

**11/24/3**

Одобрено кафедрой  
«Электрификация  
и электроснабжение»

Утверждено деканом  
факультета  
«Транспортные средства»

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭНЕРГОСИСТЕМ**

Рабочая программа  
и задание на контрольную работу  
с методическими указаниями  
для студентов IV курса  
специальности

**190401 ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ЭНС)**



**Москва – 2008**

Программа составлена на основании примерной учебной программы данной дисциплины, в соответствии с государственными требованиями к минимуму содержания и уровню подготовки инженера путей сообщения по специальности 190401 Электроснабжение железных дорог (ЭНС).

С о с т а в и т е л ь — д-р техн. наук, проф. Н.П. Кириллов

Р е ц е н з е н т — канд. техн. наук, доц. А.Ф. Харченко

# РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

## 1. ЦЕЛЬ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Энергетические системы содержат теплосиловое (котлы, турбины, бойлеры и т.д.) и электротехническое (генераторы, их системы возбуждения, трансформаторы, коммутационная аппаратура и т.д.) оборудование электростанций, линии передачи электрической энергии (воздушные и кабельные), трансформаторные подстанции, тепловую автоматику и защиту, автоматические регуляторы, устройства релейной защиты и противоаварийной автоматики, средства диспетчерского и технологического управления, устройства продольной и поперечной компенсации, источники реактивной мощности: синхронные компенсаторы, конденсаторные батареи, статические тиристорные компенсаторы, поэтому их относят к сложным техническим системам. Основной особенностью сложных технических систем является непрерывная оценка их технического состояния в каждом из режимов: установившемся, аварийном и послеаварийном, поэтому основной целью изучения дисциплины является изучение переходных процессов, возникающих в каждом из указанных режимов.

Дисциплина «Теоретические основы энергосистем» базируется на знаниях, полученных студентами при изучении дисциплин: «Теоретические основы электротехники», «Электро-механика», «Электропривод», «Электроизмерения и основы метрологии», «Прикладная механика» и является основой для изучения дисциплин: «Электроснабжение электрического железнодорожного транспорта», «Релейная защита» и «Качество электрической энергии».

## 2. ТРЕБОВАНИЯ К УРОВНЮ ОСВОЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

*Изучив дисциплину, студент должен:*

2.1. **Знать и уметь использовать:** параметры режимов, систем и процессов при составлении схем замещения той или иной энергосистемы, практические критерии статической устойчивости и практические критерии динамической устойчивости энергосистем.

2.2. **Иметь опыт:** по определению параметров режима и параметров системы по заданной мощности и известной схеме, по анализу и расчету статической устойчивости типовых энергосистем.

2.3. **Иметь представление:** об оценке динамической устойчивости энергосистем с помощью метода площадей в нормальном, аварийном и послеаварийном режимах.

## 3. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ И ВИДЫ УЧЕБНОЙ РАБОТЫ

| Виды учебной работы           | Всего часов | Курс IV         |
|-------------------------------|-------------|-----------------|
| Общая трудоемкость дисциплины | 75          |                 |
| Аудиторные занятия:           |             |                 |
| лекции                        | 8           |                 |
| практические занятия          | 4           |                 |
| Самостоятельная работа        | 48          |                 |
| Контрольная работа            | 15          | 1               |
| Вид итогового контроля        |             | Зачет с оценкой |

## 4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 4.1. РАЗДЕЛЫ ДИСЦИПЛИНЫ И ВИДЫ ЗАНЯТИЙ

| Раздел дисциплины                                                               | Лекции,<br>ч | Практические<br>занятия, ч |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------|----------------------------|
| Общие вопросы устойчивости энергосистем.<br>Статическая устойчивость            | 2            |                            |
| Расчет статической устойчивости энергосистем                                    | 2            | 2                          |
| Общие вопросы устойчивости энергосистем.<br>Динамическая устойчивость           | 2            |                            |
| Расчет динамической устойчивости энергосистем                                   | 2            |                            |
| Устойчивость энергосистем при нарушении симметрии                               | —            |                            |
| Расчет переходных процессов, происходящих в энергосистемах при нарушении режима | —            | 2                          |

### 4.2. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ

#### **Раздел 1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМ. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ**

Характеристика переходных процессов, протекающих в энергосистемах. Исходное состояние энергосистемы при оценке ее статической устойчивости, угловые характеристики активной и реактивной мощности. Способы обеспечения устойчивой работы энергосистем при заданных показателях качества электроэнергии. Устойчивость сложной энергосистемы при изменении параметров режима. Практические методы определения устойчивости при пусках асинхронных двигателей [1, гл. 1, с. 7...60].

#### **Раздел 2. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМ**

Определение параметров режима и параметров системы. Характеристики нагрузки, используемые при расчете статической устойчивости. Анализ и расчет статической устойчивости типовых энергосистем. Расчет статической устойчивости типовой

системы электроснабжения переменного тока. Расчет статической устойчивости энергосистем при компенсации реактивной мощности [1, гл. 2, с. 60...101].

### **Раздел 3. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМ. ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ**

Основные понятия о динамической устойчивости энергосистем. Практический критерий динамической устойчивости и ее закон. Метод площадей при исследовании устойчивости систем электроснабжения, имеющих два генератора. Форсировка возбуждения синхронного генератора. Практические методы расчета переходных процессов при симметричных коротких замыканиях [1, гл. 3, с. 102...149].

### **Раздел 4. РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМ**

Оценка динамической устойчивости с помощью методов площадей и последовательных интервалов. Оценка устойчивости электромеханической системы [1, гл. 4, с. 150...190].

### **Раздел 5. УСТОЙЧИВОСТЬ ЭНЕРГОСИСТЕМ ПРИ НАРУШЕНИИ СИММЕТРИИ**

Основные положения исследований несимметричных переходных процессов. Применение практических методов к расчету переходного процесса при несимметричных коротких замыканиях. Комплексные схемы замещения. Сложные виды повреждений [1, гл. 5, с. 191...206].

### **Раздел 6. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОХОДЯЩИХ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ ПРИ НАРУШЕНИИ РЕЖИМА**

Расчет параметров режима энергосистемы при различных коротких замыканиях. Применение метода наложения при расчете режима энергосистемы при обрыве фазы. Расчет параметров режима энергосистемы при совместных явлениях [1, гл. 6, с. 207...234].

### 4.3. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

| Раздел дисциплины                                                               | Практическое занятие                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Расчет статической устойчивости энергосистем                                    | Расчет статической устойчивости систем электроснабжения переменного тока     |
| Расчет переходных процессов, происходящих в энергосистемах при нарушении режима | Применение метода наложения для расчета режима энергосистемы при обрыве фазы |

## 5. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

Самостоятельная работа студентов является основным способом изучения материала дисциплины, поэтому время, отводимое на самостоятельную работу, должно использоваться каждым студентом по индивидуальному плану. Для более эффективного использования времени самостоятельной работы при выполнении задания контрольной работы каждый из пунктов задания снабжен примером типового расчета. В контрольной работе осуществляется оценка параметров энергосистемы в установившемся режиме, расчет ее статической и динамической устойчивости при нарушении режима.

## 6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 6.1. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

#### *Основная*

1. Кириллов Н.П., Маркелов С.Н. Теория рабочих процессов в электроэнергетических системах. Ч. II: Уч. пос. — М.: ВА РВСН, 2001. — 236 с.

#### *Дополнительная*

2. Шелухина Т.И. Расчеты нормальных и предельных по мощности установившихся режимов сложных энергосистем: Уч. пос. — М.: МЭИ, 2005. — 52 с.

#### *Справочная*

3. Электротехнический справочник. Т. 3 / Под ред. В.Г. Герасимова. — М.: МЭИ, 2002. — 964 с. (Раздел 39, 44, 45.)

## **7. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

Специальные лаборатории.

### **ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

#### **1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ**

Целью контрольной работы является закрепление, углубление и обобщение знаний, полученных студентами во время обучения и привитие навыков применения этих знаний к комплексному решению задач по оценке статической и динамической устойчивости энергосистем железнодорожного транспорта.

Перед выполнением контрольной работы должен быть изучен необходимый теоретический материал и выяснены алгоритмы расчета соответствующих устойчивостей.

Успешному выполнению задания сопутствуют знания из курса электротехники разделов по одно- и трехфазным электрическим цепям и курса электрических машин — характеристики машин переменного тока.

Вариант заданий и рекомендации по их выбору даны в начале каждого задания, причем нумерация формул и рисунков во всех трех заданиях для удобства оставлена в соответствии с [1].

Работы, выполненные не по своему варианту, не рецензируются и не зачитываются.

#### **2. ОФОРМЛЕНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ**

Контрольную работу следует оформить в соответствии со следующими требованиями:

1. Контрольную работу выполняют в тетради. На обложке указывают название дисциплины, фамилия, имя и отчество, факультет, специальность, учебный шифр и домашний адрес студента.



2. Страницы тетради должны быть пронумерованы и на каждой из них следует сделать поля шириной 20...30 мм для замечаний рецензента.

3. Все расчеты должны сопровождаться краткими пояснениями.

4. Схемы и рисунки должны быть выполнены в соответствии с требованиями ЕСКД. Графический материал и таблицы должны иметь нумерацию и на них должны быть ссылки в тексте. Графический материал и таблицы следует приводить сразу после первой ссылки.

5. Округление результатов расчетов следует производить до 3...4 значащих цифр.

6. При пользовании готовыми данными или формулами необходимо указать источник.

7. В конце пояснительной записки необходимо поместить список используемой литературы и подпись автора с указанием даты завершения работы.

### **3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО АЛГОРИТМАМ ИССЛЕДОВАНИЯ ТИПОВЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

#### **3.1. АЛГОРИТМ АНАЛИЗА И РАСЧЕТА СИСТЕМЫ**

1. Определение вида ЭС и ее принципиальной электрической схемы.

2. Составление схемы замещения системы.

3. Выбор способа задания нагрузки.

4. Выбор критерия предельного режима.

5. Определение условия подхода к пределу и выбор определяющего параметра.

6. Расчетные соотношения условий подхода к пределу.

7. Определение максимальных значений мощности.

8. Расчет коэффициентов запаса.

9. Графическая интерпретация критерия и предела устойчивости.

## Применение алгоритма на практике (система с одним генератором)

1. Простейшая электрическая система (генератор-шины), имеющая принципиальную схему, изображенную на рис. 1.

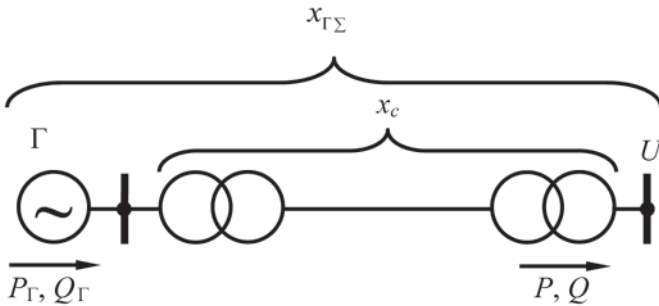


Рис. 1

2. На основании рекомендаций, изложенных в [1], схема замещения данной системы будет иметь вид, показанный на рис. 2.

