

**Министерство образования Республики Беларусь**

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

**Кафедра «Электроснабжение»**

**А. А. Капанский**

# **ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ**

**ПРАКТИКУМ**

**по одноименной дисциплине  
для студентов специальности 1-43 01 03  
«Электроснабжение (по отраслям)»  
дневной и заочной форм обучения**

**Гомель 2019**

УДК 621.311.018.782.3(075.8)  
ББК 31.27-016.4я73  
К20

*Рекомендовано научно-методическим советом  
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 5 от 30.01.2019 г.)*

Рецензент: доц. каф. «Информационные технологии» ГГТУ им. П. О. Сухого  
канд. техн. наук, доц. *В. И. Токочаков*

**Капанский, А. А.**  
К20 Электромеханические переходные процессы : практикум по одноим. дисциплине для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» днев. и заоч. форм обучения / А. А. Капанский. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – 164 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Рассмотрены примеры расчета задач статической и динамической устойчивости синхронного генератора, комплексной нагрузки, определения времени пуска и выбега двигателей, а также мероприятия по повышению устойчивости.

Для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.311.018.782.3(075.8)  
ББК 31.27-016.4я73

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

Практическая работа № 1: Составление схемы замещения. Определение параметров элементов расчетной схемы. Точное и приближенное приведение сопротивлений схемы замещения в именованных единицах.....	5
Практическая работа № 2: Точное и приближенное приведение сопротивлений схемы замещения в относительных единицах.....	15
Практическая работа № 3: Угловые характеристики мощности синхронных генераторов без АРВ. Расчет предельной мощности и запаса статической устойчивости. Построение векторных диаграмм .....	21
Практическая работа № 4: Угловые характеристики мощности синхронных генераторов с АРВ. Влияние АРВ на статическую устойчивость. Расчет предельной мощности и запаса статической устойчивости. Построение векторных диаграмм.....	29
Практическая работа № 5: Характеристика мощности генератора при сложной связи синхронной машины с энергосистемой. Собственные и взаимные проводимости. Расчет предельной мощности и запаса статической устойчивости генераторов при включении комплексной нагрузки.....	41
Практическая работа № 6: Расчет предельной мощности и запаса статической устойчивости генераторов при включении поперечного чисто реактивного сопротивления (шунтирующего реактора, конденсаторной батареи).....	54
Практическая работа № 7: Расчет устойчивости комплексной нагрузки по практическим критериям.....	61
Практическая работа № 8: Расчет динамической устойчивости электрической системы методом площадей. Определение предельного угла отключения короткого замыкания ..	68
Практическая работа № 9: Построение угловых характеристик мощности простейшей системы в нормальном, аварийном и послеаварийном режимах для анализа динамической устойчивости при симметричном и несимметричном КЗ. Расчет сопротивления аварийного шунта КЗ.....	79

Практическая работа № 10: Определение предельного времени отключения КЗ. Решение уравнения относительно движения ротора генератора методом последовательных интервалов.....	91
Практическая работа № 11: Расчет самозапуска в узле нагрузки с асинхронными двигателями .....	98
Практическая работа № 12: Расчет пуска в узле нагрузки с асинхронными двигателями. Выбор группового реактора для снижения уровней пусковых токов.....	111
Практическая работа № 13: Расчет времени выбега и пуска асинхронного двигателя .....	122
Практическая работа № 14: Расчет критического напряжения опрокидывания асинхронных двигателей.....	130
Практическая работа № 15: Набросы нагрузки на электрические двигатели .....	136
Практическая работа № 16: Мероприятия по повешению устойчивости энергосистемы .....	145
Литература.....	149
Приложение.....	151

## Практическая работа № 1:

**Составление схемы замещения. Определение параметров элементов расчетной схемы. Точное и приближенное приведение сопротивлений схемы замещения в именованных единицах**

### Краткие теоретические сведения

При решении задач устойчивости электроэнергетических систем (ЭЭС) для расчетной схемы (рис. 1.1) составляется схема замещения, в которую все элементы входят своими эквивалентными сопротивлениями, а источники питания эквивалентными ЭДС (рис. 1.2).

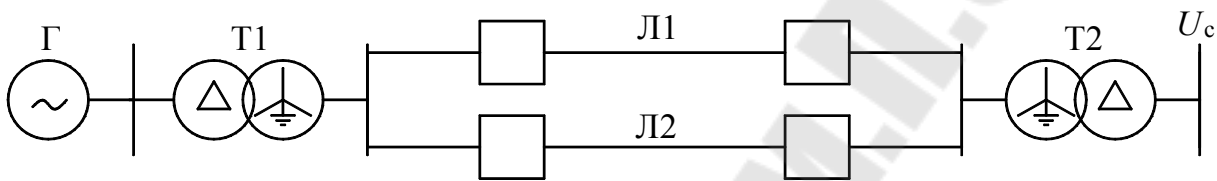


Рисунок 1.1 – Расчетная схема электрической системы

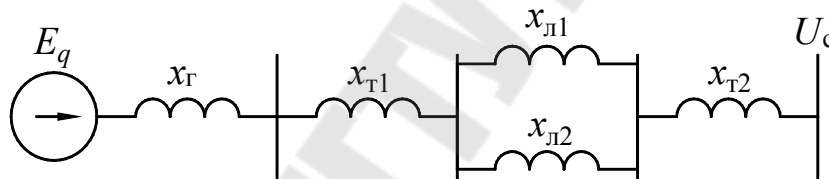


Рисунок 1.2 – Схема замещения электрической системы

К элементам ЭЭС, сопротивления которых учитываются при расчетах задач устойчивости, относятся: генераторы, синхронные и асинхронные двигатели, силовые трансформаторы, воздушные и кабельные линии, реакторы и нагрузки.

**Синхронные машины (генераторы, синхронные компенсаторы, двигатели).** Сопротивление генератора в именованных единицах определяется по формуле:

$$x_{\Gamma} = x_{*d} \cdot \frac{U_{\text{н}}^2}{S_{\text{н}}}, \text{ Ом}, \quad (1.1)$$

где  $x_{*d}$  – индуктивное сопротивление генератора по продольной оси, о.е.;  $S_{\text{н}}$  – полная номинальная мощность, МВА;  $U_{\text{н}}$  – номинальное напряжение, кВ.

**Линии электропередачи.** Для воздушных и кабельных линий из цветных металлов активное сопротивление проще всего определить по справочным данным. Линии электропередачи в схемах замещения представляются полным сопротивлением  $z_{л}$ . При расчетах устойчивости для линий электропередач длиной до 300 км и напряжением до 330 кВ активную и емкостную проводимость не учитывают.

Сопротивление линии в именованных единицах определяется по формуле:

$$z_{л} = (r_0 + jx_0) \cdot l, \text{ Ом}, \quad (1.2)$$

где  $r_0$  – удельное активное сопротивление линии, Ом/км;  $x_0$  – удельное реактивное сопротивление линии, Ом/км;  $l$  – длина линии, км.

При оценочных расчетах линию можно представить только индуктивным сопротивлением:

$$x_{л} = x_0 \cdot l, \text{ Ом}. \quad (1.3)$$

Расчетные сопротивления кабелей рекомендуется определять по формуле [1]:

$$R = K_v \cdot C_c \cdot \rho \cdot l / S, \text{ Ом}, \quad (1.4)$$

где  $K_v$  – коэффициент увеличения сопротивления с повышением температуры, для медного проводника при температуре 20 °С  $K_v = 1,041$ , для алюминиевого –  $K_v = 1,044$ ;  $C_c = 1,02$  – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления многопроволочных жил проводов и кабелей за счет повила;  $\rho$  – удельное сопротивление при  $t = 20$  °С, для меди  $\rho = 0,0178$  Ом·мм<sup>2</sup>/м, для алюминия  $\rho = 0,0294$  Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $l$  – длина кабеля, м;  $S$  – площадь поперечного сечения кабеля, мм<sup>2</sup>.

**Трансформаторы и автотрансформаторы.** Двухобмоточные трансформаторы в схемах замещения представляются индуктивным сопротивлением  $x_{т}$ . Сопротивление двухобмоточного трансформатора в именованных единицах определяется по формуле [1]:

$$x_T = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H}, \text{ Ом}, \quad (1.5)$$

где  $S_H$  – номинальная мощность трансформатора, МВА;  $U_K$  – напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

Схема замещения трехобмоточного трансформатора и автотрансформатора представляет собой трехлучевую звезду. Сопротивления трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора в именованных единицах для стороны высокого, среднего и низкого определяются по формулам [1]:

$$x_{T.В} = \frac{U_{K.В}}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H}, \text{ Ом}; \quad x_{T.С} = \frac{U_{K.С}}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H}, \text{ Ом}; \quad x_{T.Н} = \frac{U_{K.Н}}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H}, \text{ Ом}. \quad (1.6)$$

В отличие от двухобмоточного трансформатора у трехобмоточного трансформатора напряжения нормируются и определяются для каждой пары его обмоток. Определение напряжения короткого замыкания на соответствующей стороне напряжения трансформатора осуществляется по формуле [1]:

$$U_{KB} = 0,5 \cdot (U_{K.В-Н} + U_{K.В-С} - U_{K.Н-С}), \text{ \%}; \quad (1.7)$$

$$U_{КС} = 0,5 \cdot (U_{K.В-С} + U_{K.Н-С} - U_{K.В-Н}), \text{ \%}; \quad (1.8)$$

$$U_{КН} = 0,5 \cdot (U_{K.Н-С} + U_{K.В-Н} - U_{K.В-С}), \text{ \%}, \quad (1.9)$$

где  $U_{K.В-С}$  – напряжение короткого замыкания трансформатора между обмотками высшего и среднего напряжения, %;  $U_{K.В-Н}$  – напряжение короткого замыкания трансформатора между обмотками высшего и низшего напряжения, %;  $U_{K.Н-С}$  – напряжение короткого замыкания трансформатора между обмотками среднего и низшего напряжения, %.

**Токоограничивающие и шунтирующие реакторы.** Токоограничивающие и шунтирующие реакторы в схемах замещения представляются индуктивным сопротивлением  $x_p$ . Индуктивное сопротивление одинарного реактора определяется по формуле [1]:

$$x_p = \frac{x_{p\%}}{100} \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot I_H} \cdot 10^3, \text{ Ом}, \quad (1.10)$$

где  $x_{p\%}$  – номинальное индуктивное сопротивление, %;  $U_H$  – номинальное напряжение, кВ;  $I_H$  – номинальный ток, А.

**Электрическая система** характеризуется параметрами: мощностью трехфазного КЗ  $S_{кз}$ , МВ·А; активным и реактивным сопротивлениями  $R_c$ ,  $X_c$ .

Сопротивление системы конечной мощности определяется по ее току КЗ [1]:

$$z_c = \frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot I''_{кз}}, \text{ Ом}, \quad (1.11)$$

где  $U_c$  – линейное напряжение системы, кВ,  $I''_{кз}$  – ток короткого замыкания на шинах системы, кА.

В ряде случаев задается мощность трехфазного КЗ, равная  $S_{кз} = \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I''_{кз}$ , МВ·А, тогда сопротивление системы в именованных единицах определяется по формуле [1]:

$$z_c = \frac{U_c^2}{S_{кз}}, \text{ Ом}. \quad (1.12)$$

**Асинхронные двигатели.** При расчете пуска асинхронного двигателя его сопротивление определяется по формуле [1]:

$$x_{ад} = \frac{1}{K_{п}} \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot I_H}, \text{ Ом}, \quad (1.13)$$

где  $K_{п}$  – кратность пускового тока двигателя, о.е;  $U_H$  – номинальное напряжение двигателя, кВ;  $I_H$  – номинальный ток двигателя, кА:



$$I_{\text{н}} = \frac{S_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н}}}, \text{ А}, \quad (1.14)$$

где  $S_{\text{н}}$  – номинальная полная мощность двигателя, кВА, определяется по формуле:

$$S_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\cos \varphi_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{н}}}, \text{ кВА}, \quad (1.15)$$

где  $P_{\text{н}}$  – номинальная активная мощность двигателя, кВт;  $\cos \varphi_{\text{н}}$  – номинальный коэффициент мощности двигателя, о.е.;  $\eta_{\text{н}}$  – номинальный КПД двигателя, о.е.

**Нагрузка** – это потребители электрической энергии, преобразующие ее в другие виды (тепловую, механическую, световую и т.д.). Обычно в расчетах рассматриваются не отдельные потребители, а ее узлы – группы нагрузок, присоединенных к шинам подстанции.

Представление нагрузки в расчетах переходных процессов в схемах электроснабжения определяется целью расчета и его точности. Нагрузку можно представить в виде постоянных активного и индуктивного сопротивлений в упрощенных расчетах статической и динамической устойчивости при условии сохранения устойчивости самой нагрузки [2]. Величины параллельно соединенных активного и реактивного сопротивления вычисляются по мощности и напряжению исходного режима :

$$r_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{P_{\text{н}}}, \text{ Ом}; \quad x_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{Q_{\text{н}}}, \text{ Ом}. \quad (1.16)$$

Полное сопротивление нагрузки для последовательно соединенных активного и реактивного сопротивлений определяется по формуле:

$$z_{\text{н}} = r_{\text{н}} + jx_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{S_{\text{н}}} (\cos \varphi_{\text{н}} + j \sin \varphi_{\text{н}}), \text{ Ом}. \quad (1.17)$$

Расчетные формулы для определения реактивных сопротивлений ЭЭС в именованных единицах приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

**Формулы для определения реактивных сопротивлений ЭЭС в именованных единицах**

Наименование элементов СЭС	Реактивные сопротивления элементов	
	Входные параметры и единицы измерения	Именованные единицы
Синхронный генератор (двигатель, компенсатор)	$x_{*d}$ [о.е.]; $U_H$ [кВ]; $S_H$ [МВА]	$x_T = \frac{x_{*d} U_H^2}{S_H}$
Двухобмоточный трансформатор	$U_K$ [%]; $U_H$ [кВ]; $S_H$ [МВА]	$x_T = \frac{U_K \% U_H^2}{100 S_H}$
Трехобмоточный трансформатор и автотрансформатор	$U_{К.В}$ [%]; $U_{К.С}$ [%]; $U_{К.Н}$ [%]; $U_H$ [кВ]; $S_H$ [МВА];	$x_T^B = \frac{U_{К.В}}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$ $x_T^C = \frac{U_{К.С}}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$ $x_T^H = \frac{U_{К.Н}}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$
Воздушная ЛЭП	$x_0$ [Ом/км]; $l$ [км]	$x_{л} = x_0 l$
Токоограничивающий реактор	$x_p$ [%]; $U_H$ [кВ]; $I_H$ [кА]	$x_p = \frac{x_p \% U_H}{100 \sqrt{3} I_H}$
Асинхронный двигатель	$K_{п}$ [о.е.]; $U_H$ [кВ]; $I_H$ [кА]	$x_{ад} = \frac{1}{K_{п}} \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3} I_H}$
Нагрузка	$S_H$ [МВА]; $P_H$ [МВт]; $Q_H$ [МВАр]; $U_H$ [кВ];	$z_H = \frac{U_H^2}{S_H}$ ; $x_H = \frac{U_H^2}{Q_H}$ ; $r_H = \frac{U_H^2}{P_H}$

**Точное и приближенное приведение сопротивлений элементов схем в именованных единицах**

Если расчетная схема содержит несколько магнитосвязанных цепей (элементов схемы, связанных между собой трансформаторами) (рис. 1.1), то сопротивления всех элементов цепи должны быть приведены к напряжению одной из ступеней. Электрические величины  $E$ ,  $U$ ,  $I$ ,  $Z$  могут быть приведены к выбранной ступени (например, к ши-

нам системы  $U_c$ ) по формулам [1]:

$$\overset{\circ}{E} = (K_1 \times K_2 \times \dots \times K_n) \cdot E; \quad (1.18)$$

$$\overset{\circ}{U} = (K_1 \times K_2 \times \dots \times K_n) \cdot U; \quad (1.19)$$

$$\overset{\circ}{I} = I / (K_1 \times K_2 \times \dots \times K_n); \quad (1.20)$$

$$\overset{\circ}{Z} = (K_1 \times K_2 \times \dots \times K_n)^2 \cdot Z, \quad (1.21)$$

где  $K_1, K_2 \dots K_n$  – коэффициенты трансформации, через которые величины  $E, U, I, Z$  связаны с выбранной ступенью.

Под коэффициентом трансформации каждого трансформатора или автотрансформатора (как повышающего, так и понижающего) понимается отношение междуфазного напряжения холостого хода его обмотки, обращенной в сторону основной ступени напряжения, к аналогичному напряжению его другой обмотки, находящейся ближе к ступени, элементы которой подлежат приведению.

Точным приведением к базисным условиям называется такое приведение, где коэффициенты трансформации трансформаторов определяются по действительным напряжениям на их выводах.

В практических расчетах часто выполняют приближенное приведение, позволяющее значительно быстрее и проще получить приближенную схему замещения.

Сущность приближенного приведения заключается в следующем. Для каждой ступени трансформации устанавливают среднее напряжение  $U_{cp}$ , а именно: 770; 340; 230; 115; 37; 10,5; 6,3; 0,69; 0,4; 0,23 кВ и при этом условно принимают, что номинальные напряжения всех элементов, находящихся на одной ступени, одинаковы и равны соответствующим значениям по указанной шкале. Тогда коэффициент трансформации каждого трансформатора равен отношению средних номинальных напряжений  $U_{cp}$  тех ступеней, которые он связывает. Результирующий коэффициент трансформации каскада трансформаторов будет определяться как отношение  $U_{cp}$  крайних ступеней. Следовательно, при приближенном приведении в именованных единицах выражения для пересчета принимают более простой вид:

$$\overset{\circ}{E}_{\sigma} = E \cdot \frac{U_{\text{cp}(\sigma)}}{U_{\text{cp}}}; \quad \overset{\circ}{U}_{\sigma} = \frac{U_{\text{cp}(\sigma)}}{U_{\text{cp}}}; \quad \overset{\circ}{I}_{\sigma} = I \cdot \frac{U_{\text{cp}(\sigma)}}{U_{\text{cp}}}; \quad \overset{\circ}{Z}_{\sigma} = \left[ \frac{U_{\text{cp}(\sigma)}}{U_{\text{cp}}} \right]^2 \cdot Z, \quad (1.22)$$

где  $U_{\text{cp}}$  – среднее номинальное напряжение ступени, с которой производится пересчет;  $U_{\text{cp}(\sigma)}$  – то же выбранной основной ступени.

### Пример 1.1

Определить сопротивления элементов ЭЭС (рис. 1.1), входящих в схему замещения, приведя их к напряжению системы в именованных единицах при точном приведении.

Исходные данные:

- генератор:  $P_{\text{H}}=100$  МВт;  $\cos\varphi_{\text{H}}=0,8$ ;  $U_{\text{H}}=10,5$  кВ;  $x'_{*d}=0,278$ ;
- трансформатор Т1:  $S_{\text{H}}=160$  МВА;  $U_{\text{H}}=11/242$  кВ;  $U_{\text{K}}=11$  %;
- линия:  $x_0 = 0,4$  Ом/км;  $L = 300$  км;
- трансформатор Т2:  $S_{\text{H}}=200$  МВА;  $U_{\text{H}}=230/121$  кВ;  $U_{\text{K}}=11$  %.

### Решение

Составляем схему замещения (рис. 1.2), где в качестве основной ступени принимаем напряжение на шинах системы равное 110 кВ.

Определяем реактивное сопротивление генератора, приведенное к шинам системы:

$$\begin{aligned} x_{\text{Г}} &= \frac{x'_{*d} \cdot U_{\text{H}}^2}{S_{\text{H}}} \cdot K_{\text{T2}}^2 \cdot K_{\text{T1}}^2 = \frac{x'_{*d} \cdot U_{\text{H}}^2}{P_{\text{H}} / \cos\varphi_{\text{H}}} \cdot \left( \frac{U_4}{U_3} \right)^2 \cdot \left( \frac{U_2}{U_1} \right)^2 = \\ &= \frac{0,278 \cdot 10,5^2}{100 / 0,8} \cdot \left( \frac{121}{230} \right)^2 \cdot \left( \frac{242}{11} \right)^2 = 32,85 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Определяем реактивное сопротивление трансформатора Т1, приведенное к шинам системы:

$$\begin{aligned} x_{\text{T1}} &= \frac{U_{\text{K}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{H}}^2}{S_{\text{H}}} \cdot K_{\text{T2}}^2 = \frac{U_{\text{K}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{H}}^2}{S_{\text{H}}} \cdot \left( \frac{U_4}{U_3} \right)^2 = \frac{11}{100} \cdot \frac{242^2}{160} \cdot \left( \frac{121}{230} \right)^2 = \\ &= 11,14 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Определяем эквивалентное реактивное сопротивление двухцепной линии, приведенное к шинам системы:

$$x_{л} = 0,5 \cdot x_0 \cdot l \cdot K_{T2}^2 = 0,5 \cdot x_0 \cdot l \cdot \left( \frac{U_4}{U_3} \right)^2 = 0,5 \cdot 0,4 \cdot 300 \cdot \left( \frac{121}{230} \right)^2 = 16,6 \text{ Ом.}$$

Определяем реактивное сопротивление трансформатора Т1, приведенное к шинам системы 110 кВ:

$$x_{T2} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} = \frac{11}{100} \cdot \frac{121^2}{200} = 8,05 \text{ Ом.}$$

Сопротивление передающей сети в нормальном режиме, приведенное к шинам системы:

$$x_{\Sigma 1} = x_T + x_{T1} + x_{л} + x_{T2} = 32,85 + 11,14 + 16,6 + 8,05 = 68,6 \text{ Ом.}$$

### Пример 1.2

Определить сопротивления элементов ЭЭС (рис. 1.1), входящих в схему замещения, приведя их к базисным условиям в именованных единицах при приближенном приведении. Сравнить результаты расчетов точного и приближенного приведения. Исходные данные приведены в примере 1.1.

### Решение

Принимаем средние напряжения на каждой ступени трансформации:  $U_1 = 10,5 \text{ кВ}$ ;  $U_2 = 230 \text{ кВ}$ ;  $U_3 = 230 \text{ кВ}$ ;  $U_4 = 115 \text{ кВ}$ .

Определяем реактивное сопротивление генератора, приведенное к шинам системы 110 кВ:

$$x_{Г} = \frac{x'_{*d} \cdot U_H^2}{S_H} \cdot \left( \frac{U_4}{U_1} \right)^2 = \frac{0,278 \cdot 10,5^2}{100 / 0,8} \cdot \left( \frac{115}{10,5} \right)^2 = 29,41 \text{ Ом.}$$

Определяем реактивное сопротивление трансформатора Т1, приведенное к шинам системы:

$$x_{T1} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot \left( \frac{U_4}{U_2} \right)^2 = \frac{11}{100} \cdot \frac{230^2}{160} \cdot \left( \frac{115}{230} \right)^2 = 9,09 \text{ Ом.}$$

Определяем эквивалентное реактивное сопротивление двухцепной линии, приведенное к шинам системы:

$$x_{л} = 0,5 \cdot x_0 \cdot l \cdot \left( \frac{U_4}{U_3} \right)^2 = 0,5 \cdot 0,4 \cdot 300 \cdot \left( \frac{115}{230} \right)^2 = 15 \text{ Ом.}$$

Определяем реактивное сопротивление трансформатора Т2, приведенное к шинам системы:

$$x_{т2} = \frac{U_{к}}{100} \cdot \frac{U_{н}^2}{S_{н}} = \frac{U_{к}}{100} \cdot \frac{U_{н}^2}{S_{н}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{115^2}{200} = 7,27 \text{ Ом.}$$

Сопротивление передающей сети в нормальном режиме:

$$x_{\Sigma 2} = x_{г} + x_{т1} + x_{л} + x_{т2} = 29,41 + 9,09 + 15 + 7,27 = 60,8 \text{ Ом.}$$

Погрешность расчета суммарного сопротивления сети при использовании приближенного метода расчета по сравнению с точным методом составит:

$$\delta_{x_{\Sigma}} = \frac{x_{\Sigma 1} - x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 1}} \cdot 100\% = \frac{68,6 - 60,8}{68,6} \cdot 100\% = 11,4 \text{ \%}.$$

## **Практическая часть**

### **Задача 1.3**

Определить сопротивления элементов электрической сети (рисунк 1.1), входящих в схему замещения, приведя их к базисным условиям в именованных единицах при точном и приближенном приведении. Оценить погрешность использования приближенного метода расчета по сравнению с точным.

Параметры элементов электрической сети и базовые ступени приведения сопротивлений схемы принять в соответствии с вариантом задания. Исходные данные к задаче приведены в приложение П 1, П 2.

**Практическая работа № 2:**  
**Точное и приближенное приведение сопротивлений схемы**  
**замещения в относительных единицах**

**Краткие теоретические сведения**

Относительные единицы широко используются в расчетах устойчивости ЭЭС, так как позволяют значительно упростить математические выкладки и придают им более общий характер. Под относительным, безразмерным значением какой-либо величины следует понимать ее отношение к другой одноименной величине, выбранной за единицу измерения (базис). Как правило, в задачах статической и динамической устойчивости в качестве базиса выступают напряжение на шинах приемной системы  $U_c$  и активная мощность перетока в энергосистему  $P_c$ . Базисные величины связаны между собой следующими соотношениями:

$$S_6 = \sqrt{3} U_6 I_6; Z_6 = U_6 / \sqrt{3} I_6 = U_6^2 / S_6, \quad (2.1)$$

где  $S_6, U_6, I_6, Z_6$  – базисная мощность, напряжение, ток и сопротивление.

Как видно, из четырех базисных единиц  $S_6, U_6, I_6$  и  $Z_6$  две могут быть выбраны произвольно, а две другие получаются из соотношений (2.1).

При выбранных базисных условиях относительные значения ЭДС, напряжений, токов, мощностей и сопротивлений определяются по формулам:

$$E_{*(6)} = \frac{E}{U_6}; U_{*(6)} = \frac{U}{U_6}; I_{*(6)} = \frac{I}{I_6}; S_{*(6)} = \frac{S}{S_6}; Z_{*(6)} = \frac{Z}{Z_6}, \quad (2.2)$$

где «звездочка» указывает, что величина выражена в относительных единицах, а индекс (6) – что она приведена к базисным условиям.

Перепишем из выражений (2.1) и (2.2) сопротивление:

$$Z_{*(6)} = \frac{Z}{Z_6} = Z \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot I_6}{U_6} = Z \cdot \frac{S_6}{U_6^2}, \quad (2.3)$$

где  $Z$  – заданное сопротивление, Ом;  $I_6$  – базисный ток, кА;  $U_6$  – базисное междуфазное напряжение, кВ;  $S_6$  – базисная мощность, МВА.

