМ}$ – номинальная мощность трансформатора, МВА;

- для реакторов: $X_P = \frac{X_{P\%} I_b U_{P.НОМ}}{100\% I_{P.НОМ} U_b^2}$,

где $X_{P\%}$ – индуктивное сопротивление, %, реактора при его номинальном токе $I_{P.НОМ}$, А; $I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} U_b}$ – базисный ток, А.

- для двигателей, участвующих в пуске: $X_D \approx Z_D = \frac{S_b U_{НОМ}^2}{S_{II} U_b^2}$, (1.2)

где S_{II} – расчетная пусковая мощность ЭД, МВА, при заданном скольжении:

$$S_{\Pi} = \frac{P_{НОМ} K_{\Pi}}{\cos \varphi_{НОМ} \eta_{НОМ}}, \quad (1.3)$$

где $P_{НОМ}$, $\cos \varphi_{НОМ}$, $\eta_{НОМ}$ - номинальные параметры ЭД; K_{Π} - кратность пускового тока ЭД при скольжении S в момент подачи (восстановления) питания.

Если в пуске участвует группа ЭД, подключенных к одной и той же секции сборных шин, то сначала по (1.3) определяют пусковую мощность S_{ni} каждого из них, а затем суммарную пусковую мощность $S_{ПЭ}$ эквивалентного двигателя (путем суммирования пусковых мощностей отдельных ЭД), по которой аналогично (1.2) определяют эквивалентное расчетное сопротивление:

$$X_{ДЭ} = \frac{S_b U_{НОМ}^2}{S_{ПЭ} U_b^2}.$$

Кроме ЭД, участвующих в пуске, к шинам может быть подключена и другая нагрузка – различные печи, трансформаторные подстанции, освещение и т.д. Эту нагрузку нужно учитывать условным понятием «пусковой нагрузки»:

$$S_{ПЭ} = \frac{P_H}{\cos \varphi_H} = \sqrt{P_H^2 + Q_H^2},$$

где P_H , Q_H - активная и реактивная нагрузки других электроприемников.

Суммарная эквивалентная пусковая нагрузка узла будет равна:

$$S_{ПЭ} = \sqrt{\left(\sum_i P_{Hi} \right)^2 + \left(\sum_j S_{Пj} + \sum_i Q_{Hi} \right)^2}.$$

Тогда эквивалентное сопротивление узла определяют выражением:

$$X_{ПЭ} = \frac{S_b U_{НОМ}^2}{S_{ПЭ} U_b^2}.$$

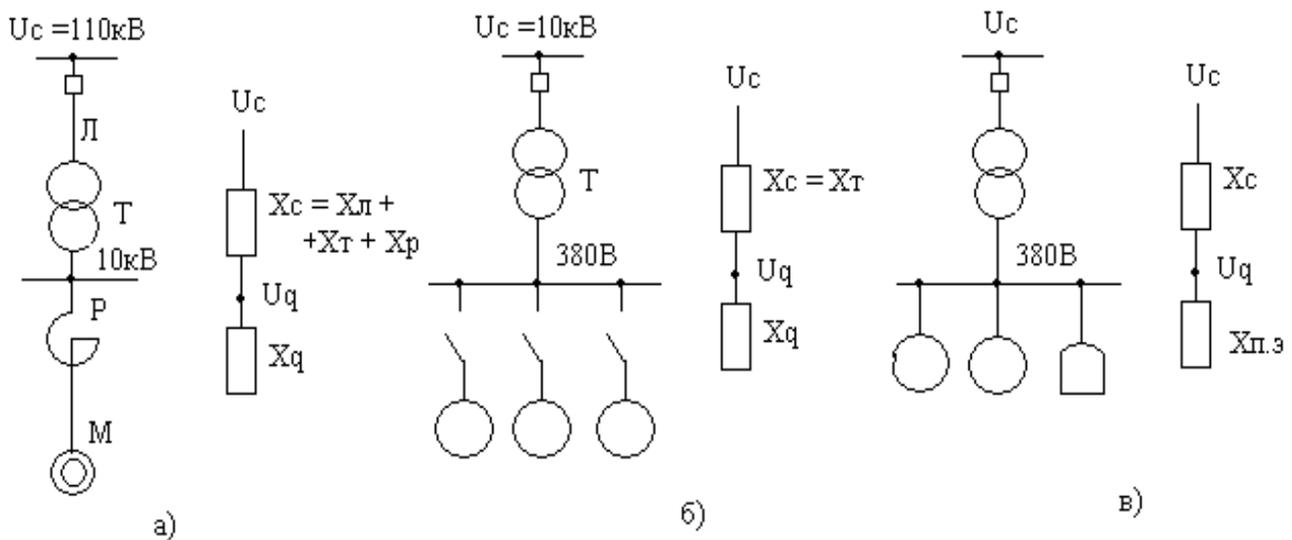
При определении суммарной реактивной нагрузки ($\sum_j Q_{Пj} + \sum_i Q_{Hi}$) необходимо учитывать знак мощности: АД, электротехнологические установки, освещение и т.д. суммируют со знаком плюс, а мощности СД, статических конденсаторов и других источников реактивной мощности суммируют со знаком минус.