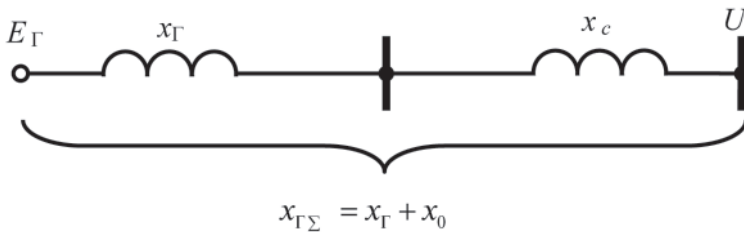


Рис. 2

3. В простейшей ЭС обычно генератор отдает мощность в систему несоизмеримо большей мощности.

4. Типовым критерием предельного режима данной системы является условие  $(dP/d\delta) = 0$ .

5. Условиями подхода к пределу при переменной ЭДС  $E_Г$  и мощности  $P = \text{var}$  при  $U = \text{const}$  является активная мощность, а определяющим параметром — угол  $\delta$  между ЭДС и напряжением  $\delta$ .

6. Значение ЭДС генератора можно найти по формуле

$$E_{\Gamma} = \sqrt{\left(U + \frac{Q x_{\Gamma\Sigma}}{U}\right)^2 + \left(\frac{P x_{\Gamma\Sigma}}{U}\right)^2}, \quad (1)$$

мощность системы уточняют по формуле

$$P = \frac{E_{\Gamma} U}{x_{\Gamma\Sigma}} \sin \delta. \quad (2)$$

7. Максимальное значение активной мощности

$$P_m = \frac{E_{\Gamma} U}{x_{\Gamma\Sigma}}. \quad (3)$$

8. Поскольку определяющим параметром системы является угол  $\delta$ , то необходимо провести расчет коэффициента запаса по мощности:

$$K_{\text{зп}} = \frac{P_m - P_0}{P_0} \cdot 100. \quad (4)$$

9. Основой графической интерпретации критерия и предела устойчивости для данной ЭС является угловая характеристика активной мощности (рис. 3).

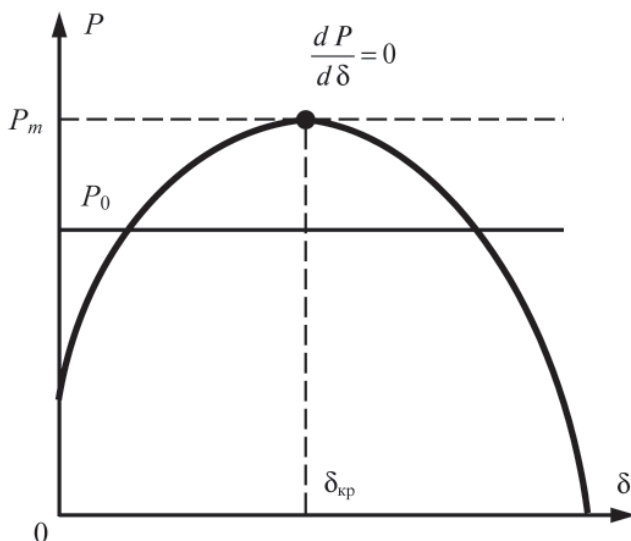


Рис. 3

## Применение алгоритма на практике (система с двумя генераторами)

1. Система содержит два генератора, соизмеримых по мощности, работающих на общую нагрузку; принципиальная схема системы показана на рис. 4.

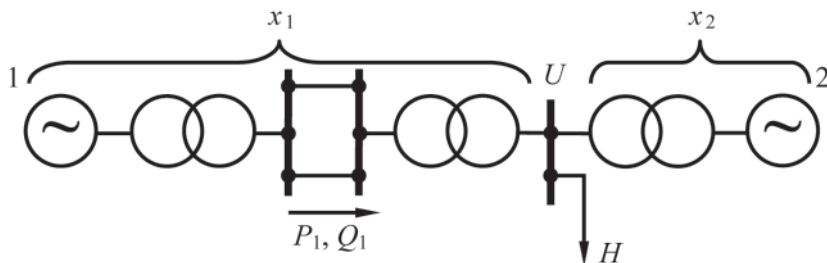


Рис. 4

2. Схема замещения рассматриваемой системы представлена на рис. 5.

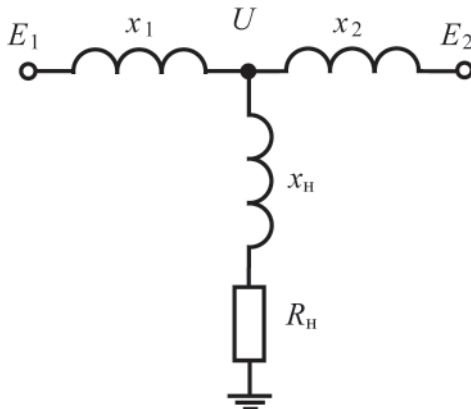


Рис. 5

3. Поскольку в данной системе общим параметром является нагрузка, то необходимо задать ее значение  $Z_H = R_H + jx_H$ .

4. Критерием предельного режима системы, имеющей два генератора, является отношение  $(dP/\delta_{12}) = 0$ .

5. Условиями подхода к пределу по параметру являются:  $E_1 = \text{const}$ ,  $E_2 = \text{const}$ ,  $U = \text{var}$ , а определяющим параметром следует считать взаимный угол  $\delta_{12}$ .

6. Активная мощность первого генератора

$$P_1 = E_1^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + E_1 E_2 y_{12} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}). \quad (5)$$

7. Максимальную мощность вычисляют по формуле

$$P_m = E_1^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + E_1 E_2 y_{12}. \quad (6)$$

8. Коэффициент запаса по мощности определяют по выражению (4).

9. Графическое представление критерия и предела устойчивости может быть осуществлено угловой характеристикой активной мощности (рис. 6).

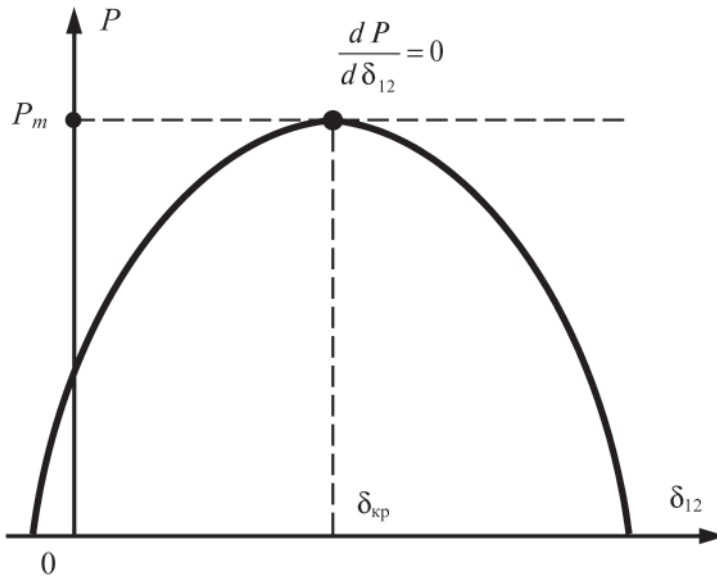


Рис. 6

## Применение алгоритма на практике (система с большим числом генераторов)

1. Электрическая система является многомашинной, имеющей узловую точку  $K$ . Принципиальная схема системы изображена на рис. 7.

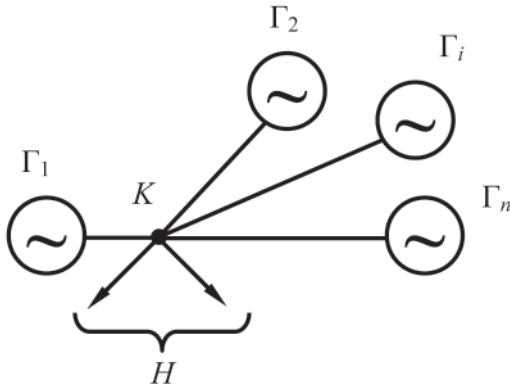


Рис. 7

2. Схема замещения многомашинной системы может быть представлена параллельной цепью индуктивных сопротивлений (рис. 8).

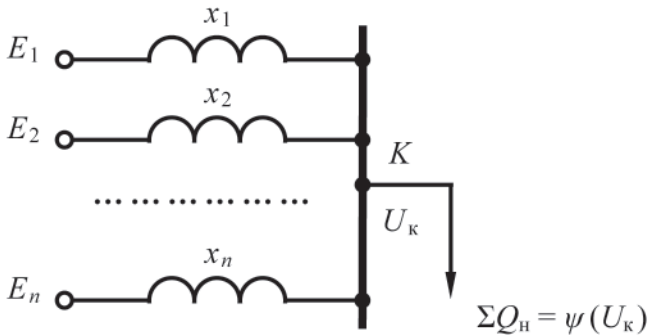


Рис. 8

3. В данном случае должны быть заданы статические характеристики комплексной нагрузки  $Q_n = \delta(U)$ .

4. Критерий предельного режима имеет вид

$$(d\Delta Q_{Гн}/dU_{к}) = 0. \quad (7)$$

5. Условиями подхода к пределу по параметру можно считать  $P = \text{const}$ ,  $E = \text{const}$  при определяющем параметре  $U_{к}$ .

6. Реактивная мощность первого генератора

$$Q_{Гi} = \frac{E_i U_{к}}{x_i} \cos \delta_i - \frac{U_{к}^2}{x_i}. \quad (8)$$

7. Суммарная реактивная мощность системы

$$\sum Q_{Г} = \sum_{i=1}^n Q_{Гi},$$

а запас реактивной мощности в системе

$$\Delta Q_{Г} = \sum Q_i - \sum Q_{н}.$$

8. Коэффициент запаса по напряжению для узла нагрузки

$$K_{3U} = \frac{U_{к0} - U_{ккр}}{U_{к0}} \cdot 100. \quad (9)$$

9. Графически критерий и предел устойчивости многоаппаратной системы может быть представлен семейством кривых, изображенных на рис. 9.

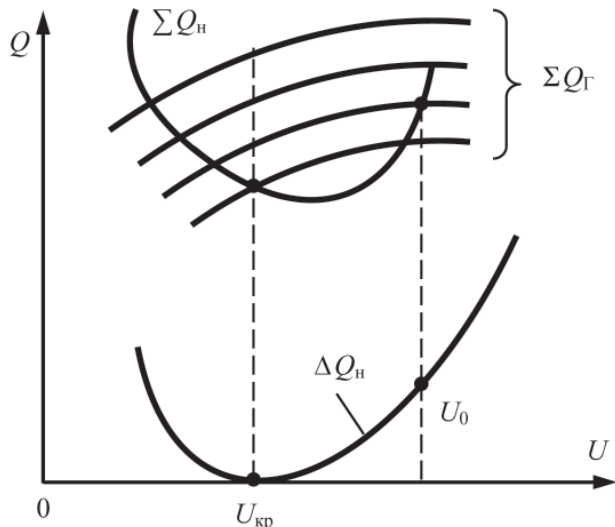


Рис. 9

## Применение алгоритма на практике (система соизмеримой мощности)

1. Электрическая система содержит станцию (эквивалентный генератор), питающую через ЛЭП нагрузку соизмеримой мощности. Принципиальная схема станции показана на рис. 10.