Сопротивления схемы в относительных единицах **при точном приведении** определяются с учетом того, что коэффициенты трансформации уже учтены в базисных единицах каждой ступени напряжения:

$$Z_{*(\bar{6})} = Z_{*H} \cdot \frac{I_{\bar{6}}}{I_H} \cdot \frac{U_H}{U_{\bar{6}}} = Z_{*H} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_H} \cdot \frac{U_H^2}{U_{\bar{6}}^2}. \quad (2.4)$$

Когда приведение схемы производится приближенно, пересчет к базисным условиям значительно упрощается, если за  $U_{\bar{6}}$  принимать значение  $U_{cp}$  соответствующей ступени. В этом случае можно использовать соотношения:

$$Z_{*(\bar{6})} = \frac{Z}{Z_{\bar{6}}} = Z \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}}} = Z \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}}^2};$$

$$Z_{*(\bar{6})} = Z_{*H} \cdot \frac{S_H}{S_{\bar{6}}}; \quad Z_{*(\bar{6})} = Z_{*H} \cdot \frac{I_{\bar{6}}}{I_H}, \quad (2.5)$$

при этом  $I_{\bar{6}}$  и  $I_H$  должны быть отнесены к одной ступени напряжения.

Расчетные формулы для определения реактивных сопротивлений ЭЭС в относительных единицах приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

**Формулы для определения реактивных сопротивлений ЭЭС в относительных единицах**

Наименование элементов СЭС	Реактивные сопротивления элементов		
	Входные параметры	Относительные единицы	
		Точное приведение	Приближенное приведение
Синхронный генератор (двигатель, компенсатор)	$x_{*d} [o.e];$ $U_H [кВ];$ $S_H [MBA]$	$x_{T*} = \frac{x_{*d} U_H^2 S_{\bar{6}}}{S_H U_{\bar{6}}^2}$	$x_{T*} = \frac{x_{*d} S_{\bar{6}}}{S_H}$
Двухобмоточный трансформатор	$u_k [\%]; U_H [кВ];$ $S_H [MBA]$	$x_{T*} = \frac{U_k \% U_H^2 S_{\bar{6}}}{100 S_H U_{\bar{6}}^2}$	$x_{T*} = \frac{U_k \% S_{\bar{6}}}{100 S_H}$



Продолжение таблицы 2.1

Наименование элементов СЭС	Реактивные сопротивления элементов		
	Входные параметры	Относительные единицы	
		Точное приведение	Приближенное приведение
Воздушная ЛЭП	$x_0$ [Ом/км]; $L$ [км]	$x_{л*} = \frac{x_0 l S_б}{U_б^2}$	$x_{л*} = \frac{x_0 l S_б}{U_{ср}^2}$
Токоограничивающий реактор	$x_p$ [%]; $U_H$ [кВ]; $I_H$ [кА]	$x_{p*} = \frac{x_p \% I_б U_H}{100 I_H U_б}$	$x_{p*} = \frac{x_p \% I_б U_H}{100 I_H U_б}$
Асинхронный двигатель	$K_{п}$ [о.е.]; $U_H$ [кВ]; $I_H$ [кА]	$x_{ад*} = \frac{1}{K_{п}} \cdot \frac{U_H^2 S_б}{S_H U_б^2}$	$x_{ад*} = \frac{1}{K_{п}} \cdot \frac{S_б}{U_б^2}$
Нагрузка	$S_{H*}$ [о.е.]; $S_H$ [МВА]; $P_{H*}$ [о.е.]; $P_H$ [МВт]; $Q_H$ [МВАр]; $Q_{H*}$ [о.е.]; $U_H$ [кВ]; $U_{H*}$ [о.е.]	$z_{H*} = z_H^* \frac{U_H^2}{S_H} \cdot \frac{S_б}{U_б^2}$ ; $x_{H*} = x_H^* \frac{U_H^2}{P_H} \cdot \frac{S_б}{U_б^2}$ ; $r_{H*} = r_H^* \frac{U_H^2}{Q_H} \cdot \frac{S_б}{U_б^2}$	$z_{H*} = \frac{U_{H*}^2}{S_{H*}}$ ; $x_{H*} = \frac{U_{H*}^2}{Q_{H*}}$ ; $r_{H*} = \frac{U_{H*}^2}{P_{H*}}$

Примечание: в расчетах индекс системы относительных единиц (\*) может опускаться.

### Пример 2.1

Определить сопротивления элементов ЭЭС (рис. 1.1), входящих в схему замещения, приведя их к базисным условиям в относительных единицах при точном приведении. Исходные данные:

– генератор:  $P_H = 100$  МВт;  $\cos \varphi_H = 0,8$ ;  $U_H = 10,5$  кВ;  $x'_{*d} = 0,278$  о.е.;

– трансформатор Т1:  $S_H = 160$  МВА;  $U_H = 11/242$  кВ;  $U_K = 11$  %;

– линия:  $x_0 = 0,4$  Ом/км;  $l = 300$  км;

– трансформатор Т2:  $S_H = 200$  МВА;  $U_H = 230/121$  кВ;  $U_K = 11$  %;

– передаваемая мощность  $P_c = 80$  МВт и  $Q_c = 30$  МВАр.

### Решение

Принимаем базисные величины. За базисное напряжение принимаем напряжение на шинах системы  $U_{б,4} = 121$  кВ, за базисную мощность принимаем передаваемую активную мощность в энергосистему  $S_б = P_c = 80$  МВт. Базисное сопротивление:

$$x_{6.4} = \frac{U_6^2}{S_6} = \frac{121^2}{80} = 183,01 \text{ Ом.}$$

Базисные напряжения в точке 3 и 2:

$$U_{6.3} = U_{6.2} = \frac{U_{6.4}}{K_{T2}} = \frac{U_{6.4}}{U_4/U_3} = 121/(121/230) = 230 \text{ кВ.}$$

Базисные напряжения в точке 1:

$$U_{6.1} = \frac{U_{6.4}}{K_{T2} \cdot K_{T1}} = \frac{U_{6.4}}{(U_4/U_3 \cdot U_2/U_1)} = \frac{121}{(121/230 \cdot 242/11)} = 10,46 \text{ кВ.}$$

Определяем реактивное сопротивление генератора в относительных единицах при точном приведении:

$$x_{\Gamma} = \frac{x'_{*d} U_{\text{H}}^2 S_6}{S_{\text{H}} U_{6.1}^2} = \frac{0,278 \cdot 10,5^2 \cdot 80}{100 \cdot 0,8 \cdot 10,46^2} = 0,179 \text{ о.е.}$$

Определяем реактивное сопротивление трансформатора Т1 в относительных единицах:

$$x_{\text{T1}} = \frac{U_{\text{к}} \cdot U_{\text{H}}^2 \cdot S_6}{100 \cdot S_{\text{H}} \cdot U_{6.2}^2} = \frac{11 \cdot 242^2 \cdot 80}{100 \cdot 160 \cdot 230^2} = 0,0609 \text{ о.е.}$$

Определяем эквивалентное реактивное сопротивление двухцепной линии в относительных единицах:

$$x_{\text{л}} = 0,5 \cdot x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{6.2}^2} = 0,5 \cdot 0,4 \cdot 300 \cdot \frac{80}{230^2} = 0,0907 \text{ о.е.}$$

Определяем реактивное сопротивление трансформатора Т2 в относительных единицах:

$$x_{\text{T2}} = \frac{U_{\text{к}} \cdot U_{\text{H}}^2 \cdot S_6}{100 \cdot S_{\text{H}} \cdot U_{6.4}^2} = \frac{11 \cdot 121^2 \cdot 80}{100 \cdot 200 \cdot 121^2} = 0,044 \text{ о.е.}$$

Сопротивление передающей сети в нормальном режиме:

$$x_{\Sigma 1} = x_{\Gamma} + x_{\text{T1}} + x_{\text{л}} + x_{\text{T2}} = 0,179 + 0,0609 + 0,0907 + 0,044 = 0,375 \text{ о.е.}$$

Сопротивление передающей сети в именованных единицах, приведенное к напряжению системы:

$$x_{\Sigma 1} = x_{\Sigma 1} \cdot x_{6,4} = 0,375 \cdot 183,01 = 68,6 \text{ о.е.}$$

### Пример 2.2

Определить сопротивления элементов ЭЭС (рис. 1.1), входящих в схему замещения, приведя их к базисным условиям в относительных единицах при приближенном приведении. Сравнить результаты расчетов точного и приближенного приведения. Исходные данные к задаче приведены в примере 2.1.

#### Решение

Принимаем базисные величины. За базисное напряжение принимаем среднее напряжение на шинах системы  $U_6 = U_4 = 115 \text{ кВ}$ , за базисную мощность принимаем передаваемую активную мощность в энергосистему  $S_6 = P_c = 80 \text{ МВт}$ . Базисное сопротивление:

$$x_{6,4} = \frac{U_6^2}{S_6} = \frac{115^2}{80} = 165,3 \text{ Ом.}$$

Определяем реактивное сопротивление генератора в относительных единицах при приближенном приведении:

$$x_{\Gamma} = \frac{x'_{*d} \cdot S_6}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{x'_{*d} \cdot S_6}{P_{\text{НОМ}} / \cos \varphi_{\text{НОМ}}} = \frac{0,278 \cdot 80}{100 / 0,8} = 0,178 \text{ о.е.}$$

Определяем реактивное сопротивление трансформатора Т1 в относительных единицах:

$$x_{\Gamma 1} = \frac{U_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{Н}}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{80}{160} = 0,055 \text{ о.е.}$$

Определяем эквивалентное реактивное сопротивление двухцепной линии в относительных единицах:

$$x_{\text{л}} = 0,5 \cdot x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср}}^2} = 0,5 \cdot 0,4 \cdot 300 \cdot \frac{80}{230^2} = 0,091 \text{ о.е.}$$

Определяем реактивное сопротивление трансформатора Т2 в относительных единицах

$$x_{\Gamma 2} = \frac{U_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{Н}}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{80}{200} = 0,044 \text{ о.е.}$$

Сопротивление передающей сети в нормальном режиме:

$$x_{\Sigma 2} = x_{\Gamma} + x_{T1} + x_{Л} + x_{T2} = 0,178 + 0,055 + 0,091 + 0,044 = 0,368 \text{ о.е.}$$

Сопротивление передающей сети в именованных единицах, приведенное к напряжению системы:

$$x_{\Sigma 2} = x_{\Sigma 2} \cdot x_{6,4} = 0,368 \cdot 165,3 = 60,8 \text{ о.е.}$$

### **Практическая часть**

#### **Задача 2.3**

Определить сопротивления элементов электрической сети (рисунок 1.1), входящих в схему замещения, приведя их к базисным условиям в относительных единицах при точном и приближенном приведении. Оценить погрешность использования приближенного метода расчета по сравнению с точным.

Параметры элементов электрической сети и базовые ступени приведения сопротивлений схемы принять в соответствии с вариантом задания. Исходные данные к задаче приведены в приложение П 1, П 2.

### Практическая работа № 3:

#### Угловые характеристики мощности синхронных генераторов без АРВ. Расчет предельной мощности и запаса статической устойчивости. Построение векторных диаграмм

##### Краткие теоретические сведения

При анализе статической устойчивости простейшей системы необходимо определить предельную передаваемую мощность по линиям, коэффициенты запаса по напряжению и мощности.

При отсутствии на генераторе автоматического регулирования возбуждения (АРВ) можно считать, что в первый момент времени переходного процесса ток возбуждения не изменяется. Поэтому в расчетах генератор учитывается синхронной ЭДС по поперечной оси  $E_q$  и синхронным сопротивлением по продольной оси  $x_d$ .

Угловая характеристика мощности неявнополюсного генератора равна:

$$P_{E_q}(\delta) = \frac{E_q U_c}{x_{d\Sigma}} \sin \delta = P_M \sin \delta, \text{ о. е.}, \quad (3.1)$$

где  $E_q$  – ЭДС генератора;  $P_M$  – предел передаваемой мощности генератора, о.е.;  $x_{d\Sigma}$  – сопротивление передающей сети, о.е.:

$$x_{d\Sigma} = x_d + x_c, \text{ о. е.}, \quad (3.2)$$

где  $x_c$  – внешнее сопротивление сети от шин генераторного напряжения до шин системы, о.е.

Синхронная ЭДС неявнополюсного генератора без АРВ в простейшей системе определяется по формуле:

$$E_q = \sqrt{\left( U_c + \frac{Q_c x_{d\Sigma}}{U_c} \right)^2 + \left( \frac{P_c x_{d\Sigma}}{U_c} \right)^2}, \text{ о. е.}, \quad (3.3)$$

где  $U_c$  – напряжение системы, о. е.;  $Q_c$  – реактивная мощность, передаваемая в систему, о. е.;  $P_c$  – активная мощность, передаваемая в систему, о. е.

Угол сдвига  $\delta_0$  между вектором  $E_q$  и вектором напряжения системы  $U_c$  в установившемся режиме определяется по формуле:

$$\delta_0 = \arcsin\left(\frac{P_c}{P_M}\right) = \arctg \frac{P_c \cdot x_{d\Sigma}}{U_c^2 + Q_c \cdot x_{d\Sigma}} \quad (3.4)$$

Коэффициент запаса статической устойчивости по мощности определяется по формуле:

$$k_P = \frac{P_M - P_c}{P_c}, \quad (3.5)$$

где  $P_c$  – мощность, передаваемая в энергосистему.

В соответствии с [3] коэффициент запаса статической устойчивости по активной мощности в нормальных режимах должен быть не менее 20 % и 8 % в кратковременных послеаварийных режимах [4].

Коэффициент запаса статической устойчивости по углу определяется по формуле:

$$k_\delta = \frac{90 - \delta_0}{90}, \quad (3.6)$$

где  $\delta_0$  – значение угла сдвига  $E_q$  относительно напряжения системы  $U_c$ .

Коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению определяется по формуле:

$$k_U = P_c \frac{x_{d\Sigma}}{E_q}. \quad (3.7)$$

### Пример 3.1

Для электрической системы, приведенной на рисунке 3.1, с генератором, не оснащенным устройством АРВ, требуется:

- определить предел передаваемой мощности;
- определить коэффициенты запаса по мощности, углу и напряжению;
- построить угловую характеристику мощности;
- произвести построение векторной диаграммы.

Расчеты выполнить при приближенном приведении электрических сопротивлений схемы в относительных единицах.

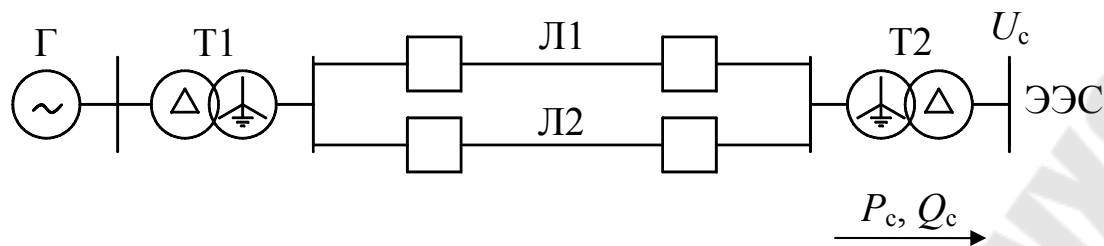


Рисунок 3.1 – Расчетная схема электрической системы

Исходные данные:

- генератор:  $P_H = 100$  МВт;  $\cos \varphi_H = 0,8$ ;  $U_H = 10,5$  кВ;  $x_{*d} = 2,1$  о.е.;
- трансформатор Т1:  $S_H = 160$  МВА;  $U_H = 11/242$  кВ;  $U_K = 11$  %;
- линия:  $x_0 = 0,4$  Ом/км;  $l = 300$  км;
- трансформатор Т2:  $S_H = 200$  МВА;  $U_H = 230/121$  кВ;  $U_K = 11$  %;
- передаваемая мощность  $P_c = 80$  МВт и  $Q_c = 26,4$  МВАр.

### Решение

Принимаем базисные величины. За базисное напряжение принимаем среднее напряжение на шинах системы  $U_{\sigma} = U_c = 115$  кВ, за базисную мощность принимаем передаваемую активную мощность в энергосистему  $S_{\sigma} = P_c = 80$  МВт.

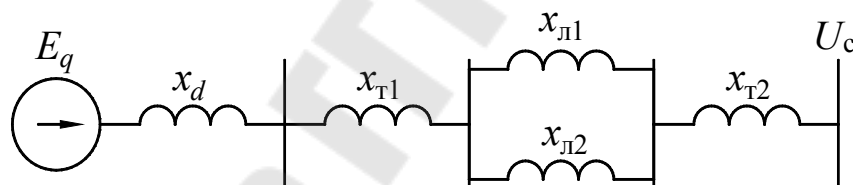


Рисунок 3.2 – Схема замещения электрической схемы

Напряжение системы в относительных единицах составляет:

$$U_c = \frac{U_c}{U_{\sigma}} = \frac{115}{115} = 1 \text{ о.е.}$$

Передаваемая активная мощность в относительных единицах равна:

$$P_c = \frac{P_c}{S_{\sigma}} = \frac{80}{80} = 1 \text{ о.е.}$$

Передаваемая реактивная мощность в относительных единицах равна:

$$Q_c = \frac{Q_c}{S_{\bar{6}}} = \frac{26,4}{80} = 0,33 \text{ о.е.}$$

Определяем реактивное сопротивление генератора в относительных единицах при приближенном приведении:

$$x_d = x_{*d} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{2,1 \cdot 80}{100 / 0,8} = 1,344 \text{ о.е.}$$

Определяем реактивное сопротивление трансформатора Т1 в относительных единицах:

$$x_{T1} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_H} = \frac{11}{100} \cdot \frac{80}{160} = 0,055 \text{ о.е.}$$

Определяем реактивное сопротивление линии в относительных единицах:

$$x_{\text{л}} = 0,5 \cdot x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\text{ср}}^2} = 0,5 \cdot 0,4 \cdot 300 \cdot \frac{80}{230^2} = 0,091 \text{ о.е.}$$

Определяем реактивное сопротивление трансформатора Т2 в относительных единицах:

$$x_{T2} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_H} = \frac{11}{100} \cdot \frac{80}{200} = 0,044 \text{ о.е.}$$

Внешнее сопротивление сети в нормальном режиме:

$$x_c = x_{T1} + x_{\text{л}} + x_{T2} = 0,055 + 0,091 + 0,044 = 0,19 \text{ о.е.}$$

Суммарное сопротивление сети с учетом сопротивления генератора по продольной оси:

$$x_{d\Sigma} = x_d + x_c = 1,344 + 0,19 = 1,534 \text{ о.е.}$$

Синхронная ЭДС неявнополюсного генератора без АРВ в простейшей системе, определяемая по формуле (3.3), составит:



$$E_q = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_c x_{d\Sigma}}{U_c}\right)^2 + \left(\frac{P_c x_{d\Sigma}}{U_c}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{0,33 \cdot 1,534}{1}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 1,534}{1}\right)^2} = 2,15 \text{ о.е.}$$

Определяем напряжение на генераторе:

$$U_r = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_c x_c}{U_c}\right)^2 + \left(\frac{P_c x_c}{U_c}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{0,33 \cdot 0,19}{1}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,19}{1}\right)^2} = 1,08 \text{ о.е.}$$

Предел передаваемой мощности составит:

$$P_M = \frac{E_q \cdot U_c}{x_{d\Sigma}} = \frac{2,15 \cdot 1}{1,534} = 1,4 \text{ о.е.}$$

Коэффициент запаса статической устойчивости по мощности:

$$k_P = \frac{P_M - P_c}{P_c} = \frac{1,4 - 1}{1} = 0,4.$$

Коэффициент запаса по мощности больше нормативно минимального значения 0,2, что удовлетворяет условию статической устойчивости.

Определяем угол сдвига  $\delta_0$  между вектором ЭДС генератора  $E_q$  и напряжением системы  $U_c$ :

$$\delta_0 = \arcsin\left(\frac{P_c}{P_M}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{1,4}\right) = 46^\circ.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости по углу:

$$k_\delta = \frac{90 - \delta_0}{\delta_0} = \frac{90 - 46}{90} = 0,49.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению:

$$k_U = P_c \frac{x_{d\Sigma}}{E_q} = 1 \cdot \frac{1,534}{2,15} = 0,71.$$

Характеристика мощности генератора приведена на рисунке 3.3.

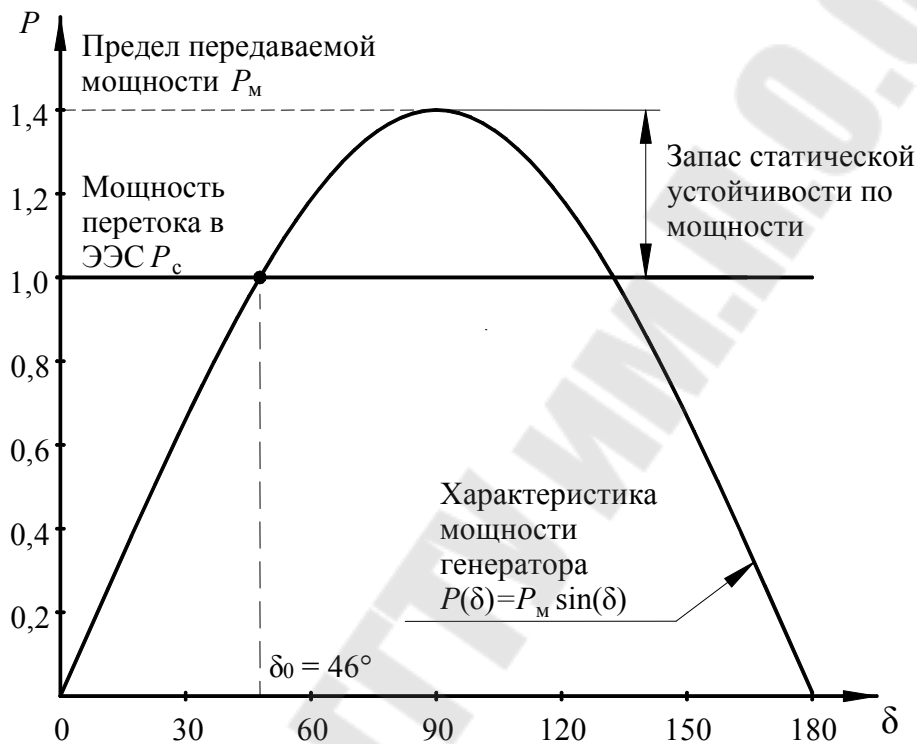


Рисунок 3.3 – Зависимость активной мощности от угла  $\delta$

Определяем полную мощность, протекающую в энергосистему:

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2} = \sqrt{1^2 + 0,33^2} = 1,05 \text{ о.е.}$$

Определяем ток, протекающий в энергосистему, в относительных единицах:

$$I_c = \frac{S_c}{U_c} = \frac{1,05}{1,0} = 1,05 \text{ о.е.}$$

Определяем угол сдвига  $\varphi$  между током  $I_c$  и напряжением  $U_c$ :

$$\varphi = \arccos\left(\frac{P_c}{S_c}\right) = \arccos\left(\frac{1}{1,05}\right) = 18^\circ.$$

Определяем величину падения напряжения во внешнем сопротивлении сети:

$$\Delta U_c = I_c \cdot x_c = 1,05 \cdot 0,19 = 0,2 \text{ о.е.}$$

Определяем величину падения напряжения на сопротивлении генератора:

$$\Delta U_d = I_c \cdot x_d = 1,05 \cdot 1,344 = 1,41 \text{ о.е.}$$

Определяем величину падения напряжения на элементах питающей сети с учетом сопротивления генератора:

$$\Delta U = I_c \cdot x_{d\Sigma} = 1,05 \cdot 1,534 = 1,61 \text{ о.е.}$$

Векторная диаграмма токов и напряжений расчетной схемы электрической сети приведена на рисунке 3.4.

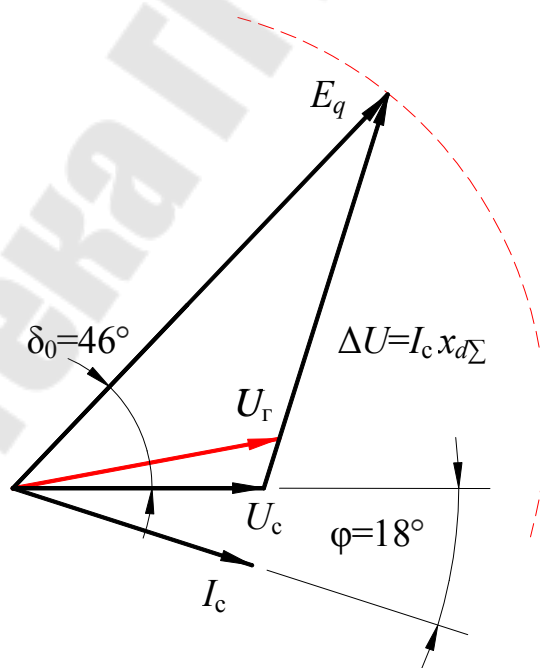


Рисунок 3.4 – Векторная диаграмма токов и напряжений в расчетной схеме электроснабжения

## Практическая часть

### Задача 3.2

Оценить запас статической устойчивости электрической системы, приведенной на рисунке 3.1, с генератором, не оснащенным устройством АРВ. Произвести построение угловой характеристики мощности и векторной диаграммы токов и напряжений электрической сети.

Параметры элементов ЭЭС в соответствии с вариантом задания приведены в таблице П 1.

## Практическая работа № 4:

### Угловые характеристики мощности синхронных генераторов с АРВ. Влияние АРВ на статическую устойчивость.

#### Расчет предельной мощности и запаса статической устойчивости. Построение векторных диаграмм

##### Краткие теоретические сведения

Современные синхронные генераторы оснащены устройствами автоматического регулирования возбуждения (АРВ). Под системой АРВ понимают аппараты для создания тока возбуждения и управления им с помощью регулирующих устройств. Выделяют систему АРВ пропорционального действия (ПД) и сильного действия (СД).

АРВ ПД изменяет тока возбуждения пропорционально отклонению какого-либо параметра, в качестве которого, как правило, выступает напряжение генератора и, в конечном счете, изменяет ЭДС генератора:

$$E = E_0 + k \cdot \Delta U_r, \quad (4.1)$$

где  $E_0$ ,  $E$  – ЭДС генератора до и после изменения нагрузки;  $k$  – коэффициент усиления регулятора;  $\Delta U_r$  – изменение напряжения генератора.