Остаточное напряжение на сборных шинах, к которым подключены ЭД, определяют по одному из выражений:

$$U_{Д} = U_{С} \frac{X_{Д}}{X_{С} + X_{Д}} \quad \text{или} \quad U_{Д} = U_{С} \frac{X_{П.Э}}{X_{С} + X_{П.Э}},$$

где $U_{С}$ - напряжение питающей сети, кВ; $X_{С}$ – суммарное сопротивление питающей сети до сборных шин, к которым подключен ЭД.

На рисунке 1.8 показаны варианты преобразования схем замещения для расчета напряжения на зажимах ЭД при запуске.



- а) – одиночный запуск; б) – групповой;
 в) – групповой и наличие прочей нагрузки

Рисунок 1.8 – Варианты преобразования схем замещения для расчетов напряжения на зажимах ЭД при запуске

Очень часто в самозапуске одновременно участвуют ЭД различных ступеней СЭС. Рассмотрим этот случай на примере схемы (рисунок 1.9 а) При повреждении трансформатора Т1 отключаются выключатели Q₄ и Q₃, а все питающиеся от него потребители устройством АВР будут подключены через выключатель Q₅ к трансформатору Т2, при этом ЭД М1 и М3 кратковременно (на время действия АВР) потеряют питание и при восстановлении напряжения начнется их самозапуск. ЭД М2 и М4 по время действия АВР питание не потеряют и при запуске ЭД М1 и М3 будут представлять обычную нагрузку для СЭС. В соответствии с этим сопротивления схемы замещения (рисунок 1.9 б) будут определяться: X_{п.э.1} – с учетом пусковой мощности ЭД М1 и нагрузки М2, Н1, Н2; X_{п.э.2} – с учетом пусковой нагрузки ЭД М3 и нагрузки Н3; X_{п.э.3} – с учетом нагрузки М4 и Н4. Определение понижения напряжения нужно проводить последовательно: сначала в точке 1, а затем в точке 2. Условные пусковые нагрузки в точках 1 и 2 (рисунок 1.9 в, г) соответственно будут равны:

$$S_{пэ4} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^4 P_{Hi}\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^2 S_{Пj} + \sum_{i=1}^4 Q_{Hi}\right)^2};$$

$$S_{пэ2} = \sqrt{P_{Н.3}^2 + (S_{пэ3} + Q_{Н3})^2}.$$

Напряжение во время самозапуска ЭД М1 и М3 в точке 2 будет равно:

$$U_{c2} = U_{c1} \frac{X_{п.3.2}}{X_{c2} + X_{п.э.2}},$$

где U_{c1} - напряжение в точке 1 при пуске этих же ЭД.