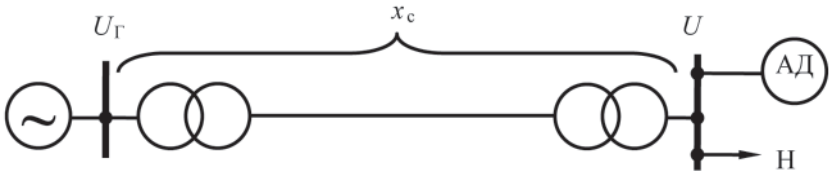


Рис. 10

2. Для данной системы возможны две схемы замещения, изображенные на рис. 11.

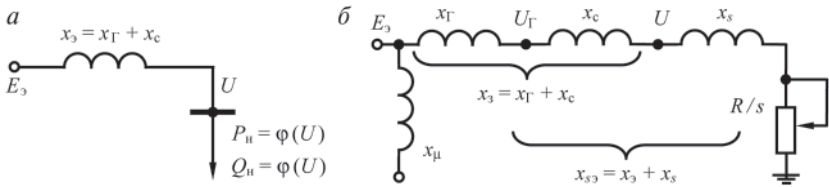


Рис. 11

3. Ввиду наличия двух схем замещения необходимы и два способа задания нагрузки для данной ЭС: для первой схемы задаются статические характеристики комплексной нагрузки  $P_H = \varphi(U)$ ,  $Q_H = \varphi(U)$ , а для второй — эквивалентный асинхронный двигатель.

4. По той же причине возможны два критерия предельного режима:

$$\text{первый} \quad - \frac{dE_3}{dU} = 0; \quad \frac{dQ}{dE_3} = -\infty;$$

$$\text{второй} \quad - \frac{dE_3}{dU} = 0; \quad \frac{dP}{dS} = 0; \quad \frac{dQ}{dE} = -\infty.$$



5. Возможны два варианта условий подхода к пределу по параметру, при этом в первом из них действуют условия  $U = \text{var}$ ,  $P_n = \text{var}$ ,  $Q_n = \text{var}$  при определяющем параметре  $U$ , а во втором возложены условия  $E_3 = \text{const}$ ,  $P = \text{var}$  (для  $dP/dS$ ) или  $P = \text{const}$  (для  $dE/dU$  и  $dQ/dU$ ) по определяющим параметрам  $U$  и  $S$ , соответственно.

6. Для обеих схем замещения необходимо рассчитать эквивалентную ЭДС

$$E_3 = \sqrt{\left(U + \frac{Q_n x_3}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_n x_3}{U}\right)^2}. \quad (10)$$

7. Для первой схемы определяют реактивную мощность генератора

$$Q_\Gamma = Q_n - \frac{P_n^2 + Q_n^2}{U^2} x_3, \quad (11)$$

а для второй схемы необходимо найти активную и реактивную мощности и критическое скольжение:  $S_{\text{кр}}$

$$P = \frac{E_3^2 R_s}{R^2 + (x_s S)^2}; \quad Q = \frac{E_3^2 x_s S^2}{R^2 + (x_s S)^2}; \quad S_{\text{кр}} = \frac{R}{x_{S_3}} \quad (12)$$

и максимальную мощность

$$P_m = \frac{E_3^2}{2x_{S_3}}. \quad (13)$$

8. Для первой схемы замещения необходим расчет коэффициентов запаса по ЭДС и напряжению

$$K_{3E} = \frac{E_3 - E_{\text{кр}}}{E_3} \cdot 100; \quad K_{3U} = \frac{U_0 - U_{\text{кр}}}{U_0} \cdot 100, \quad (14)$$

а для второй их расчет необязателен.

9. Графическое изображение критерия и предела устойчивости для первой схемы замещения представлено на рис. 12, а для второй схемы замещения — на рис. 13.

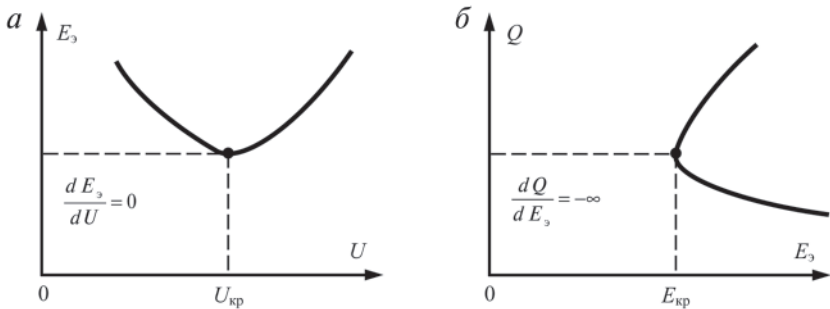


Рис. 12

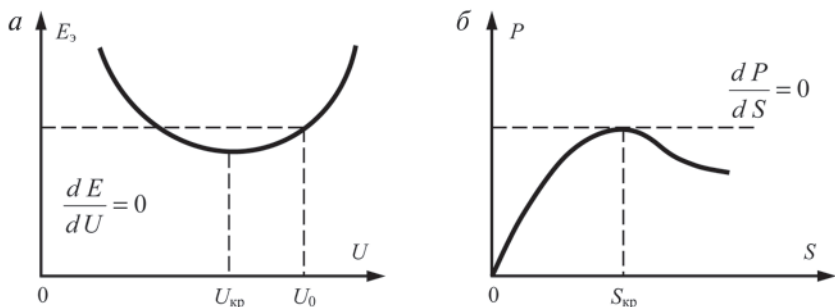


Рис. 13

**Применение алгоритма на практике (система работает на двигатель)**



$U = \text{const}$

Рис. 14

1. Система, состоящая из асинхронного двигателя, питающего от мощной сети, принципиальная схема которой показана на рис. 14.

2. Схема замещения данной системы изображена на рис. 15.

3. Нагрузка представлена в данном случае эквивалентным асинхронным двигателем.

4. Критерием предельного режима является отношение  $(dP/ds) = 0$ .

5. Условиями подхода к пределу по параметру следует считать:  $U = \text{const}$ ,  $P = \text{var}$ , при определяющем параметре —  $s$ .

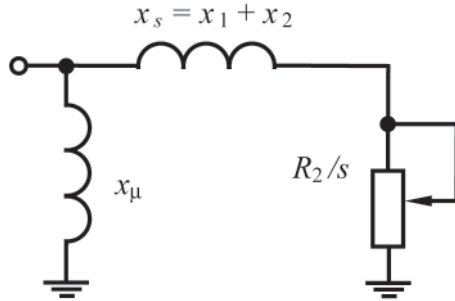


Рис. 15

6. Основными расчетными соотношениями являются:

$$\text{активная мощность } P = \frac{U^2 R_2 S}{R_2^2 + (x_s \cdot S)^2},$$

$$\text{реактивная мощность } Q = \frac{U^2 x_s \cdot S^2}{R_2^2 + (x_s \cdot S)^2}.$$

7. Максимальная мощность системы и критическое скольжение:

$$P_m = \frac{U^2}{2x_s}; \quad s_{\text{кр}} = \frac{R_2}{x_s}.$$

8. В данном случае рассчитывают коэффициенты запаса по мощности и по напряжению по формулам (4) и (14).

9. Представление критерия и предела устойчивости дано на рис. 16.

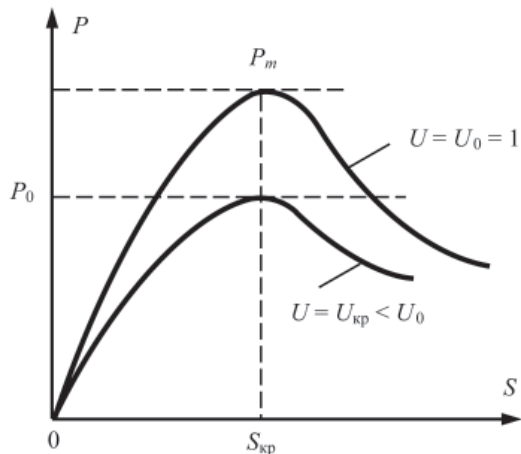


Рис. 16

## Задание № 1. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТИПОВОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### Алгоритм расчета статической устойчивости СЭС с двумя генераторами при неизменном напряжении

1. Анализ исходных данных, принципиальной схемы и схемы замещения.
2. Выбор критерия устойчивости.
3. Определение минимальных значений ЭДС и напряжения.
4. Расчет максимальной передаваемой мощности.
5. Расчет коэффициента статической устойчивости.

### Применение алгоритма на практике

1. Условие задачи. Известна структура СЭС, подобная системе, показанной на рис. 4 и ее схема замещения, изображенная на рис. 5. Известны следующие параметры схемы замещения и исходного режима:

$$\begin{aligned}x_1 = 0,735; \quad \hat{S}_1 = 1 + j0,485; \quad \underline{E}_1 = 1,54 \angle 28,5^\circ; \quad \hat{S}_H = 5,5 + j3,415; \\x_2 = 0,606; \quad \hat{S}_2 = 4,5 + j2,93; \quad \underline{E}_2 = 1,21 \angle 13,1^\circ; \quad \cos \varphi_H = 0,85; \\ \sin \varphi_H = 0,527.\end{aligned}$$

Варианты задачи:

1. С первого номера по номер 6  $x_1$  изменяется на 0,1, т.е.  
0,635; 0,535; 0,435; 0,335; 0,235 и 0,135;
2. С номера 7 по номер 11  $x_2$  изменяется на 0,1, т.е.  
0,506; 0,406; 0,306; 0,206 и 0,106;
3. С номера 12 по номер 21 в  $\hat{S}_1$  увеличивается каждое слагаемое на 0,1, т.е. у номера 12  $\hat{S}_1 = 1,1 + j0,495$ , а у номера 21 —  $\hat{S}_1 = 2,0 + j0,585$ ;
4. С номера 22 по номер 32 в  $\hat{S}_2$  увеличивается каждое слагаемое на 0,1, т.е. у номера 22  $\hat{S}_2 = 4,6 + j3,03$ , а у номера 32 —  $\hat{S}_2 = 5,6 + j4,03$ .
5. С номера 33 по номер 40 каждое слагаемое  $\hat{S}_H$  увеличивается также на 0,1, т.е. если у номера 33  $\hat{S}_H = 5,6 + j3,515$ , то у номера 40  $\hat{S}_H = 6,3 + j4,255$ .

Определить:

минимальные значения  $E_{\min}$  и  $U_{\min}$ , при которых сохраняется устойчивая работа передающей станции с мощностью  $P_1 = 1$ ;

максимальное значение передаваемой мощности  $P_m$ ;

запасы устойчивости системы при различных допущениях.

Следует считать, что оба генератора работают на шинах неизменного напряжения, к которым подсоединена нагрузка, заданная в комплексной форме, т.е.

$$U = 1 = \text{const}, \quad f = \text{const}.$$

2. Система может быть разделена на две независимые части, поэтому можно принять, что мощность первого первичного двигателя постоянна,  $P_{\text{пд}1} = \text{const}$ , тогда критерий статической устойчивости первой части системы будет равен

$$\frac{d\Delta P_1}{d\delta_1} = \frac{dP_1}{d\delta_1} = \frac{E_1 U}{x_1} \cos \delta. \quad (15)$$

3. Анализ выражения (15) показывает, что предельному по устойчивости режиму соответствует  $\delta = 90^\circ$ , минимально допустимые значения  $E$  и  $U$  при  $P_1 = P_{10} = 1$  будут равны:

$$U_{\min} = \frac{P_{10} x_1}{E_1} = \frac{1 \cdot 0,735}{1,54} = 0,477; \quad (16)$$

$$E_{\min} = \frac{P_{10} x_1}{U} = \frac{1 \cdot 0,735}{1} = 0,735.$$

4. Максимальное значение передаваемой мощности при  $E = \text{const}$ ,  $U = \text{const}$  определяют по формуле (3);  $P_m = 2,1$ .