Характеристика мощности генератора оснащенного устройством АРВ ПД определяется по формуле [5]:

$$P_{E'_q}(\delta) = \frac{E'_q U_c}{x'_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{x_d - x'_d}{x'_{d\Sigma} x_{d\Sigma}} \sin 2\delta, \quad (4.2)$$

где  $E'_q$  – поперечная составляющая переходной ЭДС генератора, о.е.;  $x'_d$  – переходное сопротивление генератора по продольной оси, о.е.;  $x'_{d\Sigma} = x'_d + x_c$  – суммарное сопротивление сети с учетом переходного сопротивления генератора по продольной оси, о.е.

Поперечная составляющая переходной ЭДС определяется по формуле:

$$E'_q = E' \cos(\delta_0 - \delta'_0), \quad (4.3)$$

где  $E'$  – переходная ЭДС генератора, определяется по формуле:

$$E' = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_c x'_{d\Sigma}}{U_c}\right)^2 + \left(\frac{P_c x'_{d\Sigma}}{U_c}\right)^2}, \text{ о. е.}, \quad (4.4)$$

$\delta'_0$  – угол сдвига ЭДС  $E'$  относительно напряжения системы  $U_c$ , определяющийся по формуле:

$$\delta'_0 = \arctg \frac{P_c \cdot x'_{d\Sigma}}{U_c^2 + P_c \cdot x'_{d\Sigma}} \quad (4.5)$$

Регуляторы пропорционального действия позволяют поддерживать постоянство переходной ЭДС генератора  $E'$ .

АРВ СД реагирует не только на отклонение напряжения, но и на первую и вторую её производную:

$$E = E_0 + k_1 \cdot \Delta U_r + k_2 \cdot \frac{d\Delta U_r}{dt} + k_3 \cdot \frac{d^2 \Delta U_r}{dt^2}. \quad (4.6)$$

где  $k_1, k_2, k_3$  – коэффициенты усиления регулятора.

Регуляторы сильного действия позволяют поддерживать постоянство напряжения на шинах генератора  $U_r$ , в связи с чем, при составлении схемы замещения переходное сопротивление генератора  $x'_d$  принимается равным нулю.

Характеристика мощности генератора оснащенного устройством АРВ СД определяется по формуле [5]:

$$P_{U_{rq}}(\delta) = \frac{U_{rq} U_c}{x_c} \sin \delta - \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{x_d}{x_{d\Sigma} \cdot x_c} \sin 2\delta, \quad (4.7)$$

где  $U_{rq}$  – поперечная составляющая напряжения генератора  $U_r$ , о.е.:

$$U_{rq} = U_r \cos(\delta_0 - \delta_{c0}), \quad (4.8)$$

где  $\delta_{c0}$  – угол сдвига вектора напряжения генератора  $U_r$  относительно напряжения системы  $U_c$ , определяющийся по формуле:

$$\delta_{c0} = \arctg \frac{P_c \cdot x_c}{U_c^2 + P_c \cdot x_c} \quad (4.9)$$

В упрощенных расчетах характеристика мощности генератора с АРВ ПД, принимая во внимание, что величина  $E' \approx E'_q$ , определяется по выражению:

$$P_{E'_q}(\delta) = \frac{E'U_c}{x'_{d\Sigma}} \sin \delta. \quad (4.10)$$

Характеристика мощности генераторов при наличии АРВ СД упрощенно может быть записана:

$$P_{U_{rq}}(\delta) = \frac{U_r U_c}{x_c} \sin \delta. \quad (4.11)$$

#### Пример 4.1

Для электрической системы, приведенной на рисунке 3.1, с генератором, не оснащенным устройством АРВ, с АРВ ПД и с АРВ СД требуется:

- определить предел передаваемой мощности;
- определить коэффициент запаса статической устойчивости;
- построить угловые характеристики мощности;
- построить векторные диаграммы.

В качестве исходных данных приняты параметры схемы замещения, представленные в системе относительных единиц:

- генератор:  $x_d = 1,344$  о.е.;  $x'_d = 0,295$  о.е.;
- трансформатор Т1:  $x_{T1} = 0,055$  о.е.;
- линия:  $x_{л} = 0,091$  о.е.;
- трансформатор Т2:  $x_{T2} = 0,044$  о.е.
- передаваемая мощность  $P_c = 1$  о.е.;  $Q_c = 0,33$  о.е.

Принятые базисы: напряжение на шинах системы  $U_{\delta} = U_c = 115$  кВ, активная мощность, передаваемая в энергосистему  $S_{\delta} = P_c = 80$  МВт.

В расчетах использовать полные зависимости характеристики мощности синхронного генератора при различных видах АРВ.

## Решение

### Синхронный генератор без АРВ

Результаты расчета синхронного генератора, не оснащенного устройством АРВ, приведены в примере 3.1. Угловая характеристика мощности определяется зависимостью:

$$P_{E_q}(\delta) = \frac{E_q \cdot U_c}{x_{d\Sigma}} \sin(\delta) = \frac{2,15 \cdot 1}{1,534} \sin(\delta) = 1,4 \sin(\delta).$$

Предел передаваемой мощности составит:

$$P_{M1} = \frac{E_q \cdot U_c}{x_{d\Sigma}} = \frac{2,15 \cdot 1}{1,534} = 1,4 \text{ о.е.}$$

Коэффициент запаса статической устойчивости по мощности:

$$k_{P1} = \frac{P_{M1} - P_c}{P_c} = \frac{1,4 - 1}{1} = 0,4 \text{ о.е.}$$

### Синхронный генератор с АРВ пропорционального действия

Внешнее сопротивление сети в нормальном режиме:

$$x_c = x_{T1} + x_{л} + x_{T2} = 0,055 + 0,091 + 0,044 = 0,19 \text{ о.е.}$$

Суммарное сопротивление сети с учетом переходного сопротивления генератора по продольной оси:

$$x'_{d\Sigma} = x'_d + x_c = 0,295 + 0,19 = 0,485 \text{ о.е.}$$

Переходная ЭДС генератора:

$$E' = \sqrt{\left( U_c + \frac{Q_c x'_{d\Sigma}}{U_c} \right)^2 + \left( \frac{P_c x'_{d\Sigma}}{U_c} \right)^2} = \sqrt{\left( 1 + \frac{0,33 \cdot 0,485}{1} \right)^2 + \left( \frac{1 \cdot 0,485}{1} \right)^2} = 1,26 \text{ о.е.}$$

Угол сдвига ЭДС  $E'$  относительно напряжения системы  $U_c$ :



$$\delta'_0 = \operatorname{arctg} \frac{P_c \cdot x'_{d\Sigma}}{U_c^2 + P_c \cdot x'_{d\Sigma}} = \operatorname{arctg} \frac{1,0 \cdot 0,485}{1^2 + 1 \cdot 0,485} = 18^\circ.$$

Поперечная составляющая переходной ЭДС:

$$E'_q = E' \cos(\delta_0 - \delta'_0) = 1,26 \cdot \cos(46 - 18) = 1,11 \text{ о.е.}$$

Характеристика мощности генератора оснащенного устройством АРВ ПД:

$$\begin{aligned} P'_{E_q}(\delta) &= \frac{E'U_c}{x'_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{x_d - x'_d}{x'_{d\Sigma} \cdot x_{d\Sigma}} \sin 2\delta = \\ &= \frac{1,11 \cdot 1}{0,485} \sin \delta - \frac{1^2}{2} \cdot \frac{1,344 - 0,295}{0,485 \cdot 1,534} \sin 2\delta = 2,29 \sin \delta - 0,7 \sin 2\delta. \end{aligned}$$

Для определения предела передаваемой мощности продифференцируем полученное выражение:

$$P'_{E_q}(\delta) = 2,29 \cos \delta - 1,4 \cos 2\delta.$$

Полученное выражение определяет изменение синхронизирующей мощности. В области изменения угла  $\delta$  от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  уравнение имеет один действительный корень  $\delta_{M2} = 114^\circ$ . Предел мощности составляет:

$$P_{M2}(\delta_{M2}) = 2,29 \sin(114) - 0,7 \sin(2 \cdot 114) = 2,61.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости по мощности:

$$k_{P2} = \frac{P_{M2} - P_c}{P_c} = \frac{2,61 - 1}{1} = 1,61 \text{ о.е.}$$

### **Синхронный генератор с АРВ сильного действия**

Определяем напряжение на шинах генератора:

$$\begin{aligned} U_\Gamma &= \sqrt{\left( U_c + \frac{Q_c x_c}{U_c} \right)^2 + \left( \frac{P_c x_c}{U_c} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left( 1 + \frac{0,33 \cdot 0,19}{1} \right)^2 + \left( \frac{1 \cdot 0,19}{1} \right)^2} = 1,08 \text{ о.е.} \end{aligned}$$

Определяем угол сдвига вектора напряжения генератора  $U_r$  относительно напряжения системы  $U_c$ :

$$\delta_{c0} = \operatorname{arctg} \frac{P_c \cdot x_c}{U_c^2 + P_c \cdot x_c} = \operatorname{arctg} \frac{1 \cdot 0,19}{1^2 + 1 \cdot 0,19} = 5,7^\circ.$$

Определяем поперечную составляющую напряжения генератора  $U_{rq}$ :

$$U_{rq} = U_r \cos(\delta_0 - \delta_{c0}) = 1,08 \cos(46 - 5,7) = 0,82.$$

Характеристика мощности генератора оснащенного устройством АРВ СД:

$$\begin{aligned} P_{U_{rq}}(\delta) &= \frac{U_{rq} U_c}{x_c} \sin \delta - \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{x_d}{x_{d\Sigma} \cdot x_c} \sin 2\delta = \\ &= \frac{0,82 \cdot 1}{0,19} \sin \delta - \frac{1^2}{2} \cdot \frac{1,344}{1,534 \cdot 0,19} \sin 2\delta = 4,31 \sin \delta - 2,31 \sin 2\delta. \end{aligned}$$

Определим зависимость синхронизирующей мощности:

$$P_{U_{rq}}(\delta) = 4,31 \cos \delta - 4,62 \cos 2\delta.$$

В области изменения угла  $\delta$  от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  уравнение имеет два действительный корня ( $12^\circ$  и  $120^\circ$ ) предел мощности достигается при значениях  $\delta_{m3} = 120^\circ$ :

$$P_{m3}(\delta_{m3}) = 4,31 \sin(120) - 4,62 \sin(2 \cdot 120) = 4,49.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости по мощности:

$$k_{P3} = \frac{P_{m3} - P_c}{P_c} = \frac{4,49 - 1}{1} = 3,63 \text{ о.е.}$$

На рисунках 4.1, 4.2 приведены угловые характеристики мощности синхронного генератора при различных видах АРВ и векторная диаграмма соответственно.

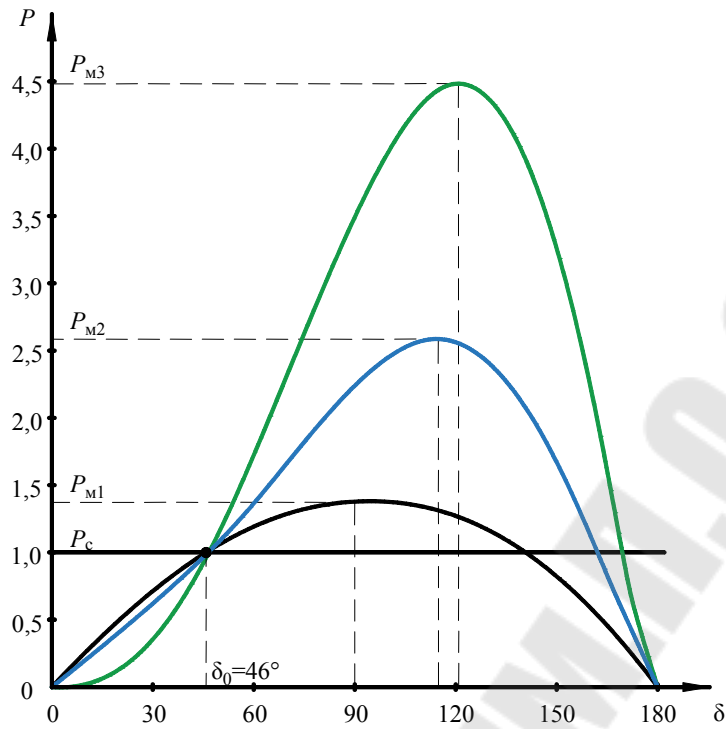


Рисунок 4.1 – Угловые характеристики мощности синхронного генератора без АРВ, с АРВ ПД и АРВ СД

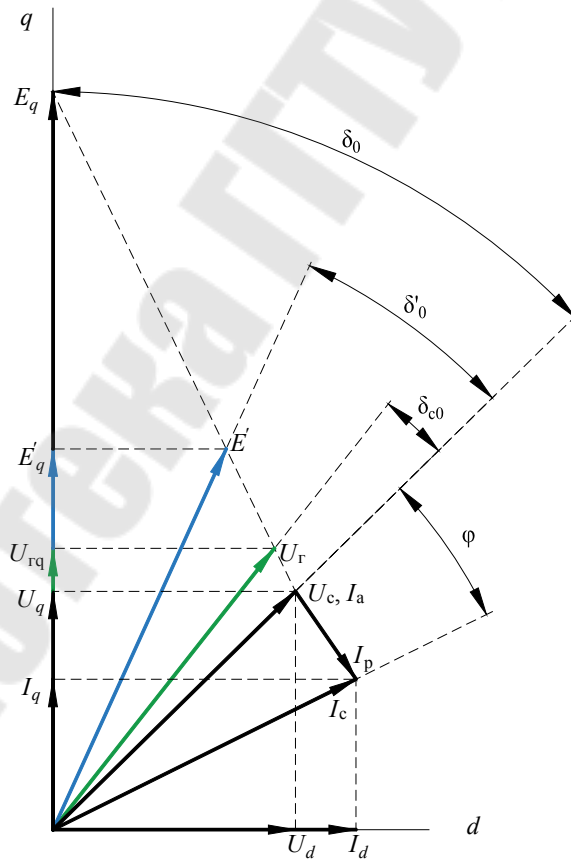


Рисунок 4.2 – Векторная диаграмма электрической сети при различных видах АРВ

### Пример 4.2

Для электрической системы, приведенной на рисунке 4.3, с генератором оснащенным устройством автоматического регулирования возбуждения пропорционального типа требуется:

- построить зависимость коэффициента запаса статической устойчивости по мощности в зависимости от коэффициента активной  $\cos\varphi_c$  мощности у шин приемной системы;
- определить предел передаваемой мощности;
- построить угловую характеристику мощности.

Параметры схемы замещения приведены в относительных единицах на рисунке 4.3. В расчетах использовать упрощенные зависимости определения угловой характеристики мощности синхронного генератора.

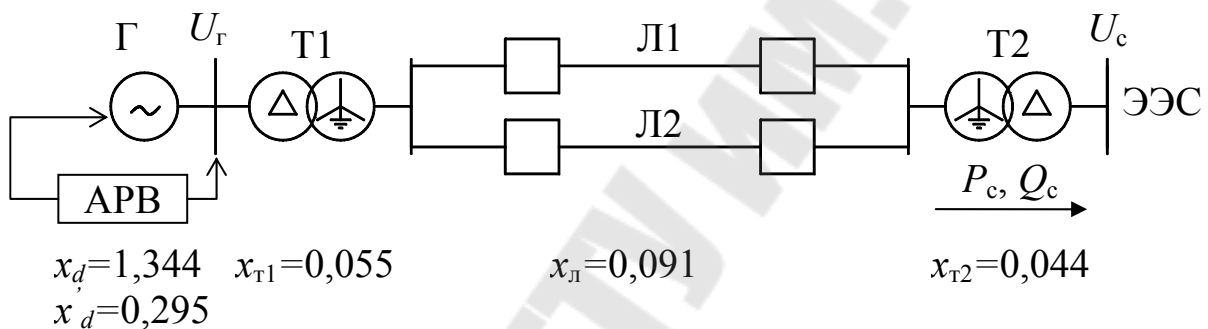


Рисунок 4.3 – Расчетная схема электрической системы

Таблица 4.1

### Исходные данные задачи

Наименование параметра	Значение				
Активная мощность перетока в систему, $P_c$ , о.е.	1	1	1	1	1
Коэффициент активной мощности, $\cos\varphi_c$	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2

### Решение

Определяем реактивную мощность у шин приемной системы при значении  $\cos\varphi_c = 0,6$ , для остальных значений расчеты аналогичны:

$$Q_c = P_c \cdot \operatorname{tg}(\arccos \varphi_c) = 1 \cdot \operatorname{tg}(\arccos (0,6)) = 1,33 \text{ о.е.}$$

Внешнее сопротивление сети в нормальном режиме:

$$x_c = x_{T1} + x_{Л} + x_{T2} = 0,055 + 0,091 + 0,044 = 0,19 \text{ о.е.}$$

Суммарное сопротивление сети с учетом сопротивления генератора по продольной оси:

$$x_{d\Sigma} = x_d + x_c = 1,344 + 0,19 = 1,534 \text{ о.е.}$$

Суммарное сопротивление сети с учетом переходного сопротивления генератора по продольной оси:

$$x'_{d\Sigma} = x'_d + x_c = 0,295 + 0,19 = 0,485 \text{ о.е.}$$

Определяем переходную ЭДС генератора по формуле (4.4) за переходным реактивным сопротивлением  $x'_d$  для различных значений  $P_0$  и  $Q_0$ :

$$\begin{aligned} E'_q &\approx E' = \sqrt{\left( U_c + \frac{Q_c \cdot x'_{d\Sigma}}{U_c} \right)^2 + \left( \frac{P_c \cdot x'_{d\Sigma}}{U_c} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left( 1 + \frac{1,33 \cdot 0,485}{1} \right)^2 + \left( \frac{1 \cdot 0,485}{1} \right)^2} = 1,72 \text{ о.е.} \end{aligned}$$

Предел передаваемой мощности составит:

$$P_M = \frac{E' U_c}{x'_{d\Sigma}} = \frac{1,72 \cdot 1}{0,485} = 3,54 \text{ о.е.}$$

Коэффициент запаса статической устойчивости по мощности:

$$k_P = \frac{P_M - P_c}{P_c} = \frac{3,54 - 1}{1} = 2,54 \text{ или } 254 \text{ \%}.$$

Определяем угол сдвига  $\delta_0$  между вектором ЭДС генератора  $E_q$  и напряжением системы  $U_c$ :

$$\delta_0 = \arctg \frac{P_c \cdot x_{d\Sigma}}{U_c^2 + Q_c \cdot x_{d\Sigma}} = \arctg \frac{1 \cdot 0,485}{1^2 + 1,33 \cdot 1,534} = 27^\circ.$$

Результаты расчета сведены в таблицу 4.2. Влияние коэффициента активной мощности у шин приемной системы на коэффициент запаса статической устойчивости по мощности приведено на рисунке 4.4.

Таблица 4.2

### Результаты расчета

Наименование параметра	Значение				
	1	0,8	0,6	0,4	0,2
Активная мощность перетока в систему, $P_c$ , о.е.	1	1	1	1	1
Коэффициент активной мощности, $\cos\varphi_c$	1	0,8	0,6	0,4	0,2
Реактивная мощность перетока в систему, $Q_c$ , о.е.	0	0,75	1,33	2,29	4,90
Переходная поперечная ЭДС СГ, $E'$ , о.е.	1,11	1,45	1,72	2,17	3,41
Предел мощности, $P_m$ , о.е.	2,29	2,98	3,54	4,47	7,03
Коэффициент запаса статической устойчивости по мощности, $K_p$	1,29	1,98	2,54	3,47	6,03
Определяем угол сдвига между вектором ЭДС генератора и напряжением системы, $\delta_0$ , град	57	36	27	19	10

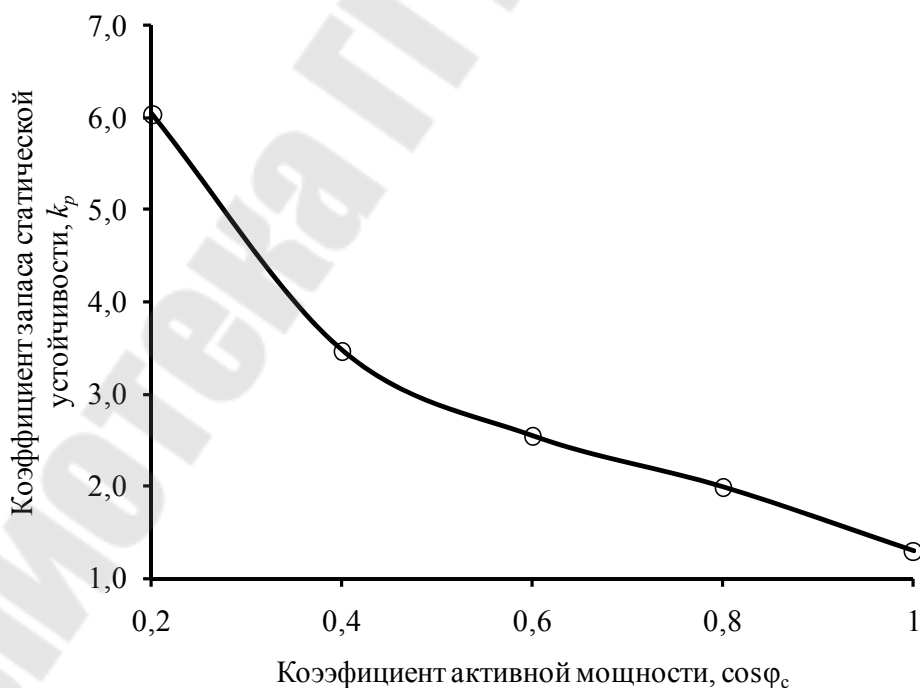


Рисунок 4.4 – Влияние  $\cos\varphi_c$  на коэффициент запаса статической устойчивости по мощности

Таким образом, увеличение передаваемой реактивной мощности приводит к повышению предела передаваемой мощности генератора, оснащенного АРВ ПД. Характеристика мощности синхронного генератора при различных значениях  $\cos\varphi_c$  приведена на рисунке 4.5.

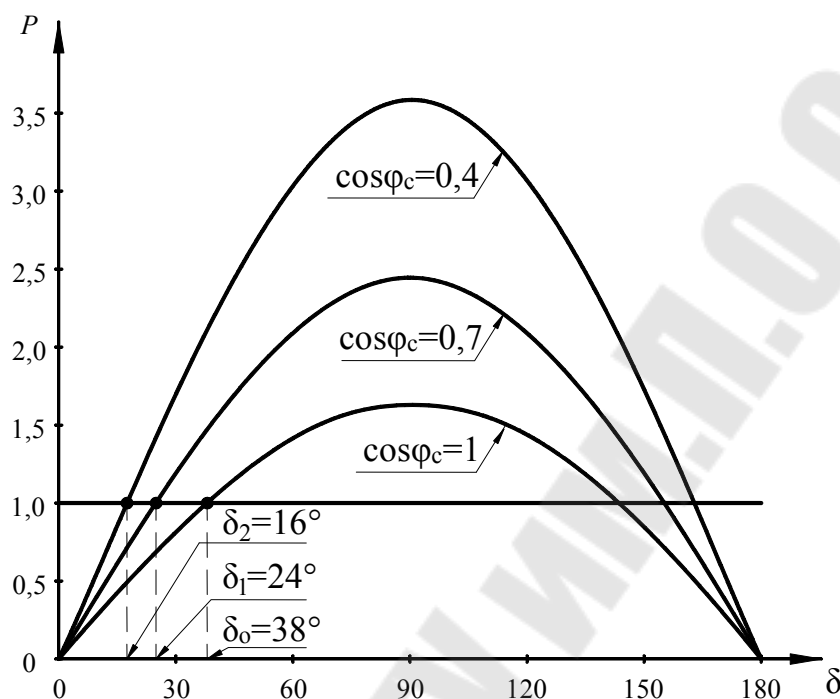


Рисунок 4.5 – Влияние  $\cos\varphi_c$  на характеристику мощности синхронного генератора, оснащенного АРВ ПД

## Практическая часть

### Задача 4.3

Для электрической системы, приведенной на рисунке 3.1, с генератором, не оснащенным устройством АРВ, с АРВ ПД и с АРВ СД определить предел передаваемой мощности, коэффициент запаса статической устойчивости, построить угловые характеристики мощности, построить векторные диаграммы.

Исходные данные принять в соответствии с вариантом задания таблицы П 1. В расчетах использовать полные зависимости характеристики мощности синхронного генератора при различных видах АРВ.

### Задача 4.4

Исследовать влияние на коэффициент запаса статической устойчивости по мощности изменения переходного сопротивления генератора оснащенного устройством АРВ пропорционального действия передающей станции, приведенной на рисунке 4.3. Определить

предел передаваемой мощности и построить угловые характеристики мощности синхронного генератора.

Исходные данные принять в соответствии с вариантом задания таблицы П 1. Переходные сопротивления  $x'_d$  принять равным 0 %, 50 %, 100 % от номинального. Сделать выводы полученных результатов.

#### **Задача 4.5**

Исследовать влияние на коэффициент запаса статической устойчивости по мощности изменения количества цепей линии электропередач  $n$ . Генератор оснащен устройством АРВ пропорционального действия. Исходная схемы передающей станции приведена на рисунке 4.3. Определить предел передаваемой мощности и построить угловые характеристики мощности синхронного генератора.

Исходные данные принять в соответствии с вариантом задания таблицы П 1. В расчетах принять количество цепей равное 1, 2 и 3. Сделать выводы полученных результатов.

#### **Задача 4.6**

Исследовать влияние на коэффициент запаса статической устойчивости по мощности изменения длины линии  $L$ . Генератор оснащен устройством АРВ пропорционального действия. Исходная схемы передающей станции приведена на рисунке 4.3. Определить предел передаваемой мощности и построить угловые характеристики мощности синхронного генератора.

Параметры элементов ЭЭС в соответствии с вариантом задания приведены в таблице П 1. Длину линии  $L$  принять равной 10 %, 50 %, 100 % от номинального значения. Сделать выводы полученных результатов.



## Практическая работа № 5:

### Характеристика мощности генератора при сложной связи синхронной машины с энергосистемой. Собственные и взаимные проводимости. Расчет предельной мощности и запаса статической устойчивости генераторов при включении комплексной нагрузки

#### Краткие теоретические сведения

Включение поперечных сопротивлений (рис. 5.1) в промежуточной точке электрической сети вносит свои изменения при расчете характеристики мощности синхронного генератора [2].