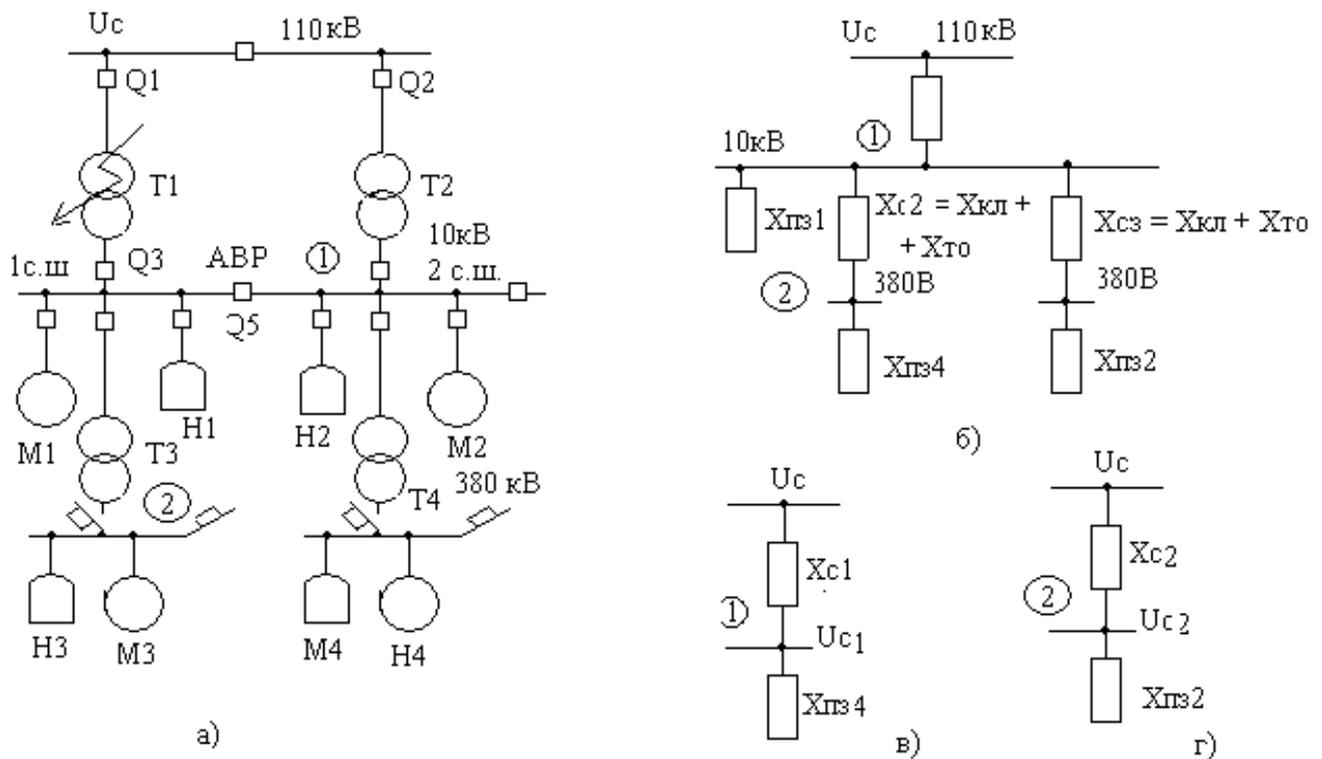


Рисунок 1.9 – Ступени СЭС и их схемы замещения

Список используемых источников

1. Железко Ю.С. Потери электроэнергии и ее качество в электрических сетях: Обзорная информация. – М.: Информэнерго, 1989. – 64 с. (сер. Электрические сети и системы. Вып. 4).
2. Овчаренко А.С., Розинский Д.И. Повышение эффективности электроснабжения промышленных предприятий.- Киев: Техника, 1989. - 287 с.
3. ГОСТ 13109-97. Качество электрической энергии. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. - М.: Издательство стандартов, 1998. - 70 с.
4. Жежеленко И.В., Рабинович М.Л., Божко В.М. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. - Киев: Техника, 1991. - 160 с.
5. Вагин В. Я. Борисов Б. П. Электромагнитная совместимость электротехнологических установок и питающих сетей // Техническая электродинамика. – 1986. – N2. – 39с.
6. Борисов Б.П., Вагин В.Я. Электроснабжение электротехнологических установок.-Киев: Наукова думка, 1985. - 244 с.
7. Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. - М.: Энергоатомиздат, 1987. -336 с.
8. Вагин Г.Я. Режимы электросварочных машин. - М.: Энергоатомиздат, 1985. – 150 с.