5. Коэффициенты запаса статической устойчивости:

$$K_{3E} = \frac{E_1 - E_{1\min}}{E_1} \cdot 100\% = \frac{1,54 - 0,735}{1,54} \cdot 100\% = 52,3\%; \quad (17)$$

$$K_{3U} = \frac{U_1 - U_{\min}}{U_1} \cdot 100\% = \frac{1 - 0,477}{1} \cdot 100\% = 52,3\%,$$

а  $K_{3P} = 110\%$  в соответствии с формулой (4).

**Примечание.** Определение предельного по устойчивости режима можно выполнить и по другим критериям при других допущениях, например, возможен выбор критериев

$$\frac{dE_1}{d\delta_1} \leq 0; \quad \frac{d\delta}{dU} = \infty; \quad \frac{dU}{d\delta} = 0,$$

связь которых с основным критерием следует из рис. 17, например рассчитаем предельный по устойчивости режим с помощью критерия  $(d\Delta Q/dU) \leq 0$ . В этом случае для некоторой произвольной точки  $K$  необходимо построить зависимость  $Q_1 = f_1(U_K)$ ,  $Q_2 = f_2(U_K)$  при  $E_1 = \text{const}$ ,  $U = \text{const}$ ,  $P = P_1 = P_2 = \text{const}$ .

Точка пересечения указанных характеристик соответствует установившемуся режиму СЭС, а характер изменения реактивной мощности  $\Delta Q = Q_1 - Q_2$  в окрестности этой точки позволяет судить об устойчивости системы.

Схема замещения системы для данного случая показана на рис. 18, в соответствии с которой для определения параметров предельного режима необходимо построить семейство характеристик  $Q_1 = f(U_K)$  при различных значениях  $E_1$ .

Если использовать способ подбора, то можно найти такое значение ЭДС  $E_1$ , при котором кривая  $Q_1 = f_1(U_K)$  будет касаться кривой  $Q_2 = f_2(U_K)$ , полученное при этом значение ЭДС и будет равно  $E_{\text{мин}}$ .

Для расчета указанных мощностей можно использовать следующие формулы [6]:

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \sqrt{\left[ U_K + Q_1(x_1 - x)/U_K \right]^2 + \left[ P(x_1 - x)/U_K \right]^2}; \\ U &= \sqrt{\left( U_K - Q_2 \cdot x/U_K \right)^2 + \left( P_x/U_K \right)^2}; \\ Q_1 &= \sqrt{\left( \frac{E_1 \cdot U_K}{x_1 - x} \right)^2 - P^2} - \frac{U_K^2}{x_1 - x}; \\ Q_2 &= \frac{U_K^2}{x} - \sqrt{\left( \frac{U \cdot U_K}{x} \right)^2 - P^2}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Если точку  $K$  выбрать так, чтобы  $x = 0,2$ , то при  $P = 1$ ,  $U = 1$  находим  $x_1 - x = 0,735 - 0,2 = 0,535$ .

Результаты расчета параметров предельного режима сведены в табл. 1, а изменение реактивной мощности в системе  $\Delta Q$  показано на рис. 19.

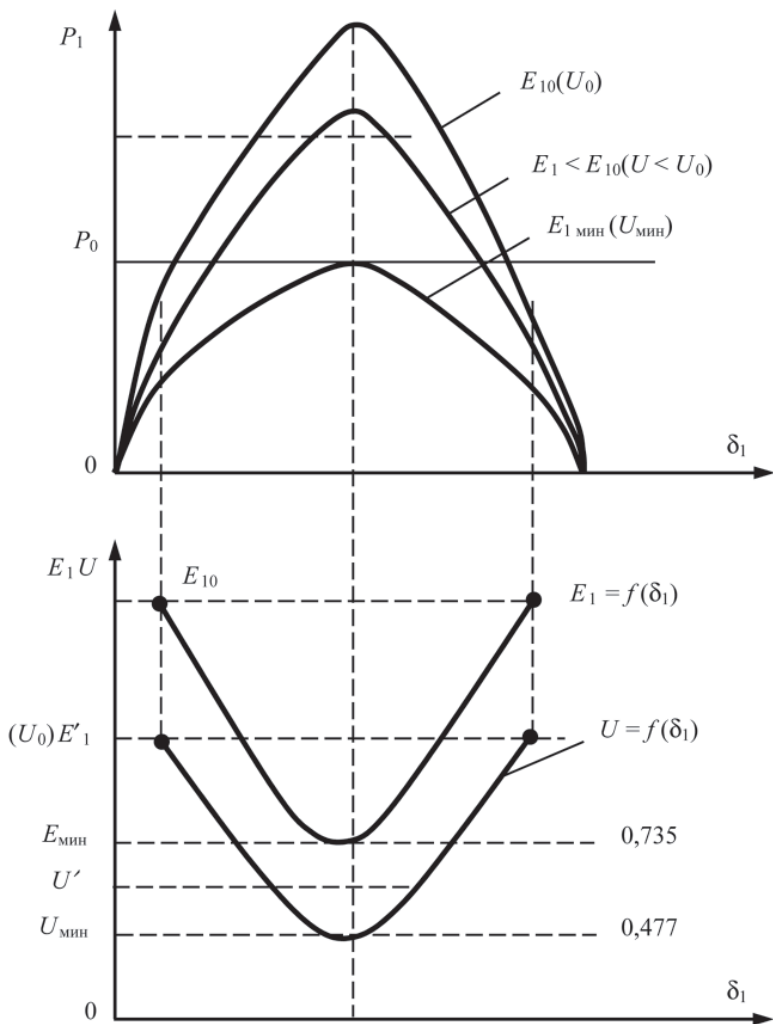


Рис. 17

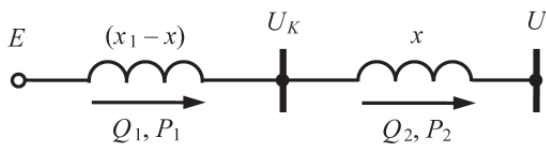


Рис. 18

Результаты расчета параметров предельного режима

| $Q_1$                   | $U_k$ |       |        |        |       |        |        |
|-------------------------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
|                         | 1,2   | 1,1   | 1,0    | 0,9    | 0,8   | 0,7    | 0,6    |
| $Q_1$ при $E_1 = 1,54$  | 0,62  | 0,74  | 0,83   | 0,875  | 0,88  | 0,835  | 0,74   |
| $Q_1$ при $E_1 = 1,0$   | -0,69 | -0,46 | -0,285 | -0,16  | -0,08 | -0,073 | -0,163 |
| $Q_1$ при $E_1 = 0,735$ | -1,38 | -1,13 | -0,928 | -0,785 | -0,74 | -0,9   | -1,05  |
| $Q_2$                   | 1,29  | 0,65  | -0,1   | -0,34  | -0,67 | -0,9   | -1,03  |

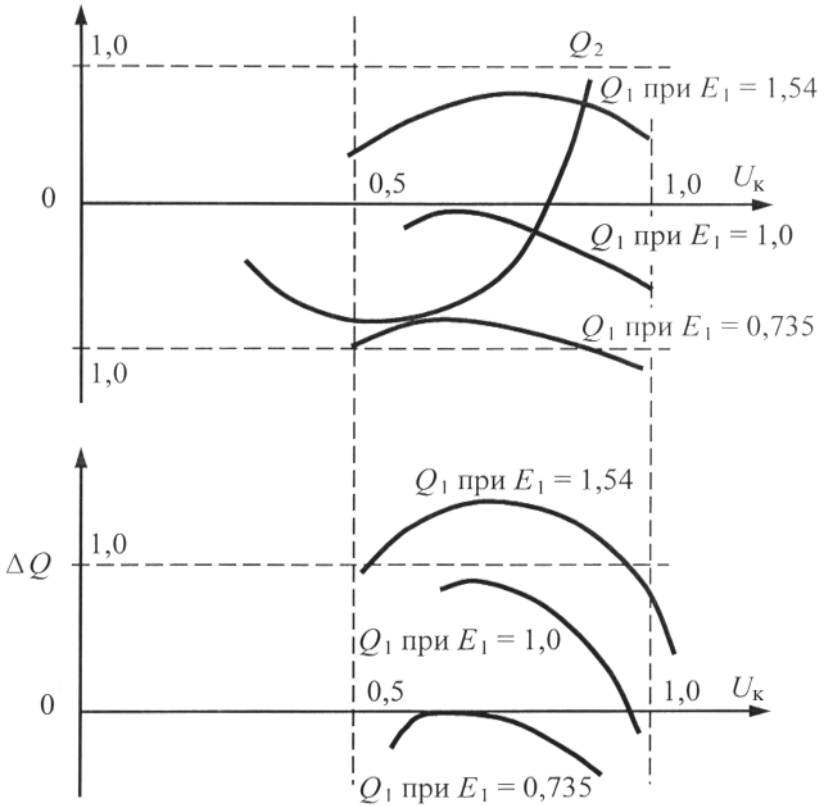


Рис. 19



## Задание № 2. РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (РАСЧЕТ МОЩНОСТЕЙ В НОРМАЛЬНОМ, АВАРИЙНОМ ПОСЛЕАВАРИЙНОМ РЕЖИМАХ)

Алгоритм расчета.

1. Перевод всех исходных данных в относительные величины.
2. Составление схемы замещения для нормального режима.
3. Расчет параметров нормального режима.
4. Составление схемы замещения для токов обратной последовательности.
5. Расчет сопротивлений для токов обратной последовательности.
6. Составление схемы замещения для токов нулевой последовательности.
7. Расчет сопротивлений для токов нулевой последовательности.
8. Составление эквивалентной схемы замещения для ЭС при двухфазном КЗ на землю.
9. Расчет параметров схемы замещения системы.
10. Составление схемы замещения для послеаварийного режима.

Расчет мощностей в нормальном, аварийном и последовательном режимах и предельного угла отключения КЗ.

### Применение алгоритма на практике

**Условие задачи.** В системе, схема которой изображена на рис. 20, происходит двухфазное КЗ на землю. Параметры исходного режима:  $P_c = 225$  МВт;  $\cos \varphi_c = 0,9$ ;  $U_c = 118$  кВ;  $U_c = \text{const}$ , нейтрали повышающего и понижающего трансформаторов глухо заземлены.