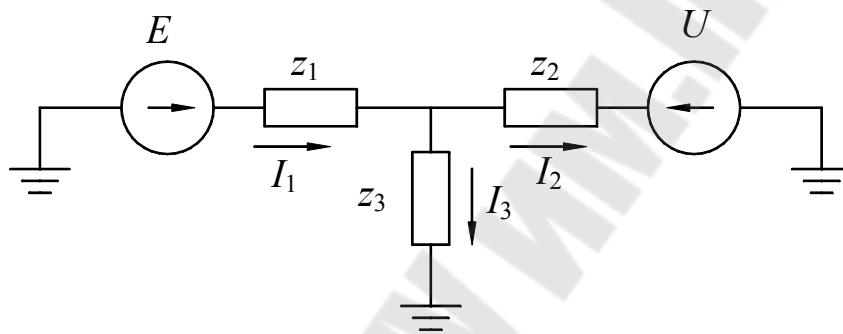


Рисунок 5.1 – Схема замещения электрической системы с поперечной связью

Для определения зависимости характеристики мощности генератора в приведенном случае предпочтительно использовать метод наложения, в соответствии с которым, из схемы поочередно исключаются генерирующие источники, упрощая тем самым исходную схему (рис. 5.2, 5.3).

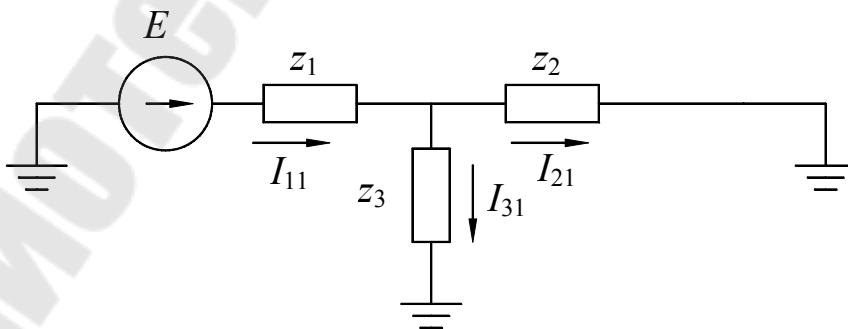


Рисунок 5.2 – Схема замещения при исключении напряжения системы

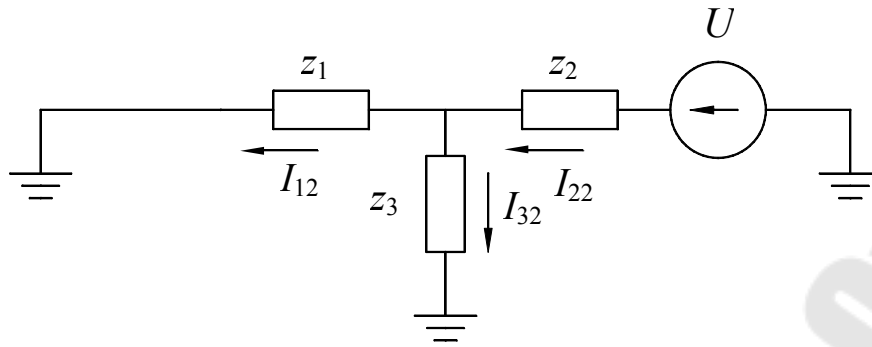


Рисунок 5.3 – Схема замещения при исключении напряжения ЭДС генератора

В соответствии с методом наложения токи в расчетной схеме электрической сети можно представить в виде суммы токов двух режимов:

$$I_1 = I_{11} - I_{12}, \quad (5.1)$$

$$I_2 = I_{21} - I_{22}, \quad (5.2)$$

$$I_3 = I_{31} + I_{32}. \quad (5.3)$$

Опираясь на законы Ома и Кирхгофа, отдельные составляющие существующих токов, на примере схемы рисунка 5.2, могут быть выражены как:

$$I_{11} = \frac{E}{Z_{11}} = \underline{E}Y_{11}, \quad (5.4)$$

$$I_{21} = I_{11} \frac{z_3}{z_2 + z_3} = \frac{E}{z_1 + (z_2 z_3 / (z_2 + z_3))} \frac{z_3}{z_2 + z_3} = \frac{E}{Z_{21}} = \underline{E}Y_{21}, \quad (5.5)$$

где  $Z_{11}$ ,  $Z_{21}$  и  $Y_{11}$ ,  $Y_{12}$  – собственные и взаимные сопротивления и проводимости синхронной машины соответственно:

$$Z_{11} = \frac{1}{Y_{11}} = z_1 + \frac{z_2 z_3}{z_2 + z_3}, \quad (5.6)$$

$$Z_{21} = \frac{1}{Y_{21}} = \left( z_1 + \frac{z_2 z_3}{z_2 + z_3} \right) \frac{z_2 + z_3}{z_3} = z_1 + z_2 + \frac{z_1 z_2}{z_3}. \quad (5.7)$$

Аналогично для схемы рисунка 5.3 получим:

$$I_{11} = \frac{U}{Z_{22}} = \underline{U}Y_{22}, \quad (5.8)$$

$$I_{12} = I_{22} \frac{z_3}{z_1 + z_3} = \frac{U}{z_2 + (z_1 z_3 / (z_1 + z_3))} \frac{z_3}{z_1 + z_2} = \frac{U}{Z_{12}} = \underline{U}Y_{12}, \quad (5.9)$$

где  $Z_{22}$ ,  $Z_{12}$  и  $Y_{22}$ ,  $Y_{12}$ , – собственные и взаимные сопротивления и проводимости энергосистемы соответственно:

$$Z_{22} = \frac{1}{Y_{22}} = z_2 + \frac{z_1 z_3}{z_1 + z_3}, \quad (5.10)$$

$$Z_{12} = \frac{1}{Y_{12}} = \left( z_2 + \frac{z_1 z_3}{z_1 + z_3} \right) \frac{z_1 + z_3}{z_3} = z_1 + z_2 + \frac{z_1 z_2}{z_3}. \quad (5.11)$$

*Собственные сопротивления* и проводимости определяют амплитуду и фазу тока в ветви данного источника при отсутствии ЭДС в других ветвях схемы. *Взаимные сопротивления* и проводимости определяют амплитуду и фазу тока какой-либо ветви схемы, обусловленного приложением ЭДС или напряжения в другой ветви при отсутствии ЭДС во всех остальных ветвях.

Собственные и взаимные сопротивления и проводимости можно представить в виде:

$$Z = r \pm jx = ze^{\pm j\psi}. \quad (5.12)$$

Таким образом, учитывая выше приведенные выражения, искомые значения токов могут быть представлены:

$$I_1 = \underline{E}Y_{11} - \underline{U}Y_{12}, \quad (5.13)$$

$$I_2 = -\underline{U}Y_{22} + \underline{E}Y_{21}, \quad (5.14)$$

Зная токи, синхронную ЭДС и напряжение системы, полную мощность в начале и в конце линии можно представить в виде:

$$\begin{cases} \underline{S}_1 = P_1 + j\underline{Q}_1 = \underline{E}\underline{I}_1 = \underline{E}(\underline{E}Y_{11} - UY_{12}) = \underline{E}\underline{E}Y_{11} - \underline{E}UY_{12} \\ \underline{S}_2 = P_2 + j\underline{Q}_2 = \underline{U}\underline{I}_2 = \underline{U}(-UY_{22} + EY_{21}) = -\underline{U}\underline{U}Y_{22} + \underline{U}EY_{21} \end{cases}, \quad (5.15)$$

где \* означает комплексное сопряжение.

В дальнейших расчетах выполняем преобразование над величиной  $\underline{S}_1$ , которая характеризует внутреннюю мощность генератора. Принимаемая направление  $\underline{U}$  за ось отсчета углов, т.е.  $\underline{U} = U$ , следовательно,  $\underline{E} = Ee^{j\delta}$ ,  $Y_{ij} = y_{ij}e^{-j\psi}$  и, учитывая, что фазные углы сопряженных векторов должны быть взяты с обратным знаком, получаем:

$$\begin{aligned} \underline{S}_1 &= Ee^{j\delta} Ee^{-j\delta} y_{11}e^{j\psi_{11}} - Ee^{j\delta} U y_{12}e^{j\psi_{12}} = \\ &= E^2 y_{11}e^{j\psi_{11}} - EU y_{12}e^{j(\delta + \psi_{12})}. \end{aligned} \quad (5.16)$$

При переходе к тригонометрической форме записи комплексных чисел, т.е.  $ae^{j\varphi} = a(\cos\varphi + j\sin\varphi)$  уравнение мощности генератора, принимает вид:

$$\begin{aligned} S_1 &= P_1 + jQ_1 = E^2 y_{11}(\cos\psi_{11} + j\sin\psi_{11}) - \\ &- EU y_{12}[\cos(\delta + \psi_{12}) + j\sin(\delta + \psi_{12})]. \end{aligned} \quad (5.17)$$

При выделении активной и реактивной составляющей мощности генерируемой получим:

$$\begin{cases} P_1 = E^2 y_{11} \cos\psi_{11} - EU y_{12} \cos(\delta + \psi_{12}) \\ Q_1 = E^2 y_{11} \sin\psi_{11} - EU y_{12} \sin(\delta + \psi_{12}). \end{cases} \quad (5.18)$$

Для анализа устойчивости генератора в практических расчетах зачастую работают с активной мощностью генератора, которая исходя их выражения (5.18) может быть приведена к синусоидальному виду:

$$P_1 = E^2 y_{11} \sin\alpha_{11} + EU y_{12} \sin(\delta - \alpha_{12}); \quad (5.19)$$

где  $\alpha_{11}$ ,  $\alpha_{12}$  – дополняющие углы, которые определяются как:

$$\alpha_{11} = 90 - \psi_{11}; \quad \alpha_{12} = 90 - \psi_{12}. \quad (5.20)$$

При наличии нескольких источников генерации характеристика активной и реактивной мощности генератора принимает вид [2]:

$$\begin{cases} P_i = E_i^2 y_{ij} \sin \alpha_{ij} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j y_{ij} \sin(\delta_{ij} - \alpha_{ij}); \\ Q_i = E_i^2 y_{ij} \cos \alpha_{ij} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j y_{ij} \cos(\delta_{ij} - \alpha_{ij}). \end{cases} \quad (5.21)$$

### Пример 5.1

Для электрической системы, приведенной на рисунке 5.4, требуется определить взаимные и собственные сопротивления ветви синхронной машины.

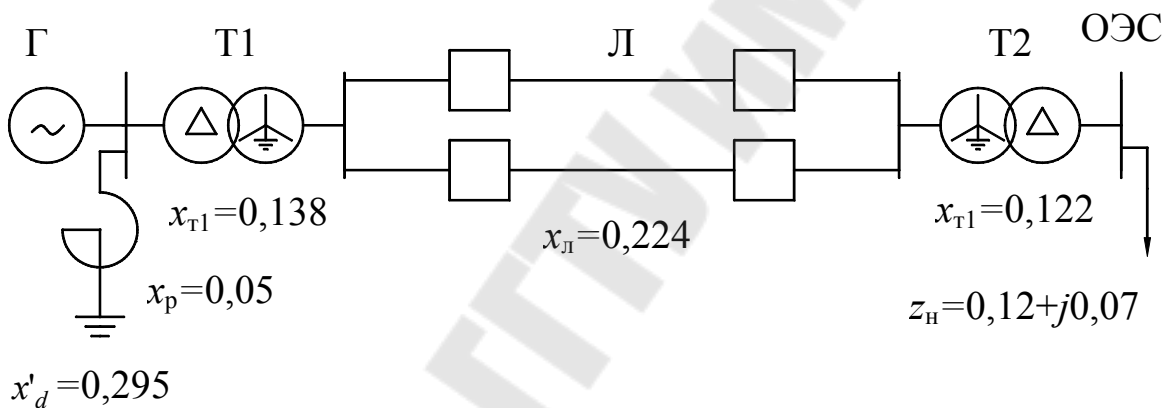


Рисунок 5.4 – Расчетная схема электрической системы

### Решение

Схема замещения расчетной схемы электрической сети приведена на рисунке 5.5.

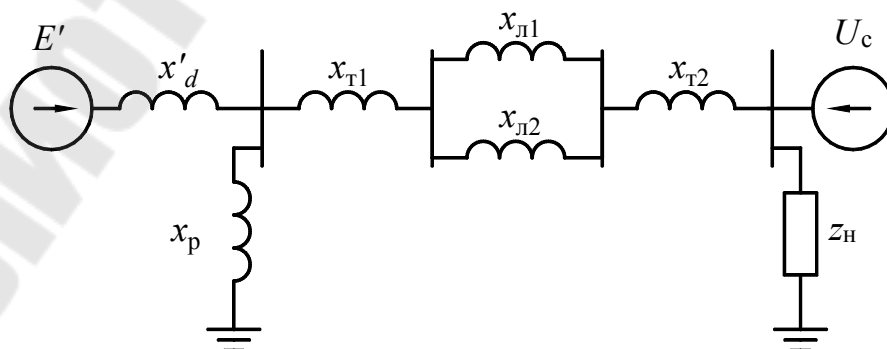


Рисунок 5.5 – Схема замещения расчетной электрической сети

Объединим последовательные сопротивления:

$$x_h = x_{T1} + x_{T1} + x_{Л} = 0,138 + 0,224 + 0,122 = 0,484 \text{ о.е.}$$

Схема после преобразований приведена на рисунке 5.6.

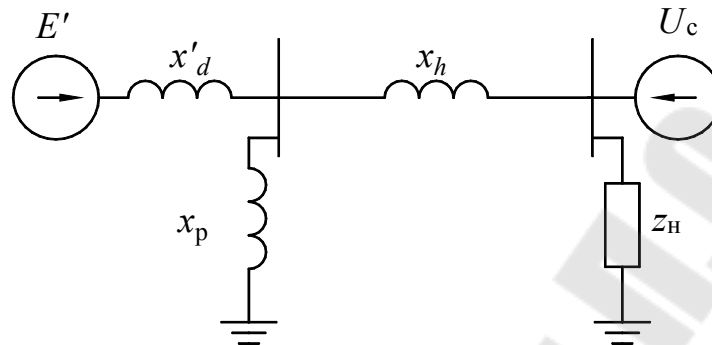


Рисунок 5.6 – Преобразование схемы

Осуществляем переход от треугольника к звезде (рисунок 5.7).

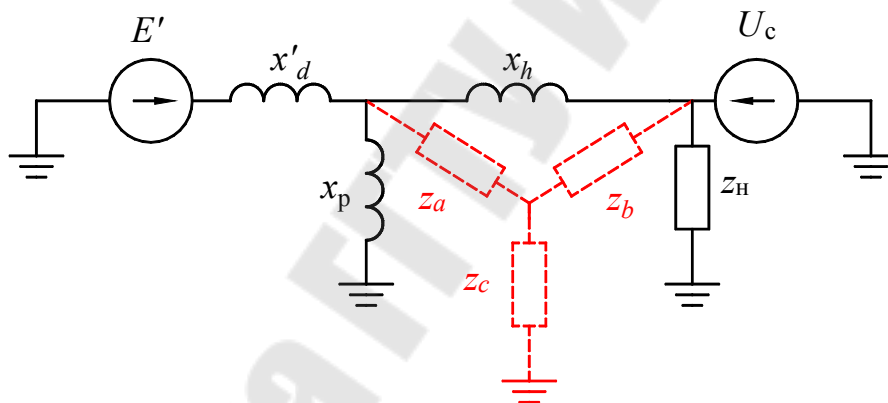


Рисунок 5.7 – Преобразование треугольника к звезде

Определяем сопротивления схемы замещения после преобразования треугольника к звезде:

$$z_a = \frac{jx_p \cdot jx_h}{jx_p + jx_h + \underline{z}_H} = \frac{j0,05 \cdot j0,484}{j0,05 + j0,484 + 0,12 + j0,07} = -0,008 + j0,04 \text{ о.е.}$$

$$z_b = \frac{jx_h \cdot \underline{z}_H}{jx_p + jx_h + \underline{z}_H} = \frac{j0,484 \cdot (0,12 + j0,07)}{j0,05 + j0,484 + 0,12 + j0,07} = 0,082 + j0,072 \text{ о.е.}$$

$$z_c = \frac{jx_p \cdot z_H}{jx_p + jx_h + z_H} = \frac{j0,05 \cdot (0,12 + j0,07)}{j0,05 + j0,484 + 0,12 + j0,07} =$$

$$= 0,009 + j0,008 \text{ о.е.}$$

Схема после преобразований приведена на рисунке 5.8.

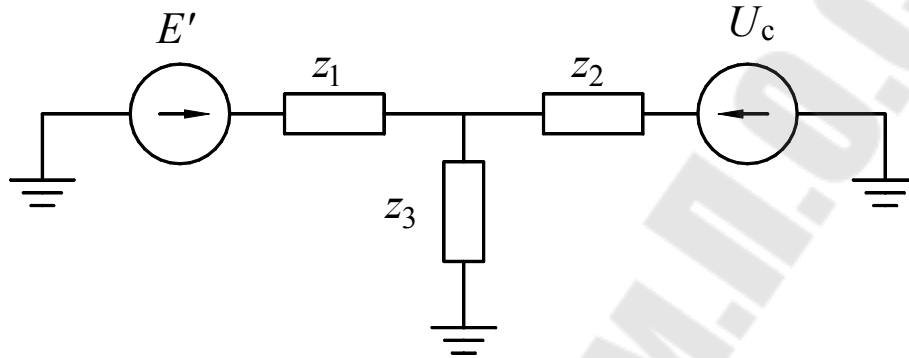


Рисунок 5.8 – Исходная схема замещения

$$z_1 = x'_d + z_a = j0,295 + (-0,008 + j0,04) = -0,008 + j0,335 \text{ о.е.}$$

$$z_2 = z_b = 0,082 + j0,072 \text{ о.е.}$$

$$z_3 = z_c = 0,009 + j0,008 \text{ о.е.}$$

Собственное сопротивление ветви синхронной машины составит:

$$z_{11} = z_1 + \frac{z_2 \cdot z_3}{z_2 + z_3} = -0,008 + j0,335 +$$

$$+ \frac{(0,082 + j0,072) \cdot (0,008 + j0,008)}{0,082 + j0,072 + 0,009 + j0,008} = -0,001 + j0,342 \text{ о.е.}$$

Взаимное сопротивление ветви синхронной машины составит:

$$z_{12} = z_1 + z_2 + \frac{z_1 \cdot z_2}{z_3} = -0,008 + j0,335 + 0,082 + j0,072 +$$

$$\frac{(-0,008 + j0,335) \cdot (0,082 + j0,072)}{0,009 + j0,008} = 0,02 + j3,443 \text{ о.е.}$$

**Пример 5.2**

Определить предел передаваемой мощности и коэффициент запаса статической устойчивости при включении комплексной нагрузки в узле подключения генератора. Расчетная схема приведена на рисунке 5.9.

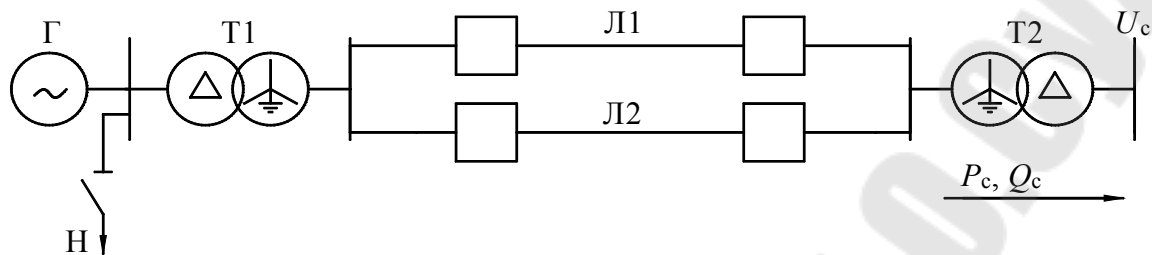


Рисунок 5.9 – Расчетная схема электрической системы

Исходные данные приведены в относительных единицах, где в качестве базисных условий принято:  $S_6 = 280$  МВт;  $U_c = U_6 = 230$  кВ.

Генератор Г:  $x'_{d*} = 0,193$  о.е.;

Трансформатор Т1:  $x_{T1*} = 0,081$  о.е.;

Линия Л:  $x_{Л*} = 0,077$  о.е.;

Трансформатор Т2:  $x_{T2*} = 0,07$  о.е.;

Нагрузка Н:  $P_{Н*} = 0,132$  о.е.;  $Q_{Н*} = 0,086$  о.е.;

Мощность передачи:  $P_{c*} = 1$  о.е.;  $Q_{c*} = 0,8$  о.е.

### Решение

В расчетах индекс системы относительных единиц (\*) опускается.

Для определения сопротивления нагрузки необходимо определить напряжение в начале линии в нормальном режиме:

$$U_H = \sqrt{\left( U_c + \frac{Q_c \cdot x_2}{U_c} \right)^2 + \left( \frac{P_c \cdot x_2}{U_c} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left( 1 + \frac{0,8 \cdot 0,228}{1} \right)^2 + \left( \frac{1 \cdot 0,288}{1} \right)^2} = 1,204 \text{ о.е.}$$

где  $x_2 = x_c = x_{T1} + x_{Л} + x_{T2} = 0,081 + 0,077 + 0,07 = 0,228$  о.е.

Активное сопротивление нагрузки:



$$r_H = \frac{U_H^2}{P_H} = \frac{1,204^2}{0,132} = 10,982 \text{ о.е.}$$

Реактивное сопротивление нагрузки:

$$x_H = \frac{U_H^2}{Q_H} = \frac{1,204^2}{0,086} = 16,856 \text{ о.е.}$$

Сопротивление нагрузки в комплексно форме:

$$z_3 = z_H = r_H + jx_H = 10,982 + j16,856 \text{ о.е.}$$

**Нормальный режим работы**

Переходная ЭДС генератора составит:

$$\begin{aligned} E' &= \sqrt{\left( U_{H^*} + \frac{Q_c \cdot x_1}{U_H} \right)^2 + \left( \frac{P_c \cdot x_1}{U_H} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left( 1,204 + \frac{0,8 \cdot 0,193}{1,204} \right)^2 + \left( \frac{1 \cdot 0,193}{1,204} \right)^2} = 1,34 \text{ о.е.} \end{aligned}$$

где  $x_1 = x'_d = 0,193 \text{ о.е.}$

Результирующее сопротивление системы:

$$x'_{d\Sigma 1} = x'_d + x_{T1} + x_{\text{л}} + x_{T2} = 0,193 + 0,081 + 0,077 + 0,07 = 0,421 \text{ о.е.}$$

Предел передаваемой мощности в нормальном режиме:

$$P_{M1} = \frac{E' U_c}{x'_{d\Sigma}} = \frac{1,34 \cdot 1}{0,421} = 3,183 \text{ о.е.}$$

Характеристика мощности генератора в нормальном режиме:

$$P_1(\delta) = 3,183 \cdot \sin \delta.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости:

$$k_{P1} = \frac{P_{M1} - P_c}{P_c} = \frac{3,183 - 1}{1} = 2,183 \text{ о.е.}$$

### Режим включения нагрузки

Схема замещения после преобразований представлена на рисунке 6.10.

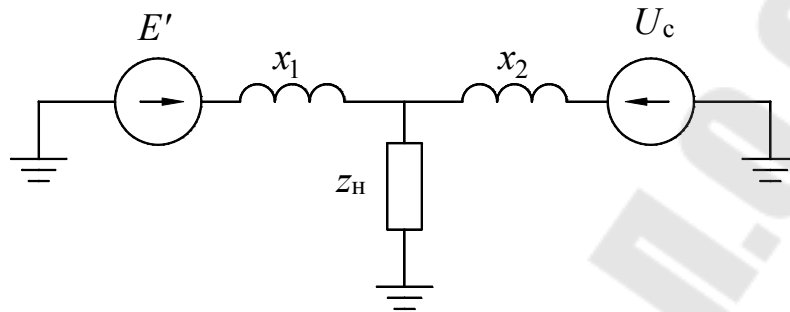


Рисунок 6.10 – Исходная схема замещения

Переходная ЭДС генератора при включении нагрузки:

$$E' = \sqrt{\left( U_H + \frac{(Q_c + Q_H) \cdot (x_1)}{U_H} \right)^2 + \left( \frac{(P_c + P_H) \cdot (x_1)}{U_H} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left( 1,204 + \frac{(0,8 + 0,086) \cdot 0,193}{1,204} \right)^2 + \left( \frac{(1 + 0,132) \cdot 0,193}{1,204} \right)^2} = 1,36 \text{ о.е.}$$

Собственное сопротивление схемы при включении нагрузки:

$$z_{11} = jx_1 + \frac{jx_2 \cdot z_H}{jx_2 + z_H} = j(0,193) + \frac{j0,228 \cdot (10,982 + j16,856)}{j0,228 + (10,982 + j16,856)} =$$

$$= 0,001 + j0,418 = 0,419 e^{j89,8^\circ} \text{ о.е.}$$

$$\alpha_{11} = 90 - \psi_{11} = 90 - 89,8 = 0,2^\circ$$

Взаимное сопротивление при включении нагрузки:

$$z_{12} = jx_1 + jx_2 + \frac{jx_1 \cdot jx_2}{z_H} = j0,193 + j(0,081 + 0,077 + 0,07) +$$

$$+ \frac{j(0,193) \cdot j(0,081 + 0,077 + 0,07)}{(10,982 + j16,856)} =$$

$$= -0,001 + j0,423 = 0,423 e^{j90,2^\circ} \text{ о.е.}$$

$$\alpha_{12} = 90 - \psi_2 = 90 - 90,2 = 0,2^\circ$$

Характеристика мощности при включении нагрузки:

$$P_2 = (E')^2 \frac{1}{|z_{11}|} \cdot \sin \alpha_{11} + (E') \frac{U_c}{|z_{12}|} \cdot \sin(\delta - \alpha_{12}) =$$

$$= P_{11} + P_{12} \cdot \sin(\delta - \alpha_{12}) =$$

$$= 1,36^2 \frac{1}{0,419} \cdot \sin(0,2^\circ) + 1,36 \frac{1}{0,423} \cdot \sin(\delta + 0,2^\circ) =$$

$$= 0,015 + 3,215 \cdot \sin(\delta + 0,2^\circ).$$

Предел передаваемой мощности:

$$P_{M2} = 0,015 + 3,215 = 3,23 \text{ о.е.}$$

Коэффициент запаса статической устойчивости:

$$k_{P2} = \frac{P_{M2} - (P_c + P_H)}{(P_c + P_H)} = \frac{3,23 - (1 + 0,132)}{(1 + 0,132)} = 1,853.$$

Характеристики мощности генератора в нормальном режиме и в режиме включения комплексной нагрузки приведены на рисунке 5.11.