9. Шидловский А.К., Куренный Э.Г. Введение в статическую динамику систем электроснабжения. - Киев: Наукова думка, 1994. - 272 с.
10. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения пром-предприятий. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 160 с.
11. Аррилага Дж., Бредли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах / Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 320 с.
12. Ершов А.М. Электроприемники промышленных предприятий. - Челябинск: ЧПИ, 1990.-65 с.
13. Правила устройства электроустановок.-М.: Энергоатомиздат, 2000. - 648 с.
14. Жежеленко И.В., Шиманский О.Б. Электромагнитные помехи в системах электроснабжения промышленных предприятий. - Киев: Высшая школа, 1986. - 116 с.
15. Халилов Ф.Х. Коммутационные перенапряжения в сетях 6-10 кВ // Промышленная энергетика. – 1985. - №11. - С. 37-40.
16. Кочкин В.И., Обязуев А.П., Сальников О.Е. Тиристорные компенсаторы на основе конденсаторных батарей // Электрические станции. - 1988. - №6. - С. 56-60.
17. Железко Ю.С. Качество электроэнергии в сетях и электромагнитная совместимость электрооборудования // Электротехника. - 1989. - №7. - С. 73-77.
18. Осипов О.И., Усынин Ю.С. Промышленные помехи и способы их подавления в вентильных электроприводах постоянного тока. - М.: Энергия, 1979. - 78 с.
19. Вагин Г.Я. Состояние и перспективы развития систем электроснабжения промышленных предприятий // Промышленная энергетика. - 1989. - №11. - С. 27-31.
20. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 168 с.
21. Эффективные режимы работы электротехнологических установок / И.В.Жежеленко, В.М.Божко, Г.Я.Вагин, М.Л.Рабинович. - Киев: Техника, 1987. -183 с.
22. Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности / Под ред. Р.М.Матура; Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 156 с.
23. Статические компенсаторы реактивной мощности в электрических системах. -М.: Энергоатомиздат, 1990. - 174 с.
24. Ершов А.М., Петров О.А. Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий. – Челябинск: ЧПИ, 1989. - Ч.2. - 49с.
25. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 224 с.
26. Инструкция по эксплуатации средств защиты от перенапряжений. И. 34-70-021-85. - М.: Союзтехэнерго, 1986. - 130 с.
27. Справочник по электроснабжению и оборудованию. Т.1: Электроснабжение / Под общ. ред. А.А.Федорова. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 568 с.

28. Указания по проектированию компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий // Инструктивные материалы Главгосэнергонадзора. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 352 с.
29. Влияние дуговых сталеплавильных печей на системы электроснабжения / Под ред. М.Я.Смелянского, Р.В. Минеева. - М.: Энергия, 1995. - 184 с.
30. Голоднов Ю.М. Самозапуск электродвигателей. - М.: Энергоатомиздат, 1985. -136 с.
31. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. - М.: Энергоатомиздат, 1992. -237 с.

Копытин Игорь Иванович

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

**Методические указания
к выполнению практических занятий
и контрольных работ
для студентов очной и заочной
форм обучения специальности 140211**

Редактор Н.А. Леготина

Подписано к печати	Формат 60x84 1/16	Бумага тип. № 1
Печать трафаретная	Усл.печ.л. 2,25	Уч.-изд. л. 2,25
Заказ	Тираж 100	Цена свободная

Редакционно-издательский центр КГУ.
640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25.
Курганский государственный университет.