Параметры электропередачи:

генератор —  $S_{\text{НОМ}} = 400$  МВА;  $U_{\text{НОМ}} = 10,5$  кВ;  $\cos \varphi_c = 0,85$ ;  
 $x'_d = 0,235$ ;  $x_\alpha = 0,164$ ;  $T_j = 7$  с;

трансформатор  $T_1 - S_1 = 360$  МВ·А;  $e_k = 12\%$ ;  $K_1 = 10,5/248$ ;

трансформатор  $T_2 - S_{\text{НОМ}} = 340$  МВ·А;  $e_k = 12\%$ ;  $K_2 = 220/121$ ;

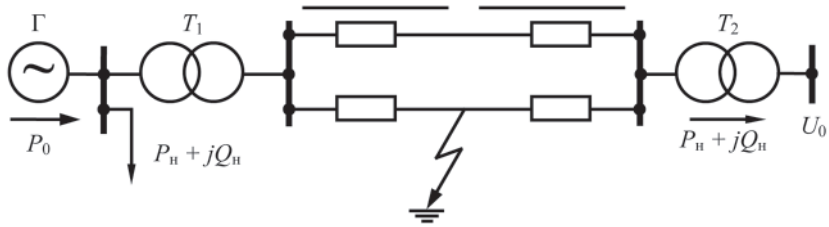


Рис. 20

ЛЭП (две цепи) —  $l = 225$  км;  $x_1 = 0,4$  Ом/км;  
 $x_0 = 3 \cdot x_1 = 1,2$  Ом/км;  
 нагрузка —  $P_n = 50$  МВт;  $\cos \varphi_n = 0,85$ .

Требуется рассчитать значения мощностей для нормального, аварийного и последовательного режимов, пренебрегая активными сопротивлениями и зарядной мощностью линий и считая, что переходная ЭДС при нагрузке режима остается неизменной.

Варианты задачи:

Изменяются только мощности генератора и трансформаторов в сторону уменьшения, причем на каждый порядковый номер по журналу приходится  $5$  МВ·А, поэтому у номера  $40$  мощность генератора будет равна  $200$  МВ·А, мощность первого трансформатора —  $160$  МВ·А, а второго трансформатора —  $140$  МВ·А.

1. Поскольку удобнее проводить расчет в относительных единицах, то за базисные величины принимают мощность и напряжение на ступени  $220$  кВ, тогда напряжение на шинах системы

$$U_c^* = (U_c / U_\delta) K_2 = (118 / 225)(220 / 121) = 1,0, \quad (19)$$

мощность, передаваемая в систему при  $\varphi_c = \arccos 0,9 = 25,8^\circ$

$$\left. \begin{aligned} P_c^* &= P_c / P_\delta = 225 / 255 = 0,882; \\ Q_c^* &= P_c^* \operatorname{tg} \varphi_c = 0,882 \cdot 0,483 = 0,427, \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

мощность, потребляемая нагрузкой при

$$\left. \begin{aligned} P_n^* &= P_n / S_\delta = 50 / 255 = 0,196; \\ Q_n^* &= P_n^* \operatorname{tg} \varphi_n = 0,196 \cdot 0,62 = 0,122. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Приведем параметры всех элементов электропередачи к базисным величинам:

$$x_d^* = x_d \frac{U_{\text{НОМ}}^2 S_{\delta}}{S_{\text{НОМ}} U_{\delta}^2} \left( \frac{1}{K_1} \right)^2 = 0,235 \frac{10,5^2 \cdot 255}{400 \cdot 215^2} = \left( \frac{248}{10,5} \right)^2; \quad (22)$$

$$x_2^* = x_2 \frac{U_{\text{НОМ}}^2 S_{\delta}}{S_{\text{НОМ}} U_{\delta}^2} \left( \frac{1}{K_1} \right)^2 = 0,164 \frac{10,5^2 \cdot 255}{400 \cdot 215^2} = 0,139;$$

$$\left. \begin{aligned} x_{T1}^* &= \frac{e_{\kappa}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{U_{\text{ВН}}^2}{U_{\delta}^2} = \frac{12}{100} \cdot \frac{255}{360} \cdot \frac{248^2}{215^2} = 0,113; \\ x_{T2}^* &= \frac{e_{\kappa}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{U_{\text{ВН}}^2}{U_{\delta}^2} = \frac{12}{100} \cdot \frac{255}{340} \cdot \frac{220^2}{215^2} = 0,094. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

$$\left. \begin{aligned} x_{\wedge}^* &= \frac{1}{2} x_1 \cdot \ell \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2} = \frac{1}{2} \cdot 0,4 \cdot 225 \cdot \frac{255}{215^2} = 0,281; \\ T_j^* &= T_j \frac{S_{\text{НОМ}}}{S_{\delta}} = 7 \cdot \frac{400}{255} = 10,98 \text{ с.} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

При дальнейших расчетах используются только приведенные величины, поэтому звездочки опускаются.

2. Схема замещения ЭС для нормального режима представлена на рис. 21, где цифры в числителе обозначают порядковые номера элементов системы.

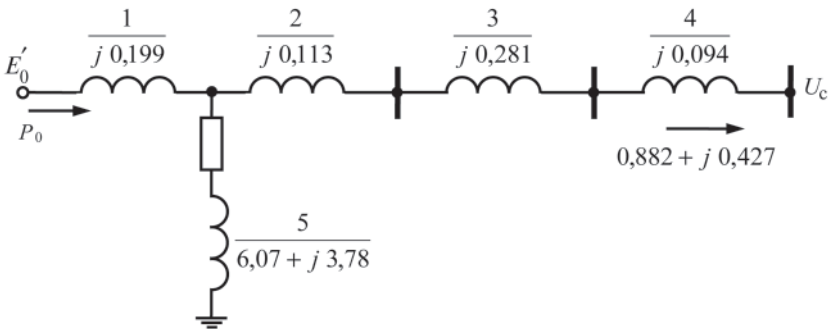


Рис. 21

3. Определяем ЭДС генератора за переходным реактивным сопротивлением, для чего находим:

суммарное сопротивление между шинами генератора и шинами бесконечной мощности

$$x_c = x_2 + x_3 = x_4 = 0,113 + 0,281 + 0,094 = 0,488, \quad (25)$$

напряжение на шинах генератора

$$U_{Г0} = \sqrt{(U_c + Q_c P_c / U_c)^2 + (P_c Q_c / U_c)^2} = \\ = \sqrt{(1 + 0,427 \cdot 0,488 / 1)^2 + (0,882 \cdot 0,488 / 1)^2} = \quad (26)$$

$$\sqrt{1,209^2 + 0,431^2} = 1,284;$$

$$\operatorname{tg} \delta_c = 0,431 / 1,209 = 0,356; \quad \delta_c = 19,6^\circ;$$

сопротивление нагрузки

$$\underline{Z}_H = (U_H^2 / S_H^2)(P_H + jQ_H) = [1,284^2 / (0,196^2 + 0,122^2)] \times \\ \times (0,196 + j0,122) = 6,07 + j3,78; \quad (27)$$

потери реактивной мощности в сети до шин генераторного напряжения

$$\Delta Q_c = [(P_c^2 + Q_c^2) x_c] / U_c^2 = \\ = [(0,882^2 + 0,427^2) \cdot 0,488] / 1^2 = 0,469; \quad (28)$$

мощность, отдаваемая генераторной станцией,

$$\hat{S}_0 = \hat{S}_H + \hat{S}_c + j \Delta Q_c = 0,196 + j0,122 + 0,882 + j0,427 + \\ + j0,469 = 1,078 + j1,018; \quad (29)$$

ЭДС за переходным реактивным сопротивлением генератора

$$E'_0 = \sqrt{\left( U_{Г0} + \frac{Q_0 x'_d}{U_{Г0}} \right)^2 + \left( \frac{P_0 x'_d}{U_{Г0}} \right)^2} = \\ \sqrt{\left( 1,284 + \frac{1,018 \cdot 0,199}{1,284} \right)^2 + \left( \frac{1,078 \cdot 0,199}{1,284} \right)^2} = \quad (30) \\ = \sqrt{1,442^2 + 0,167^2} = 1,452;$$

$\text{tg}(\delta'_0 - \delta_c) = 0,167 / 1,442 = 0,116$ ,  $\delta'_0 - \delta_c = 6,6^\circ$ , тогда угол между ЭДС  $E_0$  и напряжением  $U_c$ ,  $\delta'_0 = 19,6 + 6,6 = 26,2$ ;

собственное сопротивление схемы замещения нормального режима (рис. 23)

$$\begin{aligned} \underline{Z}'_{11} &= \underline{Z}_1 + \frac{Z_c Z_5}{Z_c + Z_5} = j0,199 + \frac{j0,488(6,07 + j3,78)}{j0,488 + 6,07 + j3,78} = \\ &= 0,027 + j0,669 = 0,670 \angle 87,7^\circ; \end{aligned} \quad (31)$$

собственная проводимость схемы замещения

$$\underline{Y}'_{11} = 1/\underline{Z}'_{11} = 1/0,67 \angle 87,7^\circ = 1,49 \angle -87,7^\circ; \quad \alpha'_{11} = 90^\circ - 87,7^\circ = 2,3^\circ;$$

взаимное сопротивление схемы замещения

$$\begin{aligned} \underline{Z}'_{12} &= \underline{Z}_1 + \underline{Z}_c + \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_c / \underline{Z}_5 = \\ &= j0,199 + j0,488 + j0,199 \cdot j0,488 / (6,07 + j3,78) = \\ &= -0,112 + j0,694 = 0,694 \angle 91^\circ; \end{aligned}$$

взаимная проводимость схемы замещения

$$\underline{Y}'_{12} = 1/\underline{Z}'_{12} = 1/0,694 \angle 91^\circ = 1,44 \angle -91^\circ; \quad \alpha'_{12} = 90^\circ - 91^\circ = -1^\circ.$$

4. Схема замещения ЭС для токов обратной последовательности в режиме двухфазного КЗ на землю отличается от схемы замещения системы в нормальном режиме включением в точку короткого замыкания аварийного шунта, сопротивление которого равно сложенным параллельно результирующим сопротивлениям (относительно точки КЗ) схем обратной и нулевой последовательностей (рис. 22).

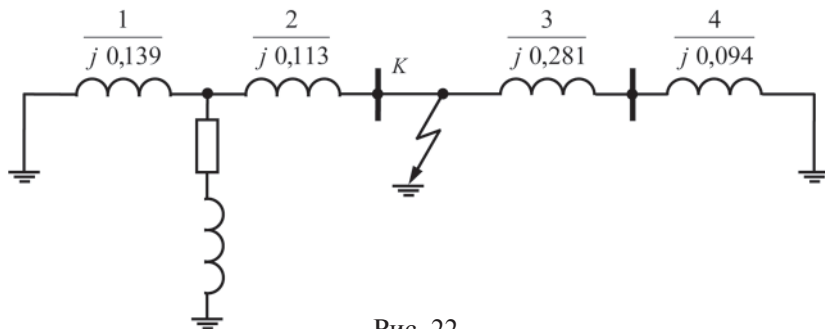


Рис. 22

Значения сопротивлений элементов схемы замещения для токов обратной последовательности указаны на рис. 22, при этом сопротивление нагрузки принято равным 0,35 от сопротивления прямой последовательности.

5. Результирующее сопротивление схемы замещения для токов обратной последовательности относительно точки  $K$ :

$$\underline{Z}_{2\Sigma} = \left[ \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_5 / (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_5) \right] / (\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4) =$$

$$= (0,006 + j0,248)j0,375 / (0,006 + j0,248 + j0,375) = 0,003 + j0,149,$$

где  $\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4 = j0,281 + j0,0094 = j0,375$ ;

$$\underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_5}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_5} = j0,113 + \frac{j0,139(2,12 + j0,132)}{j0,139 + 2,12 + 11,32} = 0,006 + j0,248.$$

6. Схема замещения ЭС для токов нулевой последовательности представлена на рис. 23.