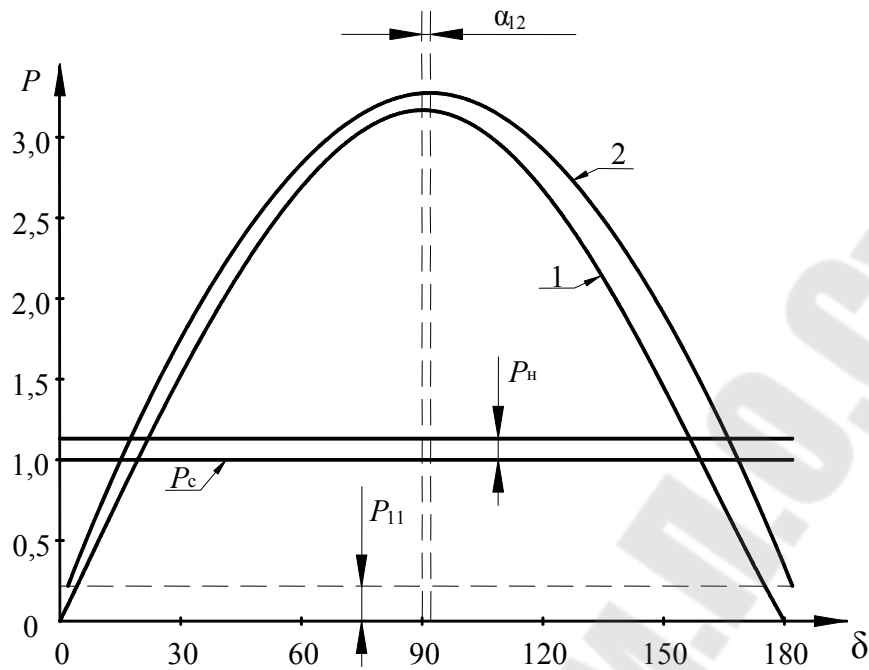


Рисунок 5.11 – Характеристика мощности генератора:  
1 – нормальный режим; 2 – режим включения комплексной нагрузки

### Практическая часть

#### Задача 5.3

Для электрической системы, приведенной на рисунке 5.12, требуется определить взаимные и собственные сопротивления ветви синхронной машины и системы. Генератор оснащен устройством АРВ пропорционального типа.

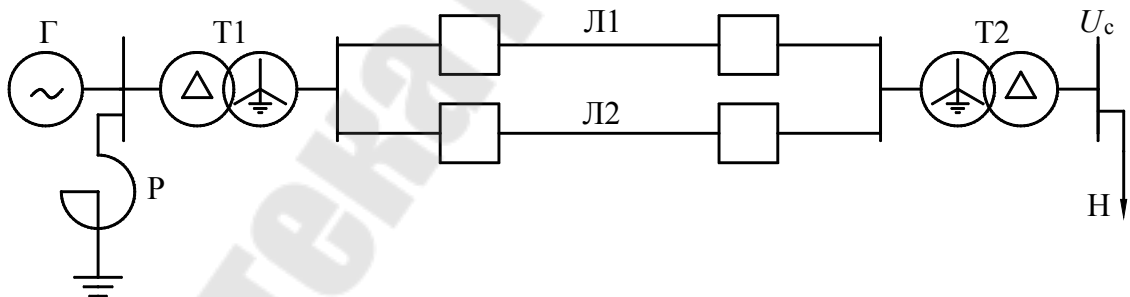


Рисунок 5.12 – Расчетная схема электрической системы

Параметры элементов ЭЭС в соответствии с вариантом задания приведены в таблице П 1.

### Задача 5.4

Определить предел передаваемой мощности и коэффициент запаса статической устойчивости для схемы рисунка 5.13. Генератор оснащен устройством АРВ пропорционального действия.

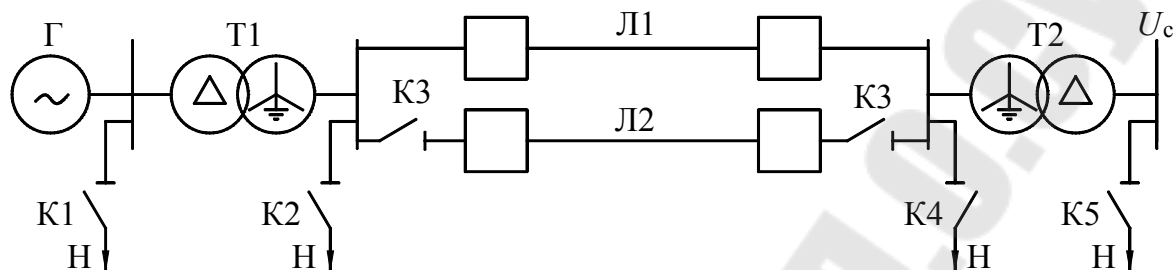


Рисунок 5.13 – Расчетная схема электрической системы

Параметры элементов ЭЭС в соответствии с вариантом задания приведены в таблице П 1. Вид нормального и переходного режима принять согласно таблице П 3.

## Практическая работа № 6:

### Расчет предельной мощности и запаса статической устойчивости генераторов при включении поперечного чисто реактивного сопротивления (шунтирующего реактора, конденсаторной батареи)

#### Краткие теоретические сведения

Шунтирующие реакторы (ШР) предназначены для компенсации избыточной реактивной мощности, генерируемой линиями электропередач, в высоковольтных электрических сетях [6]. Подключение реактора осуществляется наглухо или через выключатели концевых линий электропередач длиной свыше 300 км для предотвращения появления перенапряжений при коммутационных переключениях (рисунок 6.1).

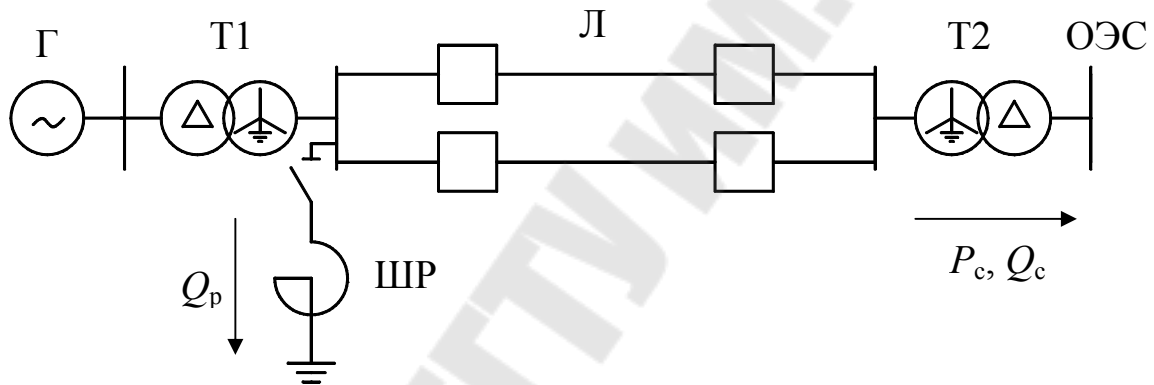


Рисунок 6.1 – Схема электрической сети при включении ШР

При отсутствии активных сопротивлений в схеме, то вещественные составляющие собственных и взаимных проводимостей равны нулю. В результате угол  $\psi_{11}$  и  $\psi_{12}$  в формуле (5.20) составят  $90^\circ$ , а  $\alpha_{11}$  и  $\alpha_{12}$  –  $0^\circ$  соответственно. Тогда характеристика мощности генератора в соответствии с формулой (5.19) при включении шунтирующего реактора упростится до вида:

$$P_1 = EUy_{12} \sin \delta = \frac{EU}{z_{12}} \sin \delta, \quad (6.1)$$

где  $z_{12}$  – взаимное сопротивление схемы:

$$\underline{z}_{12} = \underline{z}_1 + \underline{z}_2 + \frac{z_1 z_2}{jx_p}, \quad (6.2)$$

где  $x_p$  – сопротивление шунтирующего реактора.

Конденсаторные батареи (КБ) иногда устанавливаются и подключаются в промежуточных точках линий электропередач с целью поддержания нормальных уровней напряжений при больших перетоках мощности (рисунок 6.2).

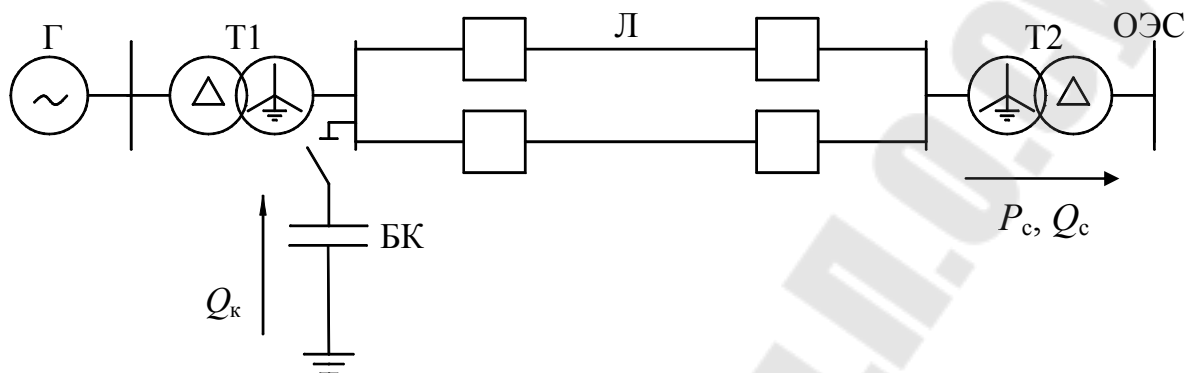


Рисунок 6.2 – Схема электрической сети при включении ШР

При подключении КБ уравнение, описывающее угловую характеристику мощности генератора, будет аналогично уравнению (6.1), за исключением того, что в схеме замещения появляется элемент с отрицательным реактивным сопротивлением  $Z_3 = -jx_c$ . Тогда взаимное сопротивление схемы при включении БК определяется по формуле:

$$\underline{z}_{12} = \underline{z}_1 + \underline{z}_2 + \frac{\underline{z}_1 \underline{z}_2}{-jx_k}, \quad (6.3)$$

где  $x_k$  – сопротивление БК.

### Пример 6.1

Для системы, приведенной на рисунке 6.1, требуется:

1. Оценить влияние шунтирующего реактора на статическую устойчивость системы при работе генератора без АРВ.
2. Оценить влияние АРВ пропорционального типа на устойчивость системы при наличии шунтирующего реактора.

Исходные данные:

- генератор:  $P_H = 100$  МВт;  $\cos \varphi_H = 0,8$ ;  $U_H = 10,5$  кВ;  $x_{*d} = 2,1$  о.е.;  $x'_{d*} = 0,461$ ;
- трансформатор Т1:  $S_H = 160$  МВА;  $U_H = 11/242$  кВ;  $U_k = 11$  %;
- линия:  $x_0 = 0,4$  Ом/км;  $l = 300$  км;

- трансформатор Т2:  $S_H=200$  МВА;  $U_H=230/121$  кВ;  $U_K=11$  %;
- передаваемая мощность  $P_c = 80$  МВт и  $Q_c = 26,4$  МВАр.
- мощность реактора  $Q_p = 55$  МВАр.

### Решение

Принимаем базисные величины. За базисное напряжение принимаем среднее напряжение системы  $U_6 = 115$  кВ, за базисную мощность принимаем передаваемую активную мощность в энергосистему  $S_6 = P_c = 80$  МВт. Схема замещения электрической сети в нормальном режиме приведена на рисунке 6.3.

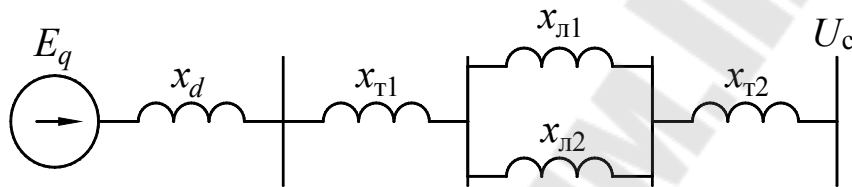


Рисунок 6.3 – Схема замещения электрической схемы в нормальном режиме с генератором без АРВ

### Исходный режим: генератор без АРВ, ШР отключен

Результаты расчета параметров схемы и угловой характеристики мощности синхронного генератора, не оснащенного устройством АРВ, приведены в примере 3.1. Угловая характеристика мощности определяется зависимостью:

$$P_{E_q}(\delta) = \frac{E_q \cdot U_c}{x_{d\Sigma}} \sin(\delta) = \frac{2,15 \cdot 1}{1,534} \sin(\delta) = 1,4 \sin(\delta).$$

Предел передаваемой мощности составит:

$$P_{M1} = \frac{E_q \cdot U_c}{x_{d\Sigma}} = \frac{2,15 \cdot 1}{1,534} = 1,4 \text{ о.е.}$$

Коэффициент запаса статической устойчивости по мощности:

$$k_{P1} = \frac{P_{M1} - P_c}{P_c} = \frac{1,4 - 1}{1} = 0,4 \text{ о.е.}$$



### Режим включения ШР с генератором без АРВ

На рисунке 6.4 приведена схема замещения при включении реактора.

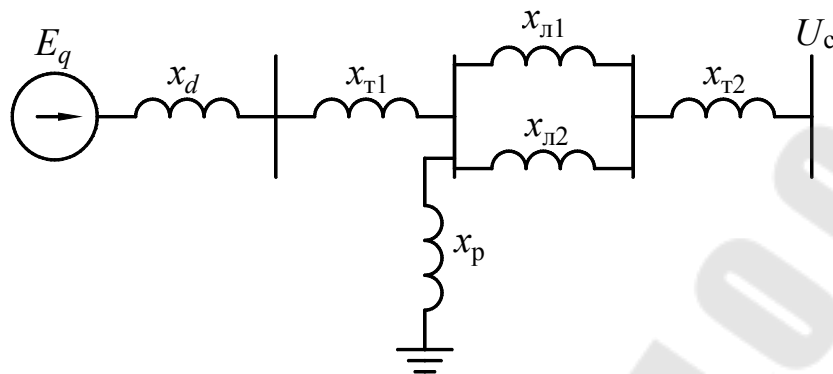


Рисунок 6.4 – Схема замещения электрической схемы при включении реактора

Мощность реактора в относительных единицах:

$$Q_p = \frac{Q_p}{S_6} = \frac{55}{80} = 0,688 \text{ о.е.}$$

Определяем напряжение в узле подключения реактора:

$$\begin{aligned} U_p &= \sqrt{\left( U_c + \frac{Q_c \cdot (x_{T2} + x_{Л})}{U_{c*}} \right)^2 + \left( \frac{P_c \cdot (x_{T2} + x_{Л})}{U_{c*}} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left( 1 + \frac{0,33 \cdot (0,044 + 0,091)}{1} \right)^2 + \left( \frac{1 \cdot (0,044 + 0,091)}{1} \right)^2} = 1,052 \text{ о.е.} \end{aligned}$$

Сопротивление реактора составит:

$$x_p = \frac{U_p^2}{Q_p} = \frac{1,052^2}{0,688} = 1,609 \text{ о.е.}$$

Взаимное сопротивление ветви генератора определяется по формуле:

$$x_1 = x_d + x_{T1} = 1,344 + 0,055 = 1,399 \text{ о.е.}$$

$$x_2 = x_{Л} + x_{T2} = 0,091 + 0,044 = 0,135 \text{ о.е.}$$

$$x_3 = x_p = 1,609 \text{ о.е.}$$

$$x_{12} = z_1 + z_2 + \frac{z_1 \cdot z_2}{z_3} = 1,399 + 0,135 + \frac{1,399 \cdot 0,135}{1,609} = 1,651 \text{ о.е.}$$

Предел мощности при включении шунтирующего реактора составит в схеме с генератором без АРВ:

$$P_{M2} = \frac{E_q \cdot U_c}{x_{12}} = \frac{1,18 \cdot 1}{1,651} = 0,715 \text{ о.е.}$$

### Режим включения ШР (генератор с АРВ ПД)

Определяем переходное сопротивление генератора:

$$x'_d = x'_{d*} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_H} = 0,461 \cdot \frac{80}{100/0,8} = 0,295 \text{ о.е.}$$

Определяем переходную ЭДС генератора с учетом перетока мощности к реактору:

$$\begin{aligned} E' &= \sqrt{\left( U_p + \frac{(Q_c + Q_p) \cdot (x_{T1} + x'_d)}{U_p} \right)^2 + \left( \frac{P_c \cdot (x_{T1} + x'_d)}{U_p} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left( 1,052 + \frac{(0,33 + 0,688) \cdot (0,055 + 0,295)}{1,052} \right)^2 + \left( \frac{1 \cdot (0,055 + 0,295)}{1,052} \right)^2} = \\ &= 1,503 \text{ о.е.} \end{aligned}$$

Взаимное сопротивление ветви генератора определяется по формуле:

$$x_1 = x'_d + x_{T1} = 0,295 + 0,055 = 0,35 \text{ о.е.}$$

$$x_2 = x_{T1} + x_{T2} = 0,091 + 0,044 = 0,135 \text{ о.е.}$$

$$x_3 = x_p = 1,609 \text{ о.е.}$$

$$x_{12} = x_1 + x_2 + \frac{x_1 \cdot x_2}{x_3} = 0,35 + 0,135 + \frac{0,35 \cdot 0,135}{1,609} = 0,514 \text{ о.е.}$$

Предел передаваемой мощности составит:

$$P_{M3} = \frac{E'_q \cdot U_c}{z_{12}} = \frac{1,503 \cdot 1}{0,514} = 2,92 \text{ о.е.}$$

Характеристики мощности генератора для трех режимов работы приведены на рисунке 6.5.

Таким образом, включения шунтирующего реактора в схеме с генератором не оснащен устройством АРВ, приводит к снижению предела передаваемой мощности, в то время как при наличии АРВ это влияние носит обратный характер.

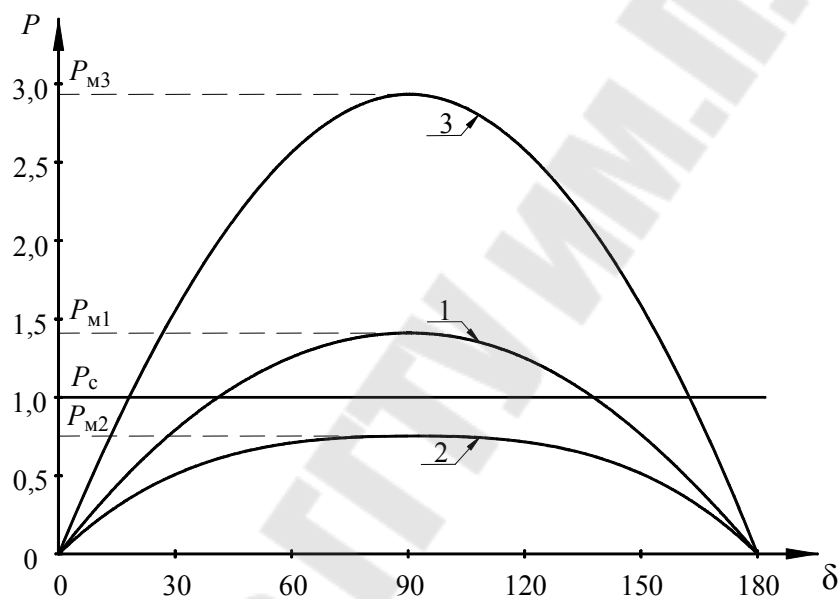


Рисунок 6.5 – Характеристика мощности генератора:

1 – нормальный режим; 2 – режим включения шунта (генератор без АРВ); 3 – режим включения шунта (генератор с АРВ).

## Практическая часть

### Задача 6.2

Определить предел передаваемой мощности и коэффициент запаса статической устойчивости для нормального режима и режима включения шунтирующего реактора в конце линии электрической сети, приведенной на рисунке 5.6. Генератор оснащен устройством АРВ сильного действия (сопротивление генератора принять равным нулю).

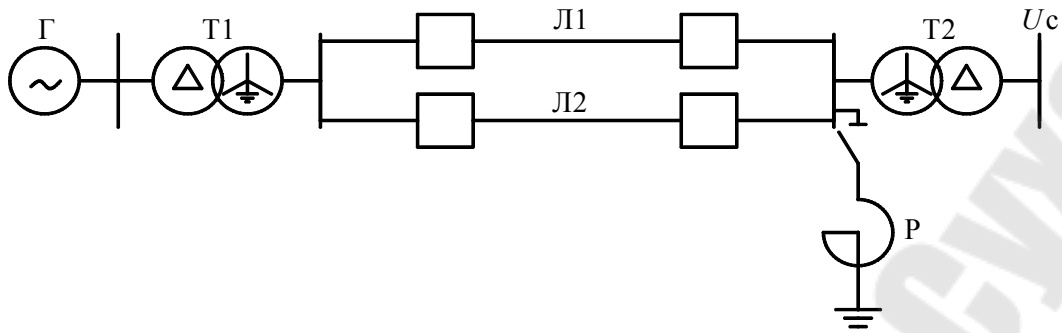


Рисунок 5.6 – Расчетная схема электрической системы

Параметры элементов ЭЭС в соответствии с вариантом задания приведены в таблице П 1.

### Задача 6.3

Оценить влияние конденсаторной батареи на статическую устойчивость для трех режимов работы:

1. генератора работает без АРВ, БК отключена;
2. генератора работает без АРВ, БК включена;
3. генератора работает с АРВ, БК включена;

Исходная схема электрической сети приведена на рисунке 6.2. Параметры элементов ЭЭС в соответствии с вариантом задания приведены в таблице П 1.

**Практическая работа № 7:**  
**Расчет устойчивости комплексной нагрузки по практическим критериям**

**Краткие теоретические сведения**

Нагрузка электроэнергетических систем состоит из различного рода потребителей, в которой значительную долю занимают электрические двигатели. Оценка устойчивости в узле нагрузки, где подключено множество электродвигателей не может основываться на критерии  $dP/ds > 0$ , поскольку в практических условиях эквивалентную мощность и скольжение группы двигателей определить невозможно.

Одним из практических критериев устойчивости нагрузки является положительный знак производной ЭДС генераторов по напряжению в узле подключения нагрузки [2]:

$$\frac{dE_q}{dU_H} > 0. \quad (7.1)$$

В таком случае границей устойчивости нагрузки является точка перелома функции, где производная равна нулю  $dE/dU = 0$ .

В случае, если узел содержит разные элементы нагрузки и разное количество генераторов удобно пользоваться критерием [2, 7, 11]:

$$\frac{d\Delta Q}{dU_H} < 0. \quad (7.2)$$

где  $\Delta Q$  – небаланс реактивной мощности генерируемой электростанциями  $Q_{Г\Sigma}$  и потребляемой нагрузкой  $Q_H$ .

**Пример 7.1**

Мощность, потребляемая нагрузкой, меняется в зависимости от напряжения у шин приемной системы. Проверить статическую устойчивость нагрузки по критерию  $dE_q/dU_H > 0$ . Определить коэффициент запаса устойчивости по напряжению. Расчетная схема приведена на рисунке 7.1.

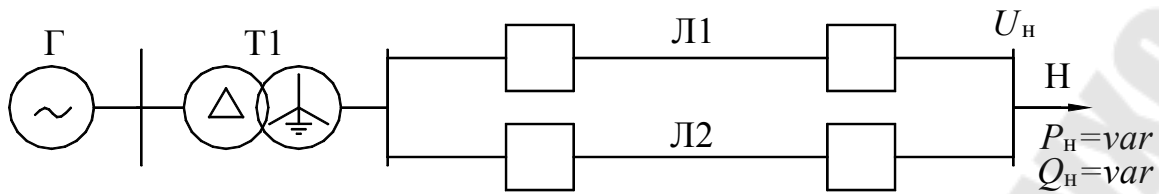


Рисунок 7.1 – Расчетная схема электрической системы

Параметры схемы замещения приведены в относительных единицах. Исходные данные схемы:

- генератор Г:  $x'_d = 1,1$  о.е.;
- трансформатор Т1:  $x_{Т1} = 0,1$  о.е.;
- линия Л:  $x_{Л} = 0,2$  о.е.

Статические характеристики нагрузки приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1

### Статические характеристики нагрузка

Наименование параметра	Значение				
Напряжение на нагрузке $U_{н}$ , о.е.	1	0,9	0,85	0,8	0,7
Активная мощность нагрузки $P_{н}$ , о.е.	0,8	0,75	0,715	0,71	0,74
Реактивная мощность нагрузки $Q_{н}$ , о.е.	0,6	0,531	0,52	0,51	0,52

### Решение

Вычисляем зависимость  $E_q = f(U_{н})$ , задаваясь значением  $U_{н}$  на шинах нагрузки и определяя по статической характеристике  $P_{н}$  и  $Q_{н}$ .

Суммарное сопротивление системы составит:

$$x'_{d\Sigma} = x'_d + x_{Т1} + x_{Л} = 1,1 + 0,1 + 0,2 = 1,4 \text{ о.е.}$$

При значениях  $U_{н}=1$  о.е.,  $P_{н}=0,8$  о.е.,  $Q_{н}=0,6$  о.е. синхронная ЭДС неявнополюсного генератора в простейшей системе составит:

$$E' = \sqrt{\left( U_{н} + \frac{Q_{н} \cdot x'_{d\Sigma}}{U_{н}} \right)^2 + \left( \frac{P_{н} \cdot x'_{d\Sigma}}{U_{н}} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left( 1 + \frac{0,6 \cdot 1,4}{1} \right)^2 + \left( \frac{0,8 \cdot 1,4}{1} \right)^2} = 2,15 \text{ о.е.}$$

Результаты ЭДС генератора для остальных режимов аналогичны и сведены в таблицу 7.2.

Таблица 7.2

### Результаты расчета ЭДС генератора

Наименование параметра	Значение				
Напряжение на нагрузке $U_H$ , о.е.	1	0,9	0,85	0,8	0,7
Активная мощность нагрузки $P_H$ , о.е.	0,8	0,75	0,715	0,71	0,68
Реактивная мощность нагрузки $Q_H$ , о.е.	0,6	0,531	0,52	0,51	0,52
Сопротивление системы $x'_{d\Sigma}$ , о.е.	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
ЭДС генератора $E'$ , о.е.	2,15	2,08	2,07	2,10	2,21

На рисунке 7.2 приведена зависимость функции  $E' = f(U_H)$ .