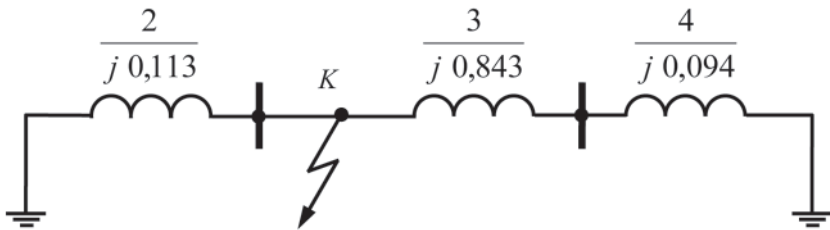


Рис. 23

7. Результирующее сопротивление схемы для токов нулевой последовательности относительно точки  $K$  (рис. 23).

$$\underline{Z}_{0\Sigma} = \underline{Z}_2 / (\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4) = j0,113 \cdot j0,937 / (j0,113 + j0,937) = j0,101,$$

где  $\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4 = j0,843 + j0,094 = j0,937$ ;

Результирующее сопротивление аварийного шунта в точке  $K$ :

$$\underline{Z}_K = \underline{Z}_6 = \frac{\underline{Z}_{2\Sigma} \underline{Z}_{0\Sigma}}{\underline{Z}_{2\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma}} = \frac{(0,003 + j0,149)j0,101}{0,003 + j0,149 + j0,101} = j0,06.$$

8. Эквивалентная схема замещения ЭС для двухфазного КЗ на землю для аварийного режима изображена на рис. 24, ее па-

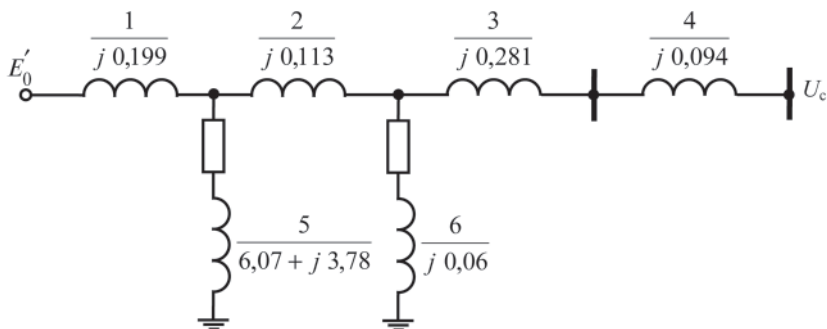


Рис. 24

раметры можно найти методами, изложенными в первой части курса.

9. Для определения собственных и взаимных проводимостей применим метод единичных токов: пусть ток через сопротивление  $Z_4$  равен единице т.е.

$$\underline{I}_4 = \underline{I}_3 = 1 + j0,$$

тогда напряжение в точке  $\delta$ ,

$$\underline{U}_\delta = \underline{I}_4 \underline{Z}_{34} = (1 + j0)j0,375 = j0,375,$$

ток, протекающий по аварийному шунту,

$$\underline{I}_6 = \underline{U}_\delta / \underline{Z}_6 = j0,375 / 0,06 = 6,25;$$

ток и падение напряжения на сопротивлении:

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_4 + \underline{I}_6 = 1 + 6,25 = 7,25; \quad \Delta \underline{U}_2 = \underline{Z}_2 \underline{I}_2 = j0,113 \cdot 7,25 = j0,819.$$

Напряжение в точке  $\alpha$ :

$$\underline{U}_\alpha = \underline{U}_\delta + \Delta \underline{U}_2 = j0,375 + j0,819 = j1,194;$$

токи в ветвях 5 и 1, соответственно

$$\underline{I}_5 = \underline{U}_\alpha / \underline{Z}_5 = j1,194 / (6,07 + j3,78) = 0,088 + j0,141;$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}_5 = 7,25 + 0,088 + j0,141 = 7,338 + j0,141,$$

тогда падение напряжения на сопротивлении ветви 1:

$$\Delta U_1 = I_1 Z_1 = (7,338 + j0,141) \cdot j0,199 = -0,028 + j1,460,$$

а ЭДС в точке подключения передающей станции:

$$E = U_\alpha + \Delta U_1 = j1,194 - 0,028 + j1,460 = -0,028 + j2,654.$$

Собственная проводимость схемы короткого замыкания относительно передающей станции  $Y_{11}''' = 1/Z_{11}'''$ ,

$$\text{где } Z_{11}''' = E/I_1 = (-0,028 + j2,654)/(7,338 + j0,141) = \\ = 0,003 + j0,362 = 0,362 \angle 89,5^\circ;$$

$$Y_{11}''' = 1/0,362 \angle 89,5 = 2,762 \angle -89,5; \quad \alpha_{11}''' = 90^\circ - 89,5^\circ = 0,5^\circ.$$

Взаимная проводимость схемы короткого замыкания

$$Y_{12}''' = 1/Z_{12}''',$$

$$\text{где } Z_{12}''' = E/I_4 = (-0,028 + j2,654)(1 + j0) = \\ = -0,028 + j2,654 = 2,654 \angle 90,6^\circ;$$

$$Y_{12}''' = 1/2,654 \angle 90,6^\circ = 0,376 \angle -90,6^\circ; \quad \alpha_{12}''' = 90^\circ - 90,6^\circ = -0,6^\circ.$$

10. Схема замещения ЭС для послеаварийного режима показана на рис. 25; при составлении ее аварийный шунт отключен, а сопротивление ЛЭП увеличено вдвое.

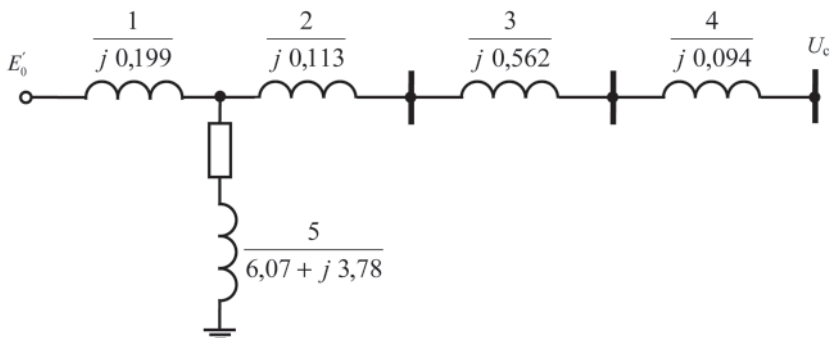


Рис. 25



Собственные и взаимные проводимости для схемы послеаварийного режима определяют так же, как и для схемы нормального режима:

$$Y_{11}'' = 1,083 \angle -86,1^\circ; \quad \alpha_{11}'' = 3,9^\circ; \quad Y_{12}'' = 1,021 \angle -91,1^\circ; \quad \alpha_{12}'' = 1,1^\circ.$$

11. Характеристики электрической мощности генераторов передающей станции для различных режимов можно определить по уравнениям:

а) нормальный режим

$$\begin{aligned} \rho^I &= E_0^{12} Y_{11}' \sin \alpha_{11}' + E_0' U_c Y_{12}' \sin(\delta' + \alpha_{12}') = 1,452^2 \cdot 1,49 \cdot \sin 2,3^\circ + \\ &+ 1,452 \cdot 1 \cdot 1,44 \sin(\alpha' - (-1^\circ)) = 0,126 + 2,09 \cdot \sin(\delta' + 1^\circ); \end{aligned} \quad (32)$$

$$P_m' = 0,126 + 2,09 = 2,216.$$

б) аварийный режим (двухфазное КЗ на землю)

$$\begin{aligned} \rho^{III} &= E_0^{12} Y_{11}''' \sin \alpha_{11}''' + E_0' U_c Y_{12}''' (\delta' - \alpha_{12}''') = 1,452 \cdot 2,162 \cdot \sin 0,5^\circ + \\ &+ 1,452 \cdot 1 \cdot 0,377 \cdot \sin(\delta' - (-0,6^\circ)) = 0,051 + 0,547 \cdot \sin(\alpha' + 0,6^\circ); \end{aligned} \quad (33)$$

$$P_m''' = 0,051 + 0,547 = 0,598.$$

в) последовательный режим

$$\begin{aligned} \rho^{II} &= E_0^{12} \cdot Y_{11}'' \cdot \sin \alpha_{11}'' + E_0' U_c \cdot Y_{12}'' \cdot \sin(\delta' - \alpha_{12}'') = 1,452^2 \cdot 1,083 \cdot \sin 3,9^\circ + \\ &+ 1,452 \cdot 1 \cdot 1,021 \cdot \sin(\delta' + 1,1^\circ) = 0,155 + 1,483 \sin(\delta'' + 1,1^\circ); \end{aligned} \quad (34)$$

$$P_m'' = 0,155 + 1,483 = 1,638.$$

Угловые характеристики генератора системы для рассмотренных режимов изображены на рис. 26, где показаны площади ускорения  $A_{\text{уск}}$  и торможения  $A_{\text{торм}}$ .

Из условия равенства названных площадок можно найти предельный угол отклонения короткого замыкания с помощью критического угла

$$\delta'_{\text{кр}} = \pi - \arcsin(P_0 / P_m'') = 180 - \arcsin(1,078 / 1,638) = 138,8^\circ, \quad (35)$$

тогда имеем

$$\cos \delta'_{\text{отк}} = \frac{[1,078(138,8 - 26,2)\pi] / 180 + 1,638 \cos 138,8^\circ - 0,598 \cos 26,2^\circ}{1,638 - 0,598} = 0,341;$$

$$\delta'_{\text{отк}} = 70^\circ.$$

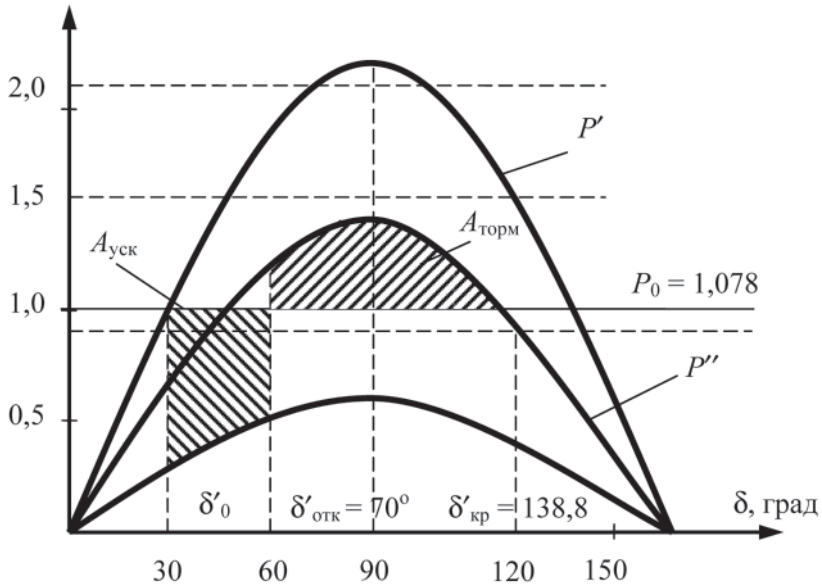


Рис. 26

### Задание № 3. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НАЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА РЕЖИМА ЭС ПРИ ОБРЫВЕ ФАЗЫ

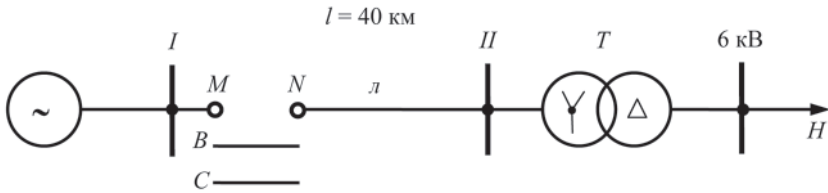
В электрической системе, схема которой показана на рис. 27 произошел обрыв фазы. Вычислить напряжения обратной и нулевой последовательности на шинах 110 кВ в момент разрыва  $A$  в начале линии  $L$  с односторонним питанием нагрузки  $H$ .

Принять модули полных сопротивлений нагрузки  $H$ , отнесенные к заданной мощности, равными  $Z_{1H\%} = 120$ ,  $Z_{2H\%} = 35$  и складывать арифметически с индуктивными составляющими сопротивлений остальных элементов схемы, т.е.  $Z_{1H}$  и  $Z_{2H}$  считать чисто индуктивными.

Исходные данные приведены на схеме; нейтраль трансформатора  $T$  заземлена.

Дать качественный анализ установленных на питающем конце линии токовых защит от межфазных коротких замыканий и от замыканий на землю.

Система 110 кВ



$$\begin{aligned}
 S_k &= 1200 \text{ МВА}; & x_{\text{луд}} &= 0,4 \text{ Ом/км}; & u_k &= 10,5\%; & S_H &= 24 \text{ МВА.} \\
 Z_{\text{IC}} &= Z_{2\text{C}}; & x_{0\text{уд}} &= 1,4 \text{ Ом/км}; & & & & 110/6,3 \text{ кВ}; \\
 Z_{\text{OC}} &= 1,4 Z_{\text{IC}}; & I_{\text{AV}}^H &= 126 \angle -32^\circ \text{ А}; & S_T &= 25 \text{ МВА}
 \end{aligned}$$

Рис. 27

Варианты задания: Мощность  $S_k$  уменьшается на 5 МВ·А при каждом номере в журнале.

1. Ввиду того, что комплекс тока нагрузки линии в полнофазном режиме, то для расчета применим метод наложения, в соответствии с которым необходимо рассмотреть два режима:

- полнофазный нагрузочный режим (до возникновения обрыва);
- дополнительный режим с разрывом фазы  $A$ , представленный комплексной схемой замещения (рис. 28), в котором в месте разрыва включен ток  $(-I''_{\text{AV}})$ , а ЭДС отсутствуют.

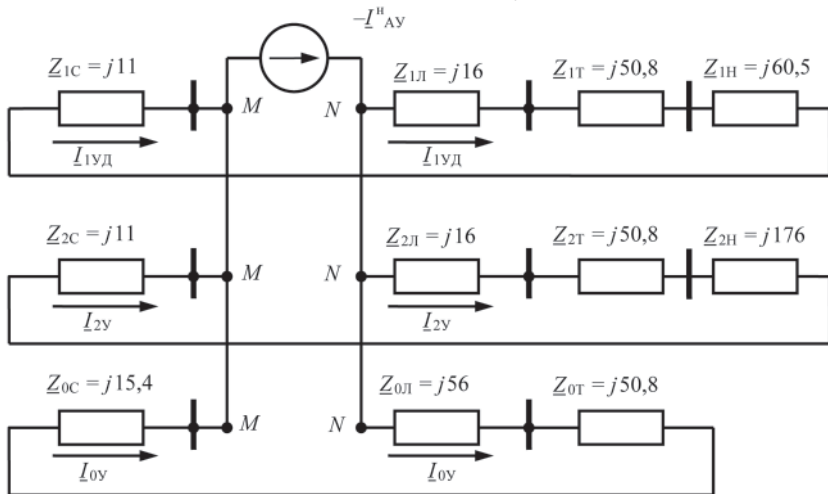


Рис. 6.28

Действительные симметричные составляющие токов определяют наложением обоих режимов, так действительный ток прямой последовательности  $I_{A1Y}$  определяют как результат сложения тока прямой последовательности дополнительного режима  $I_{A1YД}$  с током нагрузки  $I''_{AY}$  предшествующего полнофазного режима, т.е.

$$\underline{I}_{A1Y} = \underline{I}_{A1YД} + \underline{I}_{AY}''.$$

2. Рассчитаем сопротивления схемы замещения:  
сопротивление системы

$$\underline{Z}_{1C} = \underline{Z}_{2C} = jU_{cp}^2 / S_K = j115^2 / 1200 = j11 \text{ Ом},$$

где  $U_{cp}$  – расчетное напряжение;

$$\underline{Z}_{0C} = 1,4 \underline{Z}_{1C} = 1,4 \cdot j11 = j15,4 \text{ Ом},$$

сопротивления линии

$$\underline{Z}_{1Л} = \underline{Z}_{2Л} \approx jx_{1уд} l = j \cdot 0,4 \cdot 40 = j16 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{0Л} = jx_{0уд} l = j1,4 \cdot 40 = j56 \text{ Ом};$$

сопротивление трансформатора  $T$ , приведенное к его номинальным данным:

$$\underline{Z}_{0Т} \approx \underline{Z}_{1Т} = Z_{2Т} = \frac{u_k U_{ном.Т}^2}{S_{ном.Т}} = \frac{0,105 \cdot 110^2}{25} = 50,8 \text{ Ом};$$

сопротивления нагрузки, приведенные к  $U_{ном.Т}$  и заданной мощности

$$Z_{1Н} = x_{1Н} = \frac{Z_{1Н} \% \cdot U_{ном.Т}^2}{100 S_H} = \frac{120 \cdot 110^2}{100 \cdot 24} = 605 \text{ Ом};$$

$$Z_{2Н} = x_{2Н} = \frac{Z_{2Н} \% \cdot U_{ном.Т}^2}{100 S_H} = \frac{35 \cdot 110^2}{100 \cdot 24} = 176 \text{ Ом};$$

результатирующие сопротивления всех трех последовательностей схемы:

$$\left. \begin{aligned} Z_{1\Sigma} &= Z_{1C} + Z_{1Л} + Z_{1Т} + Z_{1Н} = j11 + j16 + j50,8 + j605 = j682,8 \text{ Ом}; \\ Z_{2\Sigma} &= Z_{2C} + Z_{2Л} + Z_{2Т} + Z_{2Н} = j11 + j16 + j50,8 + j176 = j253,8 \text{ Ом}; \\ Z_{0\Sigma} &= \underline{Z}_{0C} + \underline{Z}_{0Л} + \underline{Z}_{0Т} = j15,4 + j56 + j50,8 = j122,2 \text{ Ом}; \end{aligned} \right\} (36)$$

тогда значения соответствующих проводимостей

$$\underline{Y}_{1\Sigma} = 1/\underline{Z}_{1\Sigma} = 1/j682,8 = -j0,00146; \quad \underline{Y}_{2\Sigma} = 1/\underline{Z}_{2\Sigma} = 1/j253,8 = -j0,000394;$$

$$\underline{Y}_{0\Sigma} = 1/\underline{Z}_{0\Sigma} = 1/j122,2 = -j0,0082; \quad \underline{Y}_{\Sigma} = 1/\underline{Z}_{1\Sigma} + 1/\underline{Z}_{2\Sigma} + 1/\underline{Z}_{0\Sigma} = -j0,0136.$$

### 3. Расчет токов отдельных последовательностей.

В соответствии с правилом пропорций имеем

$$I_{A1уд} = -\frac{Y_{1\Sigma}}{Y_{1\Sigma} + Y_{2\Sigma} + Y_{0\Sigma}} I_{AY}^H,$$

тогда действительный ток прямой последовательности в месте разрыва:

$$\underline{I}_{A1Y} = \underline{I}_{A1уд} + \underline{I}_{AY}^H = \frac{-j(0,00394 + 0,0082)}{-j0,0136} 126 \angle -32^\circ = 112,5 \angle -32^\circ A;$$

$$\underline{I}_{A2Y} = -\frac{-j0,00394}{-j0,0136} 126 \angle -32^\circ = -36,5 \angle -32^\circ A; \quad (37)$$

$$\underline{I}_{0Y} = -\frac{-j0,0082}{-j0,0136} 126 \angle -32^\circ = -76 \angle -32^\circ A.$$

### 4. Расчет напряжений обратной и нулевой последовательности на шинах I и II.

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{A2I} &= -\underline{I}_{A2Y} Z_{2C} = -(-36,5 \angle -32^\circ) j11 = 401 \angle 58^\circ B; \\ \underline{U}_{0I} &= -\underline{I}_{0Y} Z_{0C} = -(-76 \angle -32^\circ) j15,4 = 1172 \angle 58^\circ B; \\ \underline{U}_{A2II} &= -\underline{I}_{A2Y} (\underline{Z}_{2H} + \underline{Z}_{2T}) = -36,5 \angle -32^\circ j(176 + 50,8) = 8270 \angle 58^\circ B; \\ \underline{U}_{0II} &= -\underline{I}_{0Y} Z_{0T} = -76 \angle -32^\circ j50,8 = -3860 \angle 58^\circ B. \end{aligned} \right\} (38)$$

### 5. Для анализа токовых защит от междуфазных КЗ вычислим полные токи фаз B и C:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_B &= a^2 \underline{I}_{A1Y} + a \underline{I}_{A2Y} + \underline{I}_{0Y} = 1 \angle 240^\circ \cdot 112,5 \angle -32^\circ + \\ &+ 1 \angle 120^\circ (-36,5 \angle -32^\circ) - 76 \angle -32^\circ = 172 \angle 196,5^\circ A; \\ \underline{I}_C &= a \underline{I}_{A1Y} + a^2 \underline{I}_{A2Y} + \underline{I}_{0Y} = 1 \angle 120^\circ \cdot 112,5 \angle -32^\circ + \\ &+ 1 \angle 240^\circ (-36,5 \angle -32^\circ) - 76 \angle -32^\circ = 172 \angle 99,4^\circ A. \end{aligned} \right\}$$

6. Проверка правильности расчетов, для чего определяют напряжения прямой и обратной последовательности в месте разрыва, которые должны быть равны между собой и ток фазы  $A$  в линии, который также должен быть равен нулю:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{A2Y} &= -\underline{I}_{A2Y} \underline{Z}_{2\Sigma} = -(-36,5 \angle -32^\circ) j 253,8 = 9260 \angle 58^\circ \text{ В}; \\ \underline{U}_{0Y} &= -\underline{I}_{0Y} \underline{Z}_{0\Sigma} = -(-76 \angle -32^\circ) j 122,2 = 9260 \angle 58^\circ \text{ В}; \\ \underline{I}_A &= \underline{I}_{A1Y} + \underline{I}_{A2Y} + \underline{I}_{0Y} = 112,5 \angle -32^\circ - 36,5 \angle -32^\circ - 76 \angle -32^\circ = 0. \end{aligned} \right\} (39)$$

Полученные значения подтверждают правильность и высокую точность расчетов, а из полученных результатов следует:

- при обрыве линии с односторонним питанием одной из фаз  $A$  полные токи в других фазах  $B$  и  $C$  при неизменном сопротивлении нагрузки увеличились на 36,6%;
- угол сдвига фаз между токами неповрежденных фаз уменьшился на 25%;
- в системе появляются токи и напряжения обратной и нулевой последовательности.