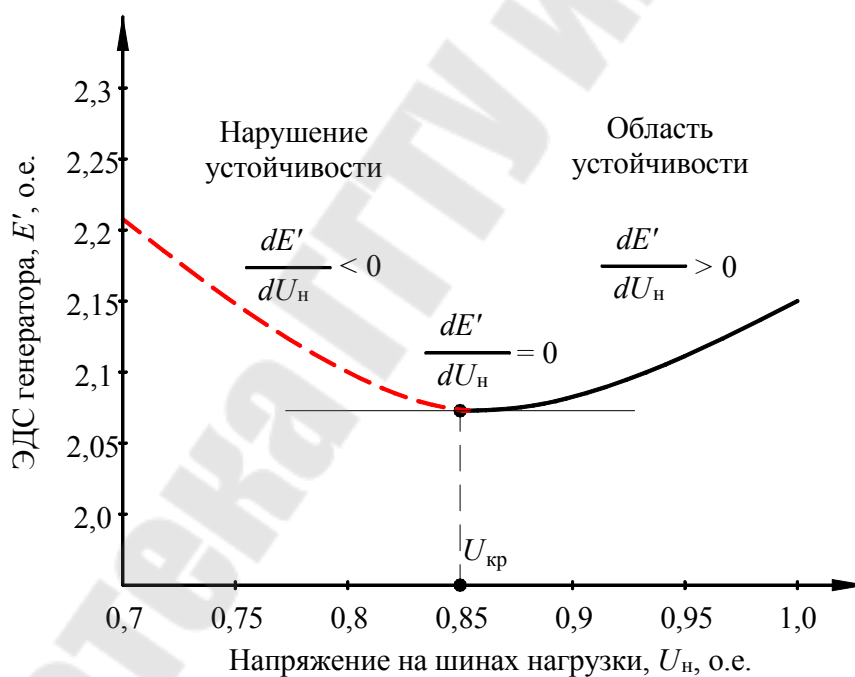


Рисунок 7.2 – Зависимость  $E' = f(U_H)$

Критическое напряжение вычислено в точке, где производная меняет знак, т.е. при  $\frac{dE'}{dU_H} = 0$ :

$$U_{кр} = 0,85 \text{ о.е.}$$

Коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению составит:

$$k_U = \frac{U_0 - U_{кр}}{U_{кр}} \cdot 100\% = \frac{1 - 0,85}{0,85} \cdot 100\% = 17,6\%.$$

### Пример 7.2

Электрическая система представлена схемой замещения, содержащей одну эквивалентную станцию и нагрузку. Реактивное сопротивление системы составляет  $x'_{d\Sigma} = 0,8$  о.е.

Статические характеристики нагрузки приведены в таблице 7.3.

Таблица 7.3

### Статические характеристики нагрузки

Наименование параметра	Значение					
Напряжение на нагрузке $U_H$ , о.е.	1,05	1	0,95	0,9	0,8	0,7
Активная мощность нагрузки $P_H$ , о.е.	0,926	0,9	0,874	0,848	0,804	0,707
Реактивная мощность нагрузки $Q_H$ , о.е.	1,12	1,00	0,92	0,89	0,96	1,21

Расчетная схема к задаче приведена на рисунке 7.3.

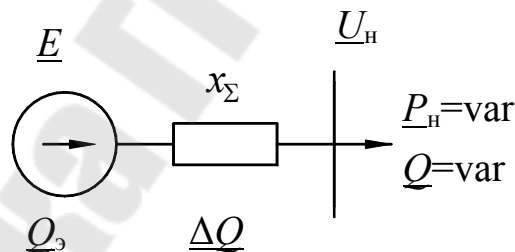


Рисунок 7.3 – Расчетная схема СЭС

Требуется проверить устойчивость нагрузки указанной системы, построив зависимость  $\Delta Q = f(U_H)$  и воспользовавшись критерием комплексной нагрузки  $d\Delta Q/U < 0$ . В расчетах принять неизменность эквивалентной ЭДС электрических станций.

### Решение

Для оценки устойчивости нагрузки по критерию  $d\Delta Q/dU_H < 0$  необходимо построить зависимость генерируемой реактивной мощности электростанций и потребляемой нагрузкой от напряжения в уз-



ле нагрузки.

Для определения реактивной мощности генерации необходимо произвести серию расчетов с изменением режимов электрической сети по формуле:

$$Q_{г\Sigma} = \sqrt{\left(\frac{E_3 \cdot U_H}{x_\Sigma}\right)^2 - P_H^2} - \frac{U_H^2}{x_\Sigma} \quad (7.3)$$

где  $E_3$  – эквивалентная ЭДС генерирующих источников в исходном режиме при  $U_H=1$  о.е.

При значениях  $U_H=1$  о.е.,  $P_H=0,9$  о.е.,  $Q_H=1,0$  о.е. эквивалентная ЭДС генераторов составит:

$$E_3 = \sqrt{\left(U_H + \frac{Q_H \cdot x_\Sigma}{U_H}\right)^2 + \left(\frac{P_H \cdot x_\Sigma}{U_H}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{1 \cdot 0,8}{1}\right)^2 + \left(\frac{0,9 \cdot 0,8}{1}\right)^2} = 1,94 \text{ о.е.}$$

Реактивная мощность генерации в первом режиме составит:

$$Q_{г\Sigma} = \sqrt{\left(\frac{E_q \cdot U_H}{x_\Sigma}\right)^2 - P_H^2} - \frac{U_H^2}{x_\Sigma} = \sqrt{\left(\frac{1,94 \cdot 1}{0,8}\right)^2 - 0,9^2} - \frac{1^2}{0,8} = 1,0 \text{ о.е.}$$

Для остальных точек расчет аналогичен и сведен в таблицу 7.4.

Таблица 7.4

### Результаты расчета

Показатели	Значения					
	1,05	1	0,95	0,9	0,8	0,7
Напряжение на нагрузке, $U_H$ , о.е.	1,05	1	0,95	0,9	0,8	0,7
Активная мощность нагрузки, $P_H$ , о.е.	0,926	0,9	0,874	0,848	0,804	0,707
Реактивная мощность нагрузки, $Q_H$ , о.е.	1,12	1,00	0,92	0,88	0,94	1,16
Сопrotивление системы, $x_\Sigma$ , о.е.	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ЭДС генератора при $U_H=1$ , о.е.	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94
Реактивная мощность генерации $Q_{г\Sigma}$ , о.е.	0,99	1,00	1,00	1,00	0,96	0,93
Небаланс реактивной мощности $\Delta Q$ , о.е.	-0,13	0,00	0,08	0,11	0,03	-0,23

Графическая интерпретация полученных результатов приведена

на рисунке 7.4.

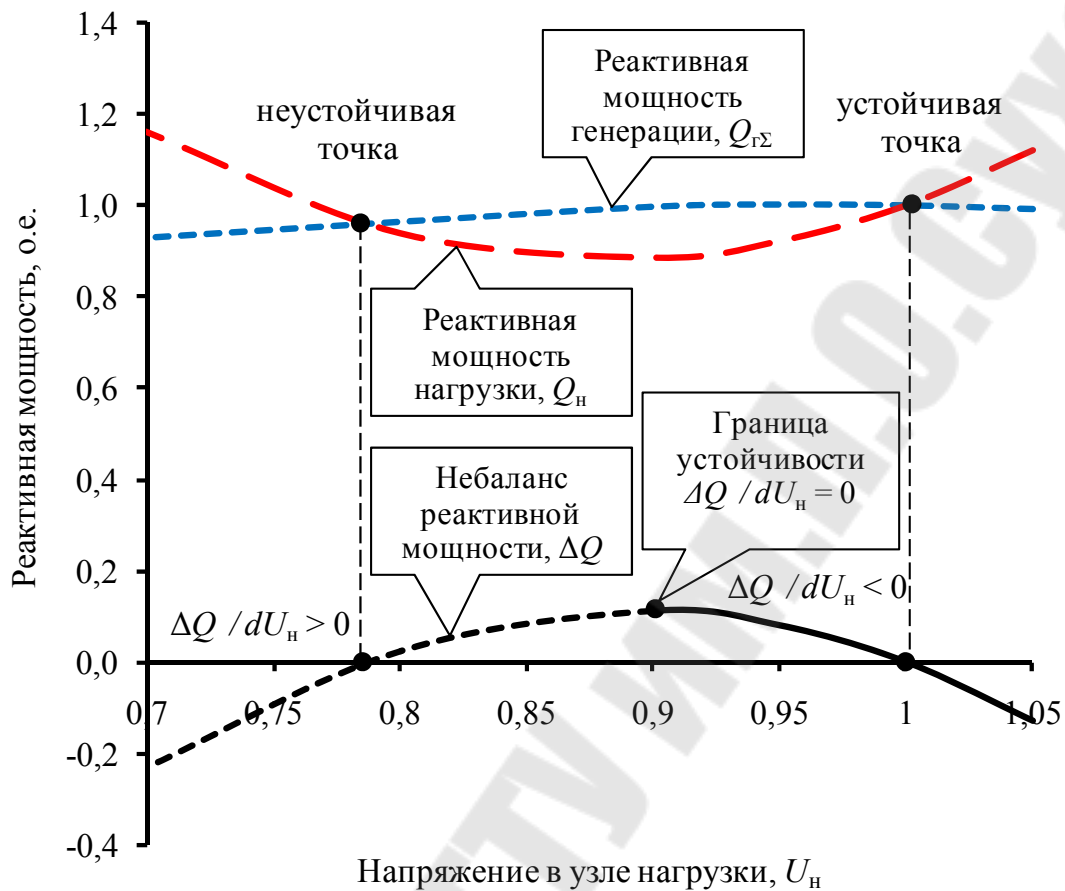


Рисунок 7.4 – Зависимость  $\Delta Q = f(U_n)$

Таким образом, граница статической устойчивости определяется критическим значением напряжения в узле нагрузки, где производная  $d\Delta Q/dU_n$  меняет знак, что соответствует значению  $U_n = 0,9$  о.е.

### Практическая часть

#### Задача 7.3

Графически проверить статическую устойчивость нагрузки по критерию  $dE_q/dU_n > 0$  и определить коэффициент запаса статической устойчивости при включении и отключении одной цепи линии в схеме с генератором оснащенным устройством АРВ пропорционального типа. Графически определить критическое значение ЭДС генератора. Расчетная схема приведена на рисунке 7.1. Статические характеристики нагрузки приведены в таблице 7.5.

Реактивное сопротивление генератора  $x'_{d\Sigma}$  принять в соответствии с таблицей П 4, остальные значений сопротивлений схемы при-

нять – в соответствии с исходными данными задания 7.1.

Таблица 7.5 – Статические характеристики нагрузки

Напряжение на нагрузке $U_H$ , о.е.	1	0,9	0,85	0,8	0,7
Активная мощность нагрузки $P_H$ , о.е.	0,8	0,75	0,715	0,71	0,7
Реактивная мощность нагрузки $Q_H$ , о.е.	0,6	0,531	0,52	0,51	0,55

#### Задача 7.4

Мощность, потребляемая нагрузкой, меняется в зависимости от напряжения у шин приемной системы в соответствии с уравнениями:

- активная мощность:

$$P_H(U_H) = 0,6 + 0,4 \cdot U_H, \quad (7.4)$$

- реактивная мощность:

$$Q_H(U_H) = \frac{5,6}{\operatorname{tg}\varphi_H} - \frac{11,2}{\operatorname{tg}\varphi_H} \cdot U_H + \left( \frac{5,6}{\operatorname{tg}\varphi_H} + 1 \right) \cdot U_H^2, \quad (7.5)$$

где  $\operatorname{tg}\varphi_H$  – коэффициент реактивной мощности в исходном режиме.

Графически проверить статическую устойчивость нагрузки по критерию  $dE/dU_H > 0$ . Определить коэффициент запаса устойчивости по напряжению. Расчетная схема приведена на рисунке 7.1.

Реактивное сопротивление системы  $x'_{d\Sigma}$  и величину  $\operatorname{tg}\varphi_H$  принять в соответствии с таблицей П 4.

#### Задача 7.5

Аналитически проверить статическую устойчивость нагрузки по критерию  $dE/dU > 0$  при известной зависимости изменения ЭДС генератора от напряжения на шинах нагрузки  $E = f(U_H)$ . Определить критическое значение напряжения на шинах нагрузки, критическую ЭДС генератора и коэффициент запаса статической устойчивости.

Исходные данные к задаче приведены в таблице П 4.

**Практическая работа № 8:**  
**Расчет динамической устойчивости электрической**  
**системы методом площадей. Определение предельного угла**  
**отключения короткого замыкания**

**Краткие теоретические сведения**

Для оценки динамической устойчивости системы необходимо иметь зависимость  $\delta = f(t)$  во время переходного процесса, которую получают путем решения дифференциального уравнения движения ротора синхронного генератора [2]:

$$T_j \frac{d\delta^2}{dt^2} = P_0 - P_m \sin \delta, \quad (8.1)$$

где  $T_j$  – постоянная инерции ротора генератора, рад;  $\delta$  – угол сдвига между ЭДС генератора  $E_q$  и напряжением системы  $U_c$ , рад;  $t$  – время переходного процесс, рад;  $P_0, P_c$  – мощность турбины для простейшей системы равная мощности перетока в энергосистему, о.е.;  $P_m$  – предел передаваемой мощности генератора, о.е.

Постоянная инерции ротора электрического агрегата (двигателя, генератора) доходит до десятков секунд и определяется в зависимости от справочных данных по формуле [8]:

$$T_j = J \frac{\omega_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}} = \frac{GD^2}{4} \frac{(2\pi n_{\text{ном}} / 60)}{S_{\text{ном}}} = \frac{2,74 \cdot GD^2 n_{\text{н}}^2}{S_{\text{ном}}}, \text{ с}, \quad (8.2)$$

где  $J$  – момент инерции ротора синхронной машины, кг·м<sup>2</sup>;  $\omega_{\text{ном}}$  – номинальная угловая скорость вращения ротора, рад/с;  $GD = GD_{\text{д}} + GD_{\text{м}}$  – суммарный маховый момент двигателя  $GD_{\text{д}}$  и механизма  $GD_{\text{м}}$ , Т·м<sup>2</sup>;  $n_{\text{ном}}$  – номинальная скорость вращения, об/мин;  $S_{\text{ном}}$  – номинальная мощность, кВА.

Если в качестве базисной величины выбрана мощность, отличающаяся от мощности элемента, параметры которого приводятся к базисной величине, то соответствующие постоянные инерции приводятся к базису по формуле [9]:

$$T_{j^*} = T_j \frac{S_H}{S_\delta}. \quad (8.3)$$

Если в схеме имеется несколько агрегатов постоянные инерции, которых необходимо привести к базисным условиям, то для них определяются эквивалентные постоянные инерции [9, 10]:

$$T_{j\text{экв}^*} = T_j \frac{n_{\text{ген}} P_H / \cos \varphi_H}{S_\delta} = T_j \frac{n_{\text{ген}} S_H}{S_\delta}, \quad (8.4)$$

где  $n_{\text{ген}}$  – количество синхронных машин.

Очень часто в расчетах осуществляются переходы системных единиц от радиан к секундам, либо от радиан к градусам, а относительные единицы могут быть выражены через именованные [6, 11]. Формы уравнения движения ротора генератора приведены в таблице 8.1.

Таблица 8.1

### Формы уравнения движения ротора генератора

Уравнение движения ротора генератора	Постоянная времени инерции, $T_j$	Время переходного процесса, $t$	Угол между вектором ЭДС и напряжением системы, $\delta$	Мощность, $P$
$T_j \frac{d\delta^2}{dt^2} = P_0 - P_m \sin \delta$	рад	рад	рад	о.е.
$\omega_0 T_j \frac{d\delta^2}{dt^2} = P_0 - P_m \sin \delta$	с	рад	рад	о.е.
$\frac{T_j}{\omega_0} \frac{d\delta^2}{dt^2} = P_0 - P_m \sin \delta$	с	с	рад	о.е.
$\frac{T_j}{360 f_0} \frac{d\delta^2}{dt^2} = P_0 - P_m \sin \delta$	с	с	эл. град	о.е.
$\frac{T_j S_\delta}{360 f_0} \frac{d\delta^2}{dt^2} = P_0 - P_m \sin \delta$	с	с	эл. град	кВт

Примечание:

$f_0$  – номинальная частота сети, 50 Гц;  $\omega_0 = 2\pi f_0$  – угловая частота сети, рад/с;  
 $S_6$  – базисная мощность, кВт;  $P [\text{о.е.}] = P [\text{кВт}] / S_6 [\text{кВА}]$ .

Переход от одной формы записи к другой осуществляется по следующим соотношениям [6]:

$$\begin{aligned} t[\text{рад}] &= \omega_0 t \left[ \frac{\text{рад}}{\text{с}} \cdot \text{с} \right]; \\ \delta[\text{рад}] &= \frac{2\pi}{360} \delta[\text{эл.град}]. \end{aligned} \quad (8.5)$$

Для анализа динамической устойчивости системы необходимо решить дифференциальное уравнение движение ротора. Однако в простейших случаях решение дифференциального уравнения затруднительно из-за своей нелинейности. Тогда для оценки устойчивости системы используют метод площадей, в соответствии с которым, определяется площадка ускорения  $F_{\text{уск}}$  и торможения  $F_{\text{торм}}$  на характеристике мощности генератора. Величина  $F_{\text{уск}}$  в физическом понимании определяет ускорение ротора в момент возникающего положительного небаланса  $\Delta P = P_0 - P_m \sin \delta$ , т.е. когда мощность турбины в данный момент времени больше мощности генератора. Величина  $F_{\text{торм}}$  определяет потенциальную энергию торможения в результате отрицательного небаланса мощностей  $\Delta P$ .

Предельный угол отключения генератора определяется из равенства площадок ускорения  $F_{\text{уск}}$  и торможения  $F_{\text{торм}}$ , а сохранение динамической устойчивости следуют в случае, если площадка торможения больше площадки ускорения:

$$F_{\text{уск}} \leq F_{\text{торм}}. \quad (8.6)$$

Из условия динамической устойчивости определяется величина коэффициента запаса:

$$K_{\text{ду}} = \frac{F_{\text{торм}} - F_{\text{уск}}}{F_{\text{уск}}}. \quad (8.7)$$

### Пример 8.1

В схеме отключаются обе линии, связывающие генераторную станцию с шинами бесконечно большой мощности. Определить то наибольшее допустимое время перерыва в подаче энергии, при котором динамическая устойчивость системы не нарушится.

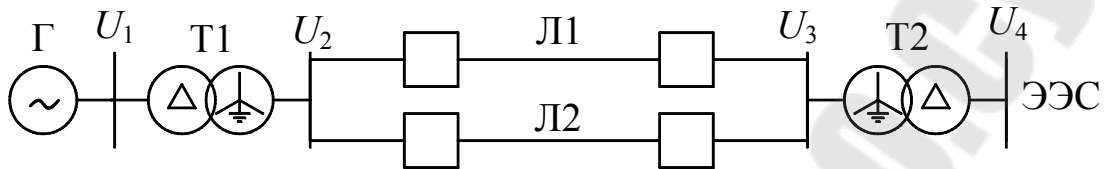


Рисунок 8.1 – Расчетная схема электрической системы

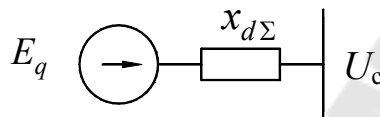


Рисунок 8.2 – Схема замещения электрической сети

Исходные данные к схеме:

$$E_q = 1,55 \text{ о.е.}; \quad \delta_0 = 25,6^\circ; \quad T_j = 7 \text{ с}; \quad x_{d\Sigma} = 1,15 \text{ о.е.}; \quad P_0 = 0,584 \text{ о.е.}$$
$$U_c = 1 \text{ о.е.}$$

### Решение

Определяем предел передаваемой мощности синхронной машины:

$$P_M = \frac{E_q \cdot U_c}{x_{d\Sigma}} = \frac{1,55 \cdot 1}{1,15} = 1,35 \text{ о.е.}$$

Критический угол, допустимый в процессе качания генератора:

$$\delta_{\text{кр}} = 180 - \arcsin \frac{P_0}{P_M} = 180 - \arcsin \frac{0,584}{1,35} = 154,4^\circ.$$

На рисунке 8.3 приведена характеристика мощности генератора к пояснению расчетной схемы с указанием площадок ускорения и торможения.

Предельный угол отключения, при котором генератор сохранит устойчивость, может быть выражен из интегрального уравнения, ха-

рактизирующего равенство площадок торможения и ускорения:

$$F_{\text{уск}} = F_{\text{торм}}; \quad (8.8)$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{\text{откл}}} P_0 d\delta = \int_{\delta_{\text{откл}}}^{\delta_{\text{кр}}} P_M \sin\delta d\delta - \int_{\delta_{\text{откл}}}^{\delta_{\text{кр}}} P_0 d\delta. \quad (8.9)$$

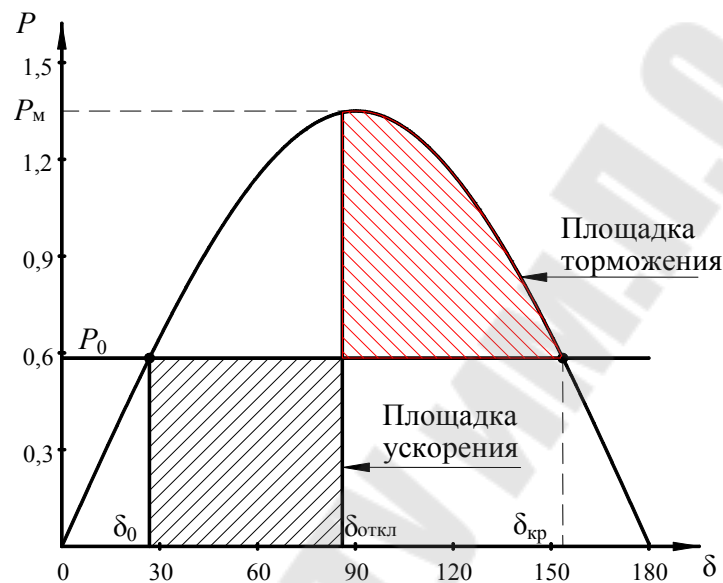


Рисунок 8.3 – Характеристика мощности генератора при отключении обеих ЛЭП

Проинтегрируем полученное выражение:

$$P_0 \delta_{\text{откл}} - P_0 \delta_0 = -P_M \cos\delta_{\text{кр}} + P_M \cos\delta_{\text{откл}} - P_0 \delta_{\text{кр}} + P_0 \delta_{\text{откл}}.$$

Упрощаем выражение:

$$-P_0 \delta_0 = -P_M \cos\delta_{\text{кр}} + P_M \cos\delta_{\text{откл}} - P_0 \delta_{\text{кр}}.$$

Выражаем  $\delta_{\text{откл}}$ :

$$\delta_{\text{откл}} = \arccos\left(\frac{P_0 \cdot (\delta_{\text{кр}} - \delta_0) + P_M \cdot \cos\delta_{\text{кр}}}{P_M}\right).$$

Подставляя исходные данные, предельный угол отключения составит:



$$\delta_{\text{откл}} = \arccos \left( \frac{0,584 \cdot (154,4 - 25,6) \cdot \frac{\pi}{180} + 1,35 \cdot \cos(154,4)}{1,35} \right) = 85,95^\circ.$$

Для определения предельного времени отключения КЗ проинтегрируем уравнение движения ротора:

$$T_j \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_0. \quad (8.10)$$

или

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \alpha_0. \quad (8.11)$$

где  $\Delta\omega = d\delta/dt$  – изменение скорости вращения ротора;  $\alpha_0 = P_0/T_j$  – ускорение ротора.

Приведенная характеристика движения ротора (рис. 8.4), в случае короткого замыкания, представляет собой линейное дифференциальное уравнение второго порядка, описывающее равномерно-ускоренное движение ротора.

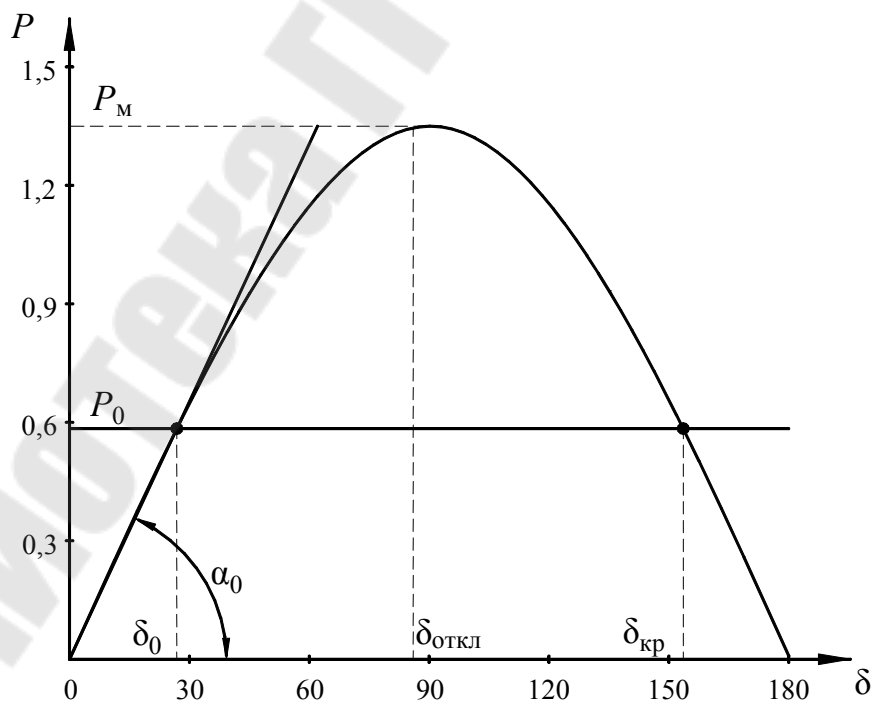


Рисунок 8.4 – Схема замещения электрической сети

Интеграл уравнения (8.11) имеет вид:

$$\Delta\omega = \alpha_0 t + C_1. \quad (8.12)$$

В начальный момент времени при  $t=0$  относительная скорость  $\Delta\omega=0$  и соответственно  $C_1=0$ , следовательно  $\Delta\omega = \alpha_0 t$ .

Таким образом:

$$\Delta\omega = \frac{d\delta}{dt} = \alpha_0 t \text{ или } d\delta = \alpha_0 t \cdot dt. \quad (8.13)$$

Интегрируя полученное уравнение, получаем:

$$\delta = \int \alpha_0 t \cdot dt = \frac{\alpha_0 t^2}{2} + C_2. \quad (8.14)$$

При  $t=0$  угол  $\delta = \delta_0$ , следовательно  $C_2 = \delta_0$ :

$$\delta - \delta_0 = \frac{\alpha_0 t^2}{2} = \frac{(P_0 / T_j) \cdot t^2}{2}. \quad (8.15)$$

Выражая время из последней формулы  $t$ , итоговая формула для определения предельного времени отключения КЗ составит:

$$t_{\text{откл}} = \sqrt{\frac{2T_j(\delta_{\text{откл}} - \delta_0)}{P_0}}. \quad (8.16)$$

Подставляя исходные значения, предельное время отключения составит:

$$t_{\text{откл}} = \sqrt{\frac{2T_j(\delta_{\text{откл}} - \delta_0)}{360 \cdot f_0 \cdot P_0}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 7 \cdot (85,95 - 25,6)}{360 \cdot 50 \cdot 0,584}} = 0,28 \text{ с.}$$

### Пример 8.2

Для схемы электрической сети, приведенной на рисунке 8.1, в момент времени  $t_0$  в начале одной из линий происходит двухфазное короткое замыкание. Через промежуток времени  $\Delta t$ , в момент времени  $t_1$ , двухфазное короткое замыкание переходит трехфазное, а затем в момент времени  $t_2$  поврежденная линия отключается, причем

система сохраняет устойчивость.