Теперь по данным рассмотренной системы определим токи симметричных составляющих и полный ток в линии, а также напряжения обратной и нулевой последовательностей на шинах  $II$  110 кВ приемной подстанции при обрыве фаз  $B$  и  $C$  в начале линии для случаев: нейтраль трансформатора заземлена наглухо и нейтраль трансформатора  $T$  не заземлена.

### Нейтраль трансформатора $T$ заземлена наглухо

Поскольку выше рассмотрен нормальный полнофазный режим, то вновь необходимо использовать принцип наложения двух режимов: полнофазного нагрузочного и дополнительного режима при обрыве фаз  $B$  и  $C$ , считая граничными условиями в месте обрыва фаз  $B$  и  $C$  следующие:

$$\underline{I}_{BY} = 0; \quad \underline{I}_{CY} = 0; \quad U_{AY} = 0; \quad \underline{I}_{AY} \neq 0. \quad (40)$$

Токи и напряжения (40) раскладывают на симметричные составляющие, приведенные к особой фазе  $A$ , и после некоторых преобразований получают уравнения в месте обрыва фаз:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{A1Y} = \underline{I}_{A2Y} = \underline{I}_{0Y} = \underline{I}_{A1YД} + \underline{I}_{AY}^H; \\ \underline{U}_{A1Y} = -\underline{U}_{A2Y} - \underline{U}_{0Y} = \underline{I}_{A2Y} \underline{Z}_{2\Sigma} + \underline{I}_{0Y} \underline{Z}_{0\Sigma} = -\underline{I}_{A1YД} \underline{Z}_{1\Sigma}, \end{aligned} \right\} (41)$$

где  $\underline{I}_{A1YД}$  – комплекс тока прямой последовательности в дополнительном режиме;

$\underline{I}_{AY}^H$  – ток нагрузки в нормальном однофазном режиме.

Комплексная схема замещения дополнительного режима приведена на рис. 29, где токи  $\underline{I}_{1YД}$ ,  $\underline{I}_{2Y}$  и  $\underline{I}_{0Y}$  определяют из данной схемы распределением тока ( $-\underline{I}_{AY}^H$ ) обратно пропорционально результирующему сопротивлению прямой последовательности и сумме результирующих сопротивлений обратной и нулевой последовательностей.

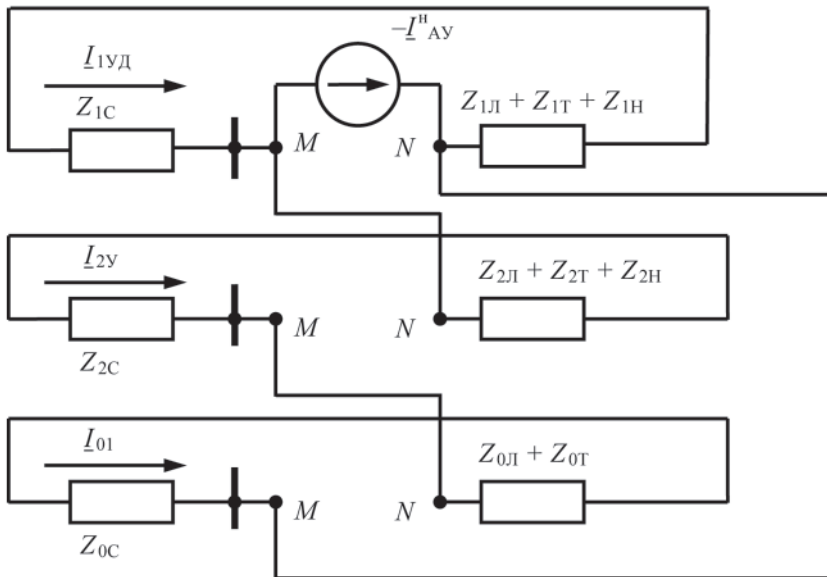


Рис. 29

Сначала выведем расчетные выражения для определения токов  $\underline{I}_{A1YД}$  и  $\underline{I}_{A1Y}$  при обрыве фаз *B* и *C*.

Из уравнений (41) имеем

$$\frac{-\underline{I}_{A1YД}}{\underline{Z}_{2\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma}} = \frac{\underline{I}_{A1Y}}{\underline{Z}_{1\Sigma}}, \quad (42)$$

что позволяет составить пропорцию

$$\frac{-\underline{I}_{A1YД}}{\underline{I}_{A1Y} - \underline{I}_{A1YД}} = \frac{\underline{Z}_{2\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma}}{\underline{Z}_{1\Sigma} + \underline{Z}_{2\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma}}, \quad (43)$$

подставляя значение  $\underline{I}_{A1Y}$  из первого уравнения (41) во второе получаем

$$\frac{-\underline{I}_{A1YД}}{\underline{I}_{AY}^H} = \frac{\underline{Z}_{2\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma}}{\underline{Z}_{1\Sigma} + \underline{Z}_{2\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma}},$$

откуда находим

$$\underline{I}_{A1YД} = -\frac{\underline{Z}_{2\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma}}{\underline{Z}_{1\Sigma} + \underline{Z}_{2\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma}} \underline{I}_{AY}^H. \quad (44)$$

Из уравнений (41) и (44) определяем также ток  $\underline{I}_{A1Y}$ :

$$\begin{aligned} \underline{I}_{A1YД} = \underline{I}_{AY}^H + \underline{I}_{A1YД} &= \underline{I}_{AY}^H - \frac{\underline{Z}_{2\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma}}{\underline{Z}_{1\Sigma} + \underline{Z}_{2\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma}} \underline{I}_{AY}^H = \\ &= \frac{\underline{Z}_{1\Sigma}}{\underline{Z}_{1\Sigma} + \underline{Z}_{2\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma}} \underline{I}_{AY}^H. \end{aligned} \quad (45)$$

Если теперь подставить известные значения сопротивлений, то получаем

$$\underline{I}_{A1Y} = \underline{I}_{A2Y} = \underline{I}_{0Y} = \frac{j682,8 \cdot 126 \angle -32^\circ}{j(682,8 + 253,8 + 122,2)} = 78,7 \angle -32^\circ \text{ A}.$$

Полный ток фазы А

$$\underline{I}_{A1Y} = 3\underline{I}_{A1Y} = 3 \cdot 78,7 \angle -32^\circ = 236 \angle -32^\circ \text{ A}.$$

Из схемы замещения дополнительного режима находят напряжения обратной и нулевой последовательности на шинах II 110 кВ приемной подстанции:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{A211} = \underline{I}_{A2Y} (\underline{Z}_{2H} + \underline{Z}_{2T}) &= 78,7 \angle -32^\circ j(176 + 50,8) = 17900 \angle 58^\circ \text{ В}; \\ \underline{U}_{011} = \underline{I}_{0Y} \underline{Z}_{0T} &= 78,7 \angle -32^\circ j50,8 = 4000 \angle 58^\circ \text{ В}. \end{aligned} \quad (46)$$



Для проверки правильности произведенных вычислений определяют ток фазы В. В месте разрыва (он должен быть равен нулю):

$$\underline{I}_{\text{BV}} = a^2 \underline{I}_{\text{A1V}} + a \underline{I}_{\text{2AV}} + \underline{I}_{\text{0V}} = 78,7 \angle -32^\circ (a^2 + a + 1) = 0.$$

Найдем напряжения всех последовательностей в месте обрыва фаз, используя выражения (41) и (44):

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{\text{A1V}} &= \underline{I}_{\text{A1UD}} \underline{Z}_{\text{1}\Sigma} = \frac{\underline{Z}_{\text{2}\Sigma} + \underline{Z}_{\text{0}\Sigma}}{\underline{Z}_{\text{1}\Sigma} + \underline{Z}_{\text{2}\Sigma} + \underline{Z}_{\text{0}\Sigma}} \cdot \underline{Z}_{\text{1}\Sigma} \underline{I}_{\text{AV}}^{\text{H}} = \\ &= \frac{j(253,8 + 122,2)}{j(682,8 + 253,8 + 122,2)} \cdot j682,8 \cdot 126 \angle -32^\circ = 29660 \angle 58^\circ \text{ В}; \\ \underline{U}_{\text{A2V}} &= -\underline{I}_{\text{A2V}} \underline{Z}_{\text{2}\Sigma} = -78,7 \angle -32^\circ \cdot j253,8 = -20\,000 \angle 58^\circ \text{ В}; \\ \underline{U}_{\text{0V}} &= -\underline{I}_{\text{0V}} \underline{Z}_{\text{0}\Sigma} = -78,7 \angle -32^\circ \cdot j122,2 = -9660 \angle 58^\circ \text{ В}. \end{aligned} \right\} (47)$$

Проведем проверку правильности вычислений напряжений по граничным условиям (40):

$$\underline{U}_{\text{AV}} = \underline{U}_{\text{A1V}} + \underline{U}_{\text{A2V}} + \underline{U}_{\text{0V}} = 29600 \angle -58^\circ - 20000 \angle 58^\circ - 9660 \angle 58^\circ \approx 0.$$

### Нейтраль трансформатора $T$ не заземлена

Сопrotивление нулевой последовательности незаземленного трансформатора равно бесконечности, и в схеме замещения нулевой последовательности (рис. 29) правая ветвь у трансформатора должна быть разомкнута.

В этом случае токи обратной и нулевой последовательности не протекают, поэтому  $\underline{I}_{\text{A2V}} = \underline{I}_{\text{0V}} = 0$ , тогда для узла  $M_1$  имеем  $\underline{I}_{\text{A1UD}}^{\text{H}} = -\underline{I}_{\text{AV}}^{\text{H}}$ , а из выражений приведенных выше, находим:

$$\underline{I}_{\text{A1V}} = \underline{I}_{\text{A1UD}} + \underline{I}_{\text{AV}}^{\text{H}} = -\underline{I}_{\text{AV}}^{\text{H}} + \underline{I}_{\text{AV}}^{\text{H}} = 0,$$

т.е. при обрыве двух фаз и при незаземленной нейтрали трансформатора  $T$  на приемной подстанции симметричные составляющие токов фазы А равны нулю, следовательно, равен нулю и полный ток фазы А.

Физически это объясняется тем, что отсутствует замкнутая электрическая цепь для протекания тока в третьей, необорванной фазе.

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Рабочая программа  
и задание на контрольную работу  
с методическими указаниями

Редактор *В.И. Чучева*  
Компьютерная верстка *О.А. Денисова*

---

|                             |                   |                              |
|-----------------------------|-------------------|------------------------------|
| Тип. зак.                   | Изд. зак. 151     | Тираж 500 экз.               |
| Подписано в печать 27.05.08 | Гарнитура NewtonС |                              |
| Усл. печ. л. 2,75           |                   | Формат 60×90 <sub>1/16</sub> |

---

Издательский центр и Участок оперативной печати  
Информационно-методического управления РГОТУПСа,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2