Приближенно построить характеристики мощности генератора. Отметить площадки ускорения  $F_{\text{уск}}$  и торможения  $F_{\text{торм}}$ .

### Решение

Характеристика мощности генератора с указанием площадок ускорения и торможения ротора генератора приведена на рисунке 8.5.

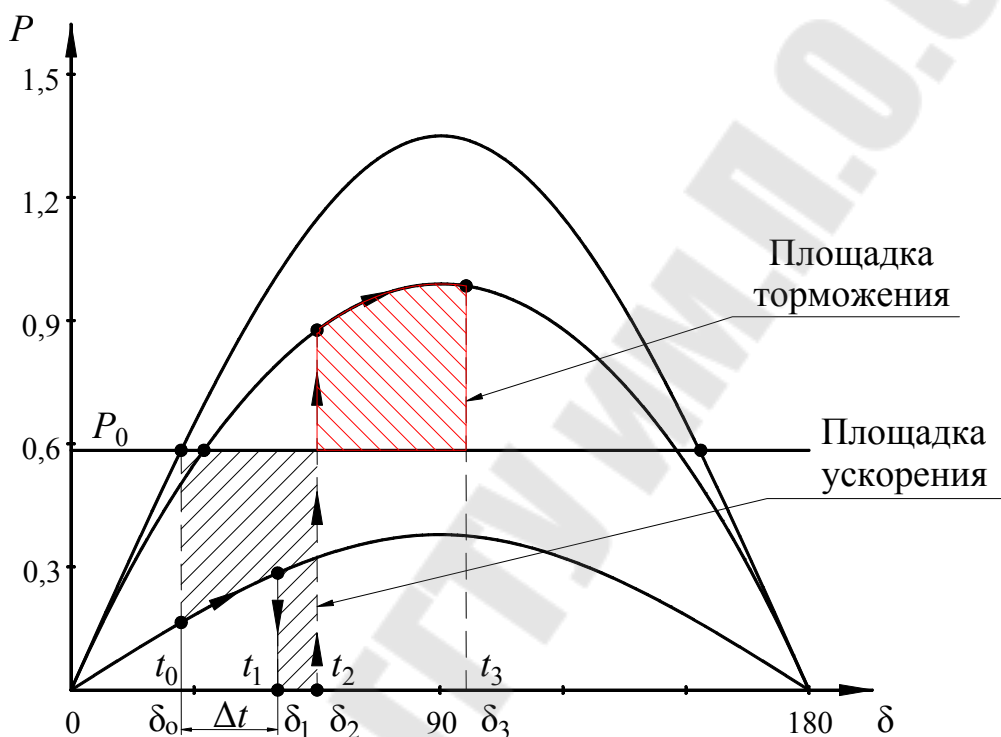


Рисунок 8.5 – Характеристика мощности генератора при коротких замыканиях

### Пример 8.3

В схеме электрической сети, приведенной на рисунке 8.1, происходит отключение одной из параллельных линий электропередачи. Рассчитать характеристики мощности генератора в нормальном режиме и после отключения одной цепи линии. Произвести анализ динамической устойчивости. Изменением ЭДС генератора в переходном режиме пренебречь.

Параметры исходного режима в относительных единицах и параметры электропередачи:

- генератор Г:  $x'_d = 0,295$  о.е.;
- трансформатор Т1 и Т2:  $x_{T1} = 0,138$  о.е.,  $x_{T2} = 0,122$  о.е.
- линия Л (для двух цепей):  $x_L = 0,244$  о.е.

– система:  $P_0 = 1$  о.е.;  $Q_0 = 0,2$  о.е.

### Решение

На рисунке 8.6 приведена расчетная схема замещения электрической сети.

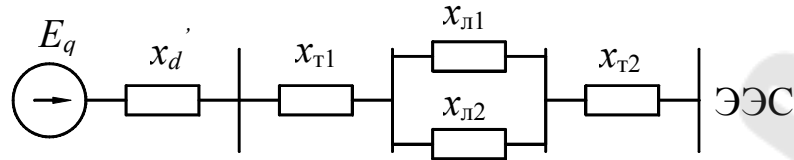


Рисунок 8.6 – Схема замещения электрической сети

Сопротивление передающей сети в нормальном режиме:

$$x'_{d\Sigma 1} = x_r + x_{T1} + x_L + x_{T2} = 0,295 + 0,138 + 0,244 + 0,122 = 0,799 \text{ о.е.}$$

Синхронная ЭДС неявнополюсного генератора составит:

$$E' = \sqrt{\left(1 + \frac{0,2 \cdot 0,799}{1}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,799}{1}\right)^2} = 1,41 \text{ о.е.}$$

Предел передаваемой мощности в нормальном режиме составит:

$$P_{M1} = \frac{E' \cdot U_c}{x'_{d\Sigma 1}} = \frac{1,41 \cdot 1}{0,799} = 1,765 \text{ о.е.}$$

Определяем угол сдвига  $\delta_0$  между вектором ЭДС генератора  $E_q$  и напряжением системы  $U_c$  в нормальном режиме составит:

$$\delta_0 = \arcsin\left(\frac{P_0}{P_{M1}}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{1,765}\right) = 34,5^\circ.$$

После отключения одной из цепей линии суммарное сопротивление системы составит:

$$\begin{aligned} x'_{d\Sigma 2} &= x_r + x_{T1} + x_L + x_{T2} = \\ &= 0,295 + 0,138 + 2 \cdot 0,244 + 0,122 = 1,043 \text{ о.е.} \end{aligned}$$

Предел передаваемой мощности в режиме отключения одной цепи

линии составит:

$$P_{M2} = \frac{E'U_c}{x'_{d\Sigma 2}} = \frac{1,41 \cdot 1}{1,043} = 1,35 \text{ о.е.}$$

Характеристики мощности генератора в нормальном режиме и после отключения одной из цепей линии с указанием площадок ускорения и торможения приведены на рисунке 8.7.

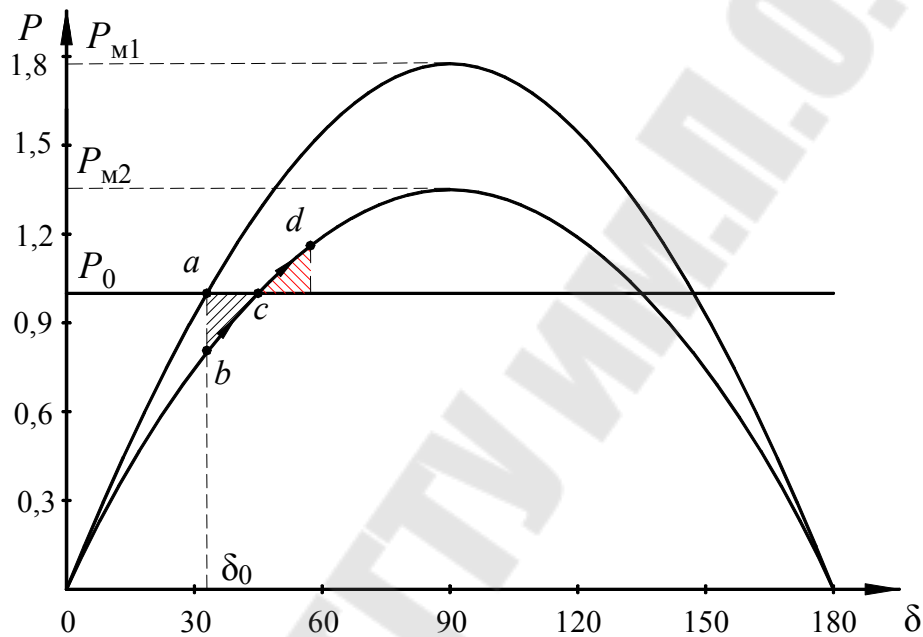


Рисунок 8.7 – Характеристика мощности генератора после отключения одной из цепей линии

При отключении одной цепи линии электрическая мощность, отдаваемая генератором в точке  $b$  меньше чем мощность, отдаваемая турбиной  $P_0$ . Под действием избыточной мощности (момента) турбины ротор генератора начинает ускоряться, увеличивая тем самым угол  $\delta$ . В точке  $c$  электрическая мощность  $P_{эл}$  сравнивается с механической  $P_{мех}$ , однако ротор генератора по инерции проходит эту точку и переходит в точку  $d$ , где кинетическая энергия, запасенная ротором при ускоренном движении от точки  $b$  до точки  $c$ , полностью расходуется на участке  $d - c$ . В конечном счете, после окончания колебаний генератор займет новую точку установившегося режима в точке  $c$ .

## Практическая часть

### Задача 8.4

В соответствии с условиями переходного процесса приближенно построить характеристики мощности генератора с указанием площадок ускорения и торможения. Исходные данные по вариантам приведены в таблице П 5. Расчетные схемы электрической сети приведены на рисунке 8.8.

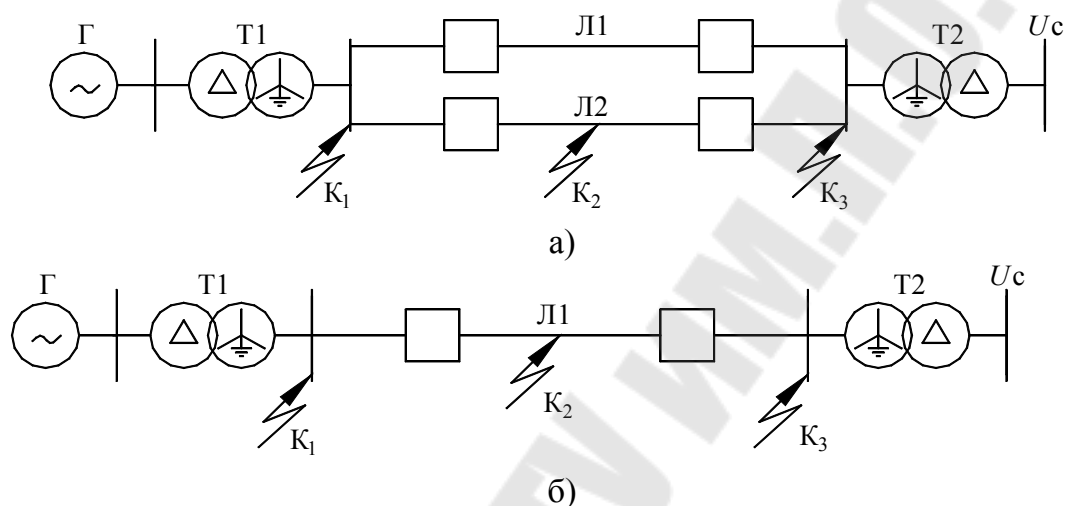


Рисунок 8.8 – Расчетная схема электрической системы

### Задача 8.5

В соответствии с вариантом переходного процесса приведенного в таблице П 5 составить интегральное уравнение, которое описывает равенство площадок ускорения и торможения.

## Практическая работа № 9:

### Построение угловых характеристик мощности простейшей системы в нормальном, аварийном и послеаварийном режимах для анализа динамической устойчивости при симметричном и несимметричном КЗ. Расчет сопротивления аварийного шунта КЗ

#### Теоретическая часть

Исследование динамической устойчивости при возникновении КЗ осуществляются с помощью метода симметричных составляющих. Для применения данного метода необходимо расчетную схему электроснабжения представить в виде схем замещений трех последовательностей.

Схема прямой последовательности является обычной схемой замещения, которая составляется для любого симметричного процесса.

Схема обратной последовательности по структуре схожа со схемой прямой последовательности, однако при ее составлении все генерирующие и нагрузочные источники исключаются, а между точкой КЗ и нулевой точкой схемы (землей) устанавливается гипотетический источник напряжения, по отношению к которому определяют эквивалентное значение сопротивлений обратной последовательности.

При составлении схемы нулевой последовательности учитываются только те элементы схемы, по которым могут протекать токи нулевой последовательности, что определяется соединением обмоток трансформатора. Сопротивление нулевой последовательности двухцепной линии без тросов обычно в 5,5 раз больше сопротивления линии прямой последовательности.

Таким образом, схема замещения системы при любом виде КЗ отличается от схемы нормального режима лишь тем, что в месте КЗ включается поперечное сопротивление, так называемый аварийный шунт. Значения шунта зависит от вида короткого замыкания [2]:

- при однофазном КЗ ( $K^1$ ) –  $x_{ш} = x_2 + x_0$ ;
- при двухфазном КЗ ( $K^2$ ) –  $x_{ш} = x_2$ ;
- при двухфазном КЗ на землю ( $K^{1,1}$ ) –  $x_{ш} = x_2 x_0 / (x_2 + x_0)$ ;
- при трехфазном КЗ ( $K^3$ ) –  $x_{ш} = 0$ .

Величина характеристики мощности синхронного генератора в общем случае зависит от места включения и величину аварийного шунта, которое влияет на величину собственных и взаимных прово-

димостей и сопротивлений схемы.

При упрощенном исследовании характеристики мощности генератора, когда в схеме замещения учитываются только индуктивные сопротивления элементов электрической сети, сопротивление шунта также имеет реактивное значение. Тогда характеристика мощности при КЗ будет схожа с характеристикой при включении реактора, предел передаваемой мощности в которой определялся по формуле:

$$P_M = \frac{E' \cdot U_c}{x_{12}}, \quad (9.1)$$

где  $x_{12}$  – взаимное сопротивление схемы:

$$x_{12} = x_1 + x_2 + \frac{x_1 \cdot x_2}{x_{ш}}. \quad (9.2)$$

## Практическая часть

### Пример 9.1

Рассмотрим схему электрической сети, в которой генератор работает через трансформатор и 2-х цепную линию электропередачи на шину приёмной системы бесконечной мощности. Генератор имеет АРВ пропорционального действия. В середине первой цепи линии происходит двухфазное КЗ на землю, которое синхронно отключает выключатели цепи линии. В расчетах переходную ЭДС принять постоянной.

Требуется:

1. Произвести построение характеристик мощности генератора в нормальном, аварийном и послеаварийном режиме;
2. Определить предельный угол отключения двухфазного КЗ землю при котором устойчивость системы сохранится.

Исходные данные к задаче приведены в таблице 9.1.

Таблица 9.1

### Исходные данные к задаче

Генератор	Трансформатор Т1	Трансформатор Т2	Линия	Мощность перетока
$P_H = 160 \text{ мВт}$	$S_H = 200 \text{ мВА}$	$S_H = 200 \text{ мВА}$	$x_0 = 0,438 \text{ Ом/км}$	$P_c = 120 \text{ мВт}$
$\cos \varphi_H = 0,85$	$U_H = 18 / 242 \text{ кВ}$	$U_H = 220 / 121 \text{ кВ}$	$l = 300 \text{ км}$	$Q_c = 80 \text{ мвар}$
$x'_{*d} = 0,34$	$U_K = 11\%$	$U_K = 11\%$	–	–



Генератор	Трансформатор Т1	Трансформатор Т2	Линия	Нагрузка
$U_H = 18,5 \text{ кВ}$	–	–	–	–
$T_{j*} = 5,42 \text{ с}$	–	–	–	–

### Решение

Принимаем базисные величины. За базисное напряжение принимаем напряжение системы  $U_6 = U_4 = 115 \text{ кВ}$ , за базисную мощность принимаем передаваемую активную мощность в энергосистему  $S_6 = P_c = 120 \text{ МВт}$ . Расчетная схема к задаче приведена на рисунке 9.1.

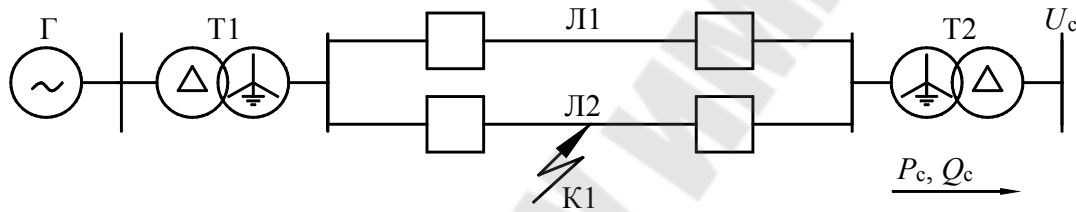


Рисунок 9.1 – Расчетная схема электрической системы

Схема замещения прямой последовательности при коротком замыкании приведена на рисунке 9.2.

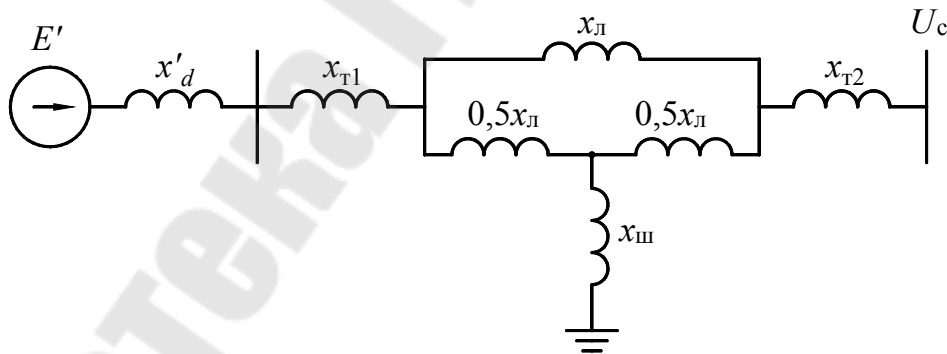


Рисунок 9.2 – Схема замещения при КЗ

### Нормальный режим

Передаваемая активная мощность в относительных единицах равна:

$$P_c = \frac{P_c}{S_6} = \frac{120}{120} = 1 \text{ о.е.}$$

Передаваемая реактивная мощность в относительных единицах равна:

$$Q_c = \frac{Q_c}{S_{\sigma}} = \frac{80}{120} = 0,67 \text{ о.е.}$$

Определяем реактивное сопротивление генератора в относительных единицах при приближенном приведении:

$$x_d = \frac{x'_{*d} \cdot S_{\sigma}}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{x'_{*d} \cdot S_{\sigma}}{P_{\text{НОМ}} / \cos \varphi_{\text{НОМ}}} = \frac{0,34 \cdot 120}{160 / 0,85} = 0,217 \text{ о.е.}$$

Определяем реактивное сопротивление трансформаторов Т1 и Т2 в относительных единицах:

$$x_{T1} = \frac{U_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{\text{Н}}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{120}{200} = 0,066 \text{ о.е.}$$

$$x_{T2} = \frac{U_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{\text{Н}}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{120}{200} = 0,066 \text{ о.е.}$$

Определяем реактивное сопротивление одной цепи линии в относительных единицах:

$$x_{\text{л}} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\sigma}}{U_{\text{ср}}^2} = 0,438 \cdot 300 \cdot \frac{120}{230^2} = 0,298 \text{ о.е.}$$

Сопротивление передающей сети в нормальном режиме:

$$x'_{d\Sigma 1} = x'_d + x_{T1} + 0,5 \cdot x_{\text{л}} + x_{T2} = 0,217 + 0,066 + 0,5 \cdot 0,298 + 0,066 = 0,498 \text{ о.е.}$$

ЭДС генератора составит:

$$E' = \sqrt{\left(1 + \frac{0,67 \cdot 0,498}{1}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,498}{1}\right)^2} = 1,42 \text{ о.е.}$$

Предел передаваемой мощности составит:

$$P_{M1} = \frac{E' \cdot U_c}{x_{\Sigma 1}} = \frac{1,42 \cdot 1}{x'_{d\Sigma 1}} = 2,85 \text{ о.е.}$$

Коэффициент запаса статической устойчивости по мощности:

$$k_{P1} = \frac{P_{M1} - P_c}{P_c} = \frac{2,85 - 1}{1} = 1,85 \text{ о.е.}$$

### Аварийный режим

Определяем эквивалентное сопротивление обратной последовательности. Схема замещения обратной последовательности приведена на рисунке 9.3.

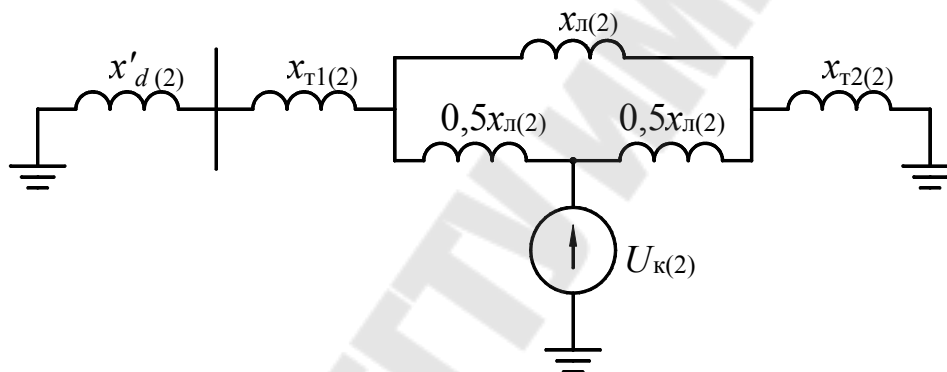


Рисунок 9.3 – Схема замещения обратной последовательности

Осуществляем преобразованием схемы от треугольника к звезде (рисунок 9.4) и определяем сопротивления схемы:

$$x_{a(2)} = \frac{x_{л(2)} \cdot 0,5x_{л(2)}}{x_{л(2)} + 0,5x_{л(2)} + 0,5x_{л(2)}} = \frac{0,298 \cdot 0,149}{0,298 + 0,149 + 0,149} = 0,075 \text{ о.е.}$$

$$x_{b(2)} = \frac{x_{л(2)} \cdot 0,5x_{л(2)}}{x_{л(2)} + 0,5x_{л(2)} + 0,5x_{л(2)}} = \frac{0,298 \cdot 0,149}{0,298 + 0,149 + 0,149} = 0,075 \text{ о.е.}$$

$$x_{c(2)} = \frac{0,5x_{л(2)} \cdot 0,5x_{л(2)}}{x_{л(2)} + 0,5x_{л(2)} + 0,5x_{л(2)}} = \frac{0,149 \cdot 0,149}{0,298 + 0,149 + 0,149} = 0,037 \text{ о.е.}$$

Эквивалентное сопротивление обратной последовательности определяется после дальнейших преобразований схемы (рисунок 9.5) составит:

$$x_2 = \frac{(x_{d(2)} + x_{T1(2)} + x_{a(2)}) \cdot (x_{b(2)} + x_{T2(2)})}{x_{d(2)} + x_{T1(2)} + x_{a(2)} + x_{b(2)} + x_{T2(2)}} + x_{c(2)} =$$

$$= \frac{(0,217 + 0,066 + 0,075) \cdot (0,075 + 0,066)}{0,217 + 0,066 + 0,075 + 0,075 + 0,066} + 0,037 = 0,138 \text{ о.е.}$$

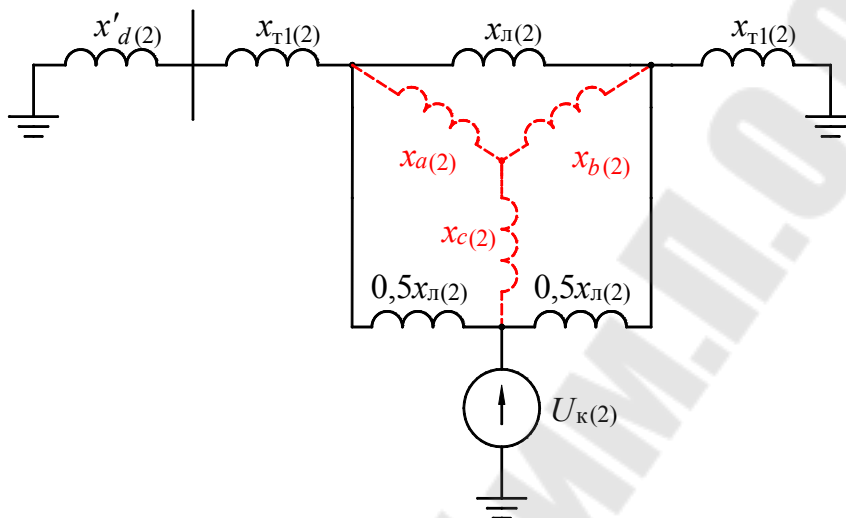


Рисунок 9.4 – Схема замещения обратной последовательности после преобразований

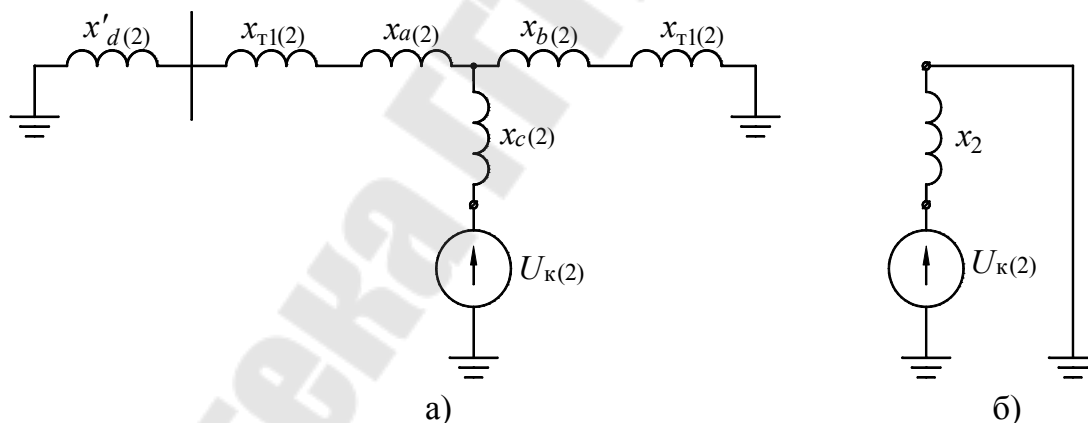


Рисунок 9.5 – Преобразования схемы замещения обратной последовательности

Определяем эквивалентное сопротивление нулевой последовательности. Обмотки, незаземленные и соединенные в треугольник, являются фильтрами нулевой последовательности и не дают возможности соответствующим токам протекать дальше по схеме или в землю. В связи с чем, в схему замещения нулевой последовательности не входит сопротивления генератора (рисунок 9.7).

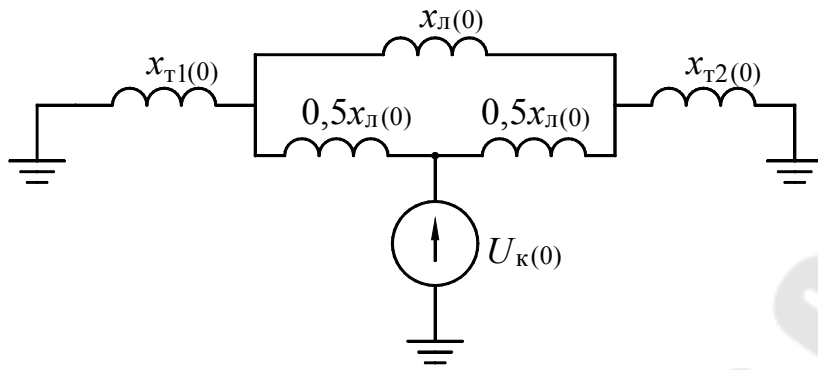


Рисунок 9.6 – Схема замещения нулевой последовательности

Аналогично схеме обратной последовательности для схемы нулевой последовательности осуществляются преобразования, показанные на рисунке 9.7.

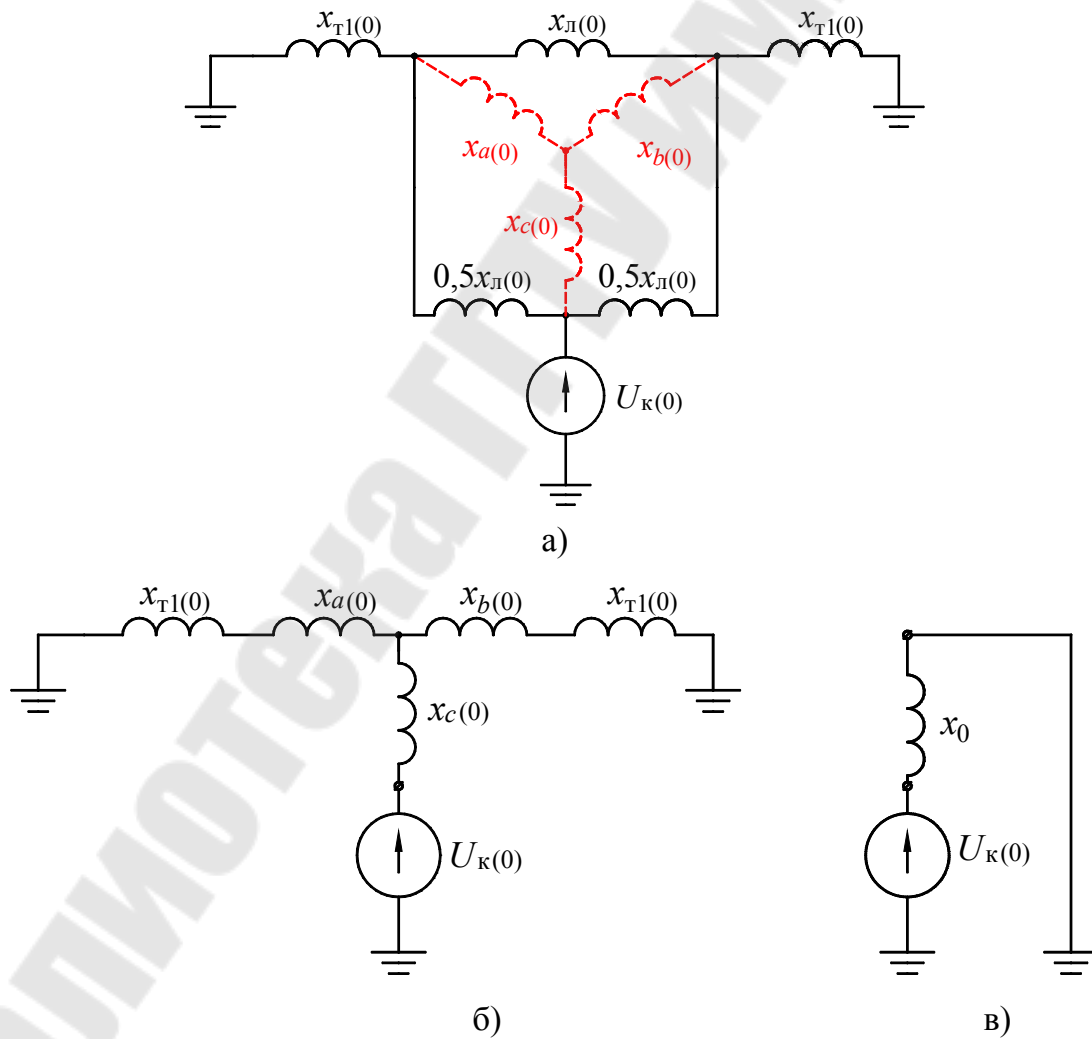


Рисунок 9.7 – Схема замещения нулевой последовательности после преобразований

Сопrotивление нулевой последовательности двухцепной линии без тросов:

$$x_{л(0)} = 5,5 \cdot x_{л(1)} = 5,5 \cdot 0,298 = 1,639 \text{ о.е.}$$

Осуществляем преобразование треугольника в звезду:

$$x_{a(0)} = \frac{x_{л(0)} \cdot 0,5x_{л(0)}}{x_{л(0)} + 0,5x_{л(0)} + 0,5x_{л(0)}} = \frac{1,639 \cdot 0,82}{1,639 + 0,82 + 0,82} = 0,410 \text{ о.е.}$$

$$x_{b(0)} = \frac{x_{л(0)} \cdot 0,5x_{л(0)}}{x_{л(0)} + 0,5x_{л(0)} + 0,5x_{л(0)}} = \frac{1,639 \cdot 0,82}{1,639 + 0,82 + 0,82} = 0,410 \text{ о.е.}$$

$$x_{c(0)} = \frac{0,5x_{л(0)} \cdot 0,5x_{л(0)}}{x_{л(0)} + 0,5x_{л(0)} + 0,5x_{л(0)}} = \frac{0,82 \cdot 0,82}{1,639 + 0,82 + 0,82} = 0,205 \text{ о.е.}$$

Эквивалентное сопротивление нулевой последовательности составит:

$$\begin{aligned} x_0 &= \frac{(x_{т1(0)} + x_{a(0)}) \cdot (x_{b(0)} + x_{т2(0)})}{x_{т1(0)} + x_{a(0)} + x_{b(0)} + x_{т2(0)}} + x_{c(2)} = \\ &= \frac{(0,066 + 0,410) \cdot (0,410 + 0,066)}{0,066 + 0,410 + 0,410 + 0,066} + 0,205 = 0,443 \text{ о.е.} \end{aligned}$$

Сопrotивление шунта при двухфазном КЗ землю составит:

$$x_{ш} = \frac{x_2 x_0}{x_2 + x_0} = \frac{0,138 \cdot 0,443}{0,138 + 0,443} = 0,105 \text{ о.е.}$$

Определяем параметры схемы замещения прямой последовательности. Осуществляем преобразования схемы от треугольника к звезде и определяем сопротивления схемы:

$$x_a = \frac{x_{л} \cdot 0,5x_{л}}{x_{л} + 0,5x_{л} + 0,5x_{л}} = \frac{0,298 \cdot 0,149}{0,298 + 0,149 + 0,149} = 0,075 \text{ о.е.}$$

$$x_b = \frac{x_{л} \cdot 0,5x_{л}}{x_{л} + 0,5x_{л} + 0,5x_{л}} = \frac{0,298 \cdot 0,149}{0,298 + 0,149 + 0,149} = 0,075 \text{ о.е.}$$

$$x_c = \frac{0,5x_{\Gamma} \cdot 0,5x_{\Gamma}}{x_{\Gamma} + 0,5x_{\Gamma} + 0,5x_{\Gamma}} = \frac{0,149 \cdot 0,149}{0,298 + 0,149 + 0,149} = 0,037 \text{ о.е.}$$

Преобразовываем схему прямой последовательности к виду, приведенному на рисунке 9.8.

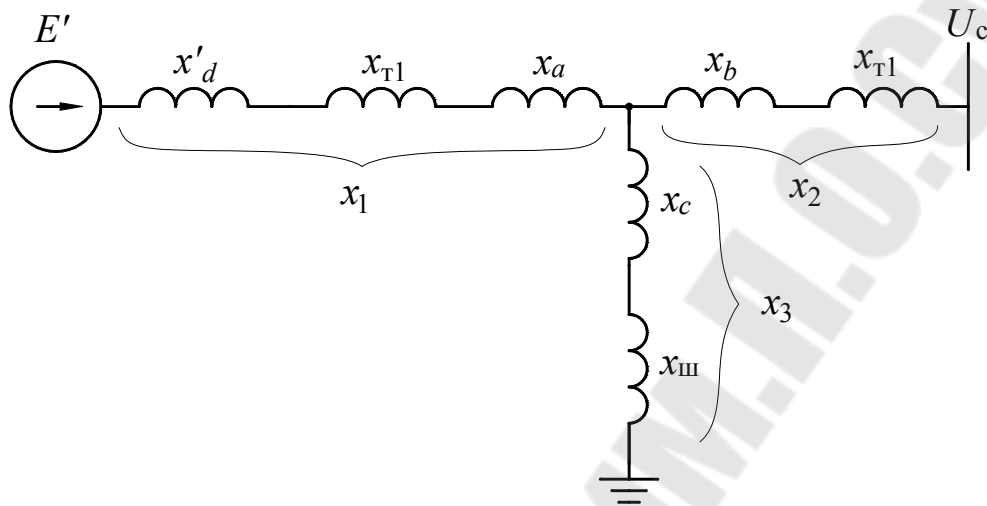


Рисунок 9.8 – Схема замещения прямой последовательности после преобразований

Эквивалентрируем схему:

$$x_1 = x'_d + x_{T1} + x_a = 0,217 + 0,066 + 0,075 = 0,358 \text{ о.е.}$$

$$x_2 = x_{b(1)} + x_{T2(1)} = 0,075 + 0,066 = 0,141 \text{ о.е.}$$

$$x_3 = x_c + x_{III} = 0,037 + 0,105 = 0,142 \text{ о.е.}$$

Определяем взаимное сопротивление схемы:

$$x_{12} = x_1 + x_2 + \frac{x_1 \cdot x_2}{x_3} = 0,358 + 0,141 + \frac{0,358 \cdot 0,141}{0,142} = 0,855 \text{ о.е.}$$

Принимаем в первый момент переходного процесса неизменность ЭДС, тогда предел передаваемой мощности при однофазном КЗ составит:

$$P_{M2} = \frac{E'U_c}{x_{12}} = \frac{1,42 \cdot 1}{0,855} = 1,66 \text{ о.е.}$$

Коэффициент запаса статической устойчивости по мощности:

$$k_{P2} = \frac{P_{M2} - P_c}{P_c} = \frac{1,66 - 1}{1} = 0,66 \text{ о.е.}$$

### Послеаварийный режим

При отключении выключателей поврежденного участка передача мощности в энергосистему осуществляется по одной цепи линии, при этом суммарное сопротивление системы составит:

$$x'_{d\Sigma 2} = x'_d + x_{T1} + x_{л} + x_{T2} = 0,217 + 0,066 + 0,298 + 0,066 = 0,647 \text{ о.е.}$$

Предел передаваемой мощности составит:

$$P_{M3} = \frac{E'U_c}{x'_{d\Sigma 2}} = \frac{1,42 \cdot 1}{0,647} = 2,19 \text{ о.е.}$$

Коэффициент запаса статической устойчивости по мощности:

$$k_{P3} = \frac{P_{M3} - P_c}{P_c} = \frac{2,19 - 1}{1} = 1,19 \text{ о.е.}$$

Характеристики мощности генератора в нормальном, аварийном и послеаварийном режиме с указанием площадок приведены на рисунке 9.9.

Определяем угол сдвига  $\delta_0$  между вектором ЭДС генератора  $E'_q$  и напряжением системы в нормальном режиме  $U_c$ :

$$\delta_0 = \arcsin\left(\frac{P_0}{P_{M1}}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{2,85}\right) = 20,54^\circ.$$

Критический угол, допустимый в процессе качания генератора в послеаварийном режиме составит:



$$\delta_{кр} = 180 - \arcsin \frac{P_0}{P_{M3}} = 180 - \arcsin \frac{1}{2,19} = 152,83^\circ.$$

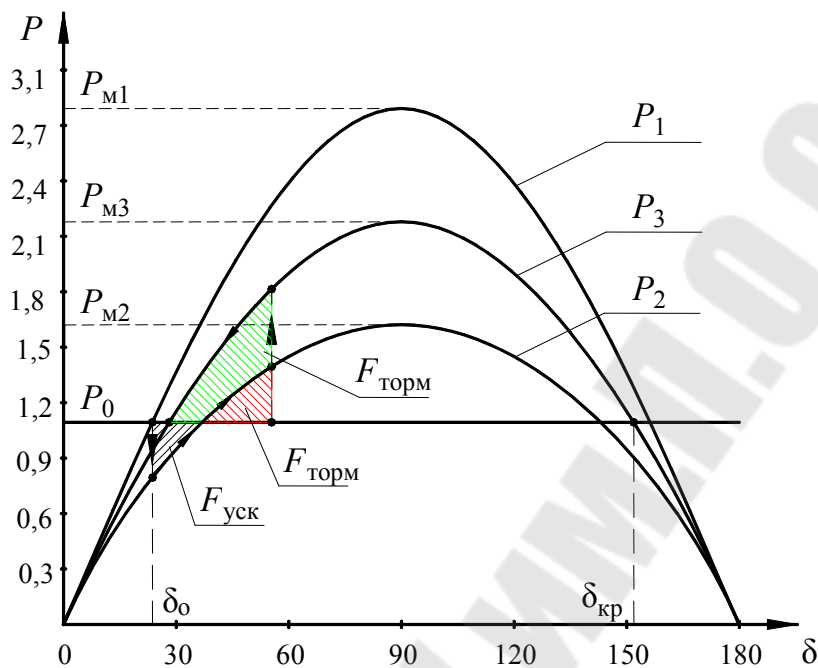


Рисунок 9.9 – Характеристика мощности генератора в нормальном, аварийном и послеаварийном режиме

Предельный угол отключения генератора определяется равенством площадок ускорения и торможения:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{откл}} (P_0 - P_{M2} \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_{откл}}^{\delta_{кр}} (P_{M3} \sin \delta - P_0) d\delta. \quad (9.3)$$

В результате решения интегрального уравнения предельный угол отключения определяется как:

$$\delta_{откл} = \arccos \left( \frac{P_0 \cdot (\delta_{кр} - \delta_0) \cdot \pi / 180 - P_{M2} \cdot \cos \delta_0 + P_{M3} \cdot \cos \delta_{кр}}{P_{M3} - P_{M2}} \right) =$$

$$= \arccos \left( \frac{1 \cdot (152,83 - 20,54) \cdot \frac{3,14}{180} - 1,66 \cdot \cos(20,54) + 2,19 \cdot \cos(152,83)}{2,19 - 1,66} \right) =$$

= не существует.

Таким образом, предельного угла отключения не существует,

что означает, что даже при двухфазном КЗ на землю синхронный генератор сохранит устойчивую работу.

### Практическая часть

#### Задача 9.2

В электрической системе, приведенной на рисунке 9.10, в соответствии с вариантом задания вблизи шин в начале либо конце линии Л2 происходит короткое замыкание. Релейной защитой отключается поврежденный участок. Требуется: определить предельный угол отключения короткого замыкания, при котором устойчивость системы не нарушится; построить характеристики мощности генератора в нормальном, аварийном и после аварийном режиме с указанием площадей ускорения и торможения.

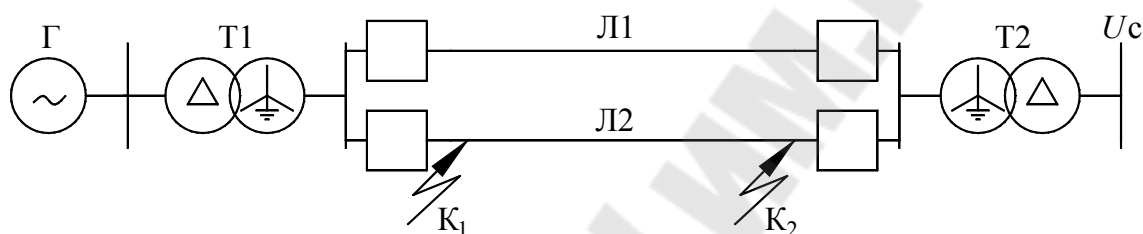


Рисунок 9.10 – Расчетная схема электрической системы

Параметры элементов ЭЭС в соответствии с вариантом задания приведены в таблице П 1. Место и вид короткого замыкания принять в соответствии с таблицей П 6.

**Практическая работа № 10:**  
**Определение предельного времени отключения КЗ. Решение**  
**уравнения относительно движения ротора генератора методом**  
**последовательных интервалов**

**Теоретическая часть**

Метод последовательных интервалов разработан для практического анализа динамической устойчивости ЭЭС. Использование данного метода позволяет наглядно оценить изменение угла  $\delta$  во время переходного процесса. С помощью метода последовательных интервалов можно установить предельное время отключения короткого замыкания, при котором система будет динамически устойчива.

Сущность метода заключается в приближенном решении дифференциального уравнения относительного движения ротора синхронного генератора:

$$T_{j*} \frac{d\delta^2}{dt^2} = P_0 - P_M \sin \delta = \Delta P. \quad (10.1)$$

где  $T_{j*}$  – постоянная инерции ротора генератора.

При этом время переходного процесса разбивается на малые интервалы времени  $\Delta t$  и для каждого из них определяется приращение угла  $\Delta \delta$  [2, 8]. При небольшом интервале времени  $\Delta t$  можно считать постоянной избыточную мощность  $\Delta P$ , и соответственно, постоянный момент действующую на ротор синхронной машины. В таком случае ускорение угла  $\delta$  также является постоянной величиной:

$$\alpha = \frac{d\delta^2}{dt^2} = \frac{\Delta P}{T_{j*}}. \quad (10.2)$$

Изменение угла, при котором ускорение постоянно по модулю называется равноускоренным и описывается известной математической зависимостью [2]:

$$\Delta \delta = \Delta \omega_{(1)} \cdot \Delta t + \frac{\alpha_{(1)} \cdot \Delta t^2}{2}, \quad (10.3)$$

где  $\Delta \omega_{(1)}$ ,  $\alpha_{(1)}$  – относительная скорость и ускорение в начале первого интервала времени.

Последовательность действий, описывающих общий порядок расчета, используя метод последовательных интервалов:

1. В первом интервале времени  $\Delta t$  определяется избыточная мощность на валу генератора:

$$\Delta P_{(1)} = P_0 - P_{M2} \sin \delta_0. \quad (10.4)$$

где  $P_{M2}$  – предел передаваемой мощности после переходного процесса.

2. Определяется приращение угла  $\Delta\delta_{(1)}$  к концу первого интервала времени:

$$\Delta\delta_{(1)} = \frac{\alpha_{(1)} \cdot \Delta t^2}{2} = 0,5 \cdot \alpha_{(1)} \cdot \Delta t^2 = 0,5 \cdot \frac{\Delta P_{(1)}}{T_{j*}} \cdot \Delta t^2, \quad (10.5)$$

где  $\alpha_{(1)}$  – ускорение ротора в первом интервале времени после начала переходного процесса:

$$\alpha_{(1)} = \frac{\Delta P_{(1)}}{T_{j*}}. \quad (10.6)$$

Если в качестве входных параметров уравнения движения ротора использовать  $T_{j*}$  [с],  $\delta$  [град],  $P_0$  [о.е.],  $P_M$  [о.е.], тогда в соответствии с таблицей 8.1, приращение угла  $\Delta\delta_{(1)}$  может быть выражено зависимостью:

$$\Delta\delta_{(1)} = 0,5 \cdot k \cdot \Delta P_{(1)} = 0,5 \cdot \frac{360 \cdot f \cdot \Delta t^2}{T_{j*}} \cdot \Delta P_{(1)}. \quad (10.7)$$

где  $k$  – постоянный коэффициент.

4. Определяется значение угла к концу первого интервала времени:

$$\delta_{(1)} = \delta_0 + \Delta\delta_{(1)}. \quad (10.8)$$

5. Определяется избыточная мощность на валу генератора на втором интервале времени:

$$\Delta P_{(2)} = P_0 - P_{M2} \sin \delta_{(1)}. \quad (10.9)$$

6. Определяется приращение угла к концу второго интервала времени  $\Delta\delta_{(2)}$ :

$$\Delta\delta_{(2)} = \Delta\delta_{(1)} + k \cdot \Delta P_{(2)}. \quad (10.10)$$

Приращение угла в третьем и  $n$ -м промежутке времени определяется по формуле:

$$\Delta\delta_{(n)} = \Delta\delta_{(n-1)} + k \cdot \Delta P_{(n)}. \quad (10.11)$$

### Пример 10.1

Используя результаты расчета примера 8.1, методом последовательных интервалов необходимо построить зависимость  $\delta = f(t)$  и графически определить предельное время восстановления исходного режима  $t_{\text{пред}}$ , при котором устойчивость системы сохранится.

### Решение

Для нахождения зависимости  $\delta = f(t)$  и определения предельного времени включения двух линий необходимо решить дифференциальное уравнение второго порядка, описывающее относительное движение ротора генератора. В соответствии с примером 8.1 постоянная инерции ротора генератора составляет 7 с.

Решаем дифференциальное уравнение (10.1) методом последовательных интервалов. Длительность расчетного интервала принимаем  $\Delta t = 0,05$  с. Начальный угол в соответствии с условием составляет  $\delta_0 = 25,6^\circ$ .

Значение постоянного коэффициента  $k$  составит:

$$k = \frac{360 \cdot f \cdot \Delta t^2}{T_{j*}} = \frac{360 \cdot 50 \cdot 0,05^2}{7} = 6,43.$$

Электрическая мощность, отдаваемая генератором в первый момент времени после отключения двух линий связывающих генератор с энергосистемой равна:

$$P_{(0)} = P_{M2} \cdot \sin \delta_0 = 0 \cdot \sin 25,6^\circ = 0.$$

Избыток мощности в начале первого интервала:

$$\Delta P_{(0)} = P_0 - P_{(0)} = 0,584 - 0 = 0,584.$$

Приращение угла в течение первого интервала времени:

$$\Delta \delta_{(1)} = k \cdot \frac{\Delta P_{(0)}}{2} = 6,43 \cdot \frac{0,584}{2} = 1,88^\circ.$$

Значение угла к концу первого или началу второго интервала времени:

$$\delta_{(1)} = \delta_{(0)} + \Delta \delta_{(1)} = 25,6 + 1,88 = 27,48^\circ.$$

Электрическая мощность, отдаваемая генератором в начале второго интервала времени:

$$P_{(1)} = P_{M2} \cdot \sin \delta_{(1)} = 0 \cdot \sin 27,48 = 0.$$

Избыток мощности в начале второго интервала:

$$\Delta P_{(1)} = P_0 - P_{(1)} = 0,584 - 0 = 0,584.$$

Приращение угла в течении второго интервала времени:

$$\Delta \delta_{(2)} = \Delta \delta_{(1)} + k \cdot \Delta P_{(1)} = 1,88^\circ + 6,43 \cdot 0,584 = 5,63^\circ.$$

Значение угла к концу второго интервала времени:

$$\delta_{(2)} = \delta_{(1)} + \Delta \delta_{(2)} = 27,48 + 5,63 = 33,11^\circ.$$

Аналогично производится решение для следующих интервалов времени. Результаты сводятся в таблицу 10.1.

На рисунке 10.1 приведена зависимость угла  $\delta$  во времени. Граница динамической устойчивости определяется предельным временем восстановления исходного режима, т.е. включением двух линий.

Графическое определение предельного времени определяется на пересечении кривой  $\delta = f(t)$  и угла  $\delta_{\text{откл}}$ , который найден в примере 8.1 и составил  $85,9^\circ$ . Таким образом, предельное время восстановления исходного режима, при котором устойчивость системы сохра-

дится, составило 0,28 с.

Таблица 10.1

**Результаты расчета угла  $\delta$  от времени**

Номер интервала	$t$ , с	$\delta$ , град.	$P_c$ , о.е.	$P_{M2}$ , о.е.	$\Delta P$ , о.е.	$\Delta\delta$ , град.
0	0	25,6	0,584	0	0,584	1,88
1	0,05	27,5	0,584	0	0,584	5,63
2	0,1	33,1	0,584	0	0,584	9,39
3	0,15	42,5	0,584	0	0,584	13,14
4	0,2	55,6	0,584	0	0,584	16,89
5	0,25	72,5	0,584	0	0,584	20,65
6	0,3	93,2	0,584	0	0,584	24,40
7	0,35	117,6	0,584	0	0,584	28,16
8	0,4	145,7	0,584	0	0,584	31,91

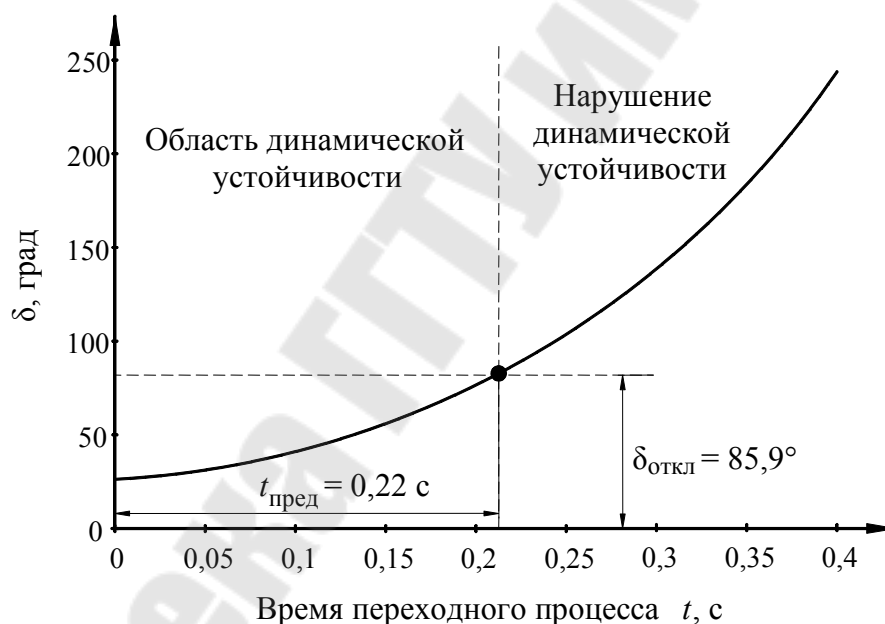


Рисунок 10.1 – Определение предельного времени отключения и границы динамической устойчивости

**Пример 10.2**

Для примера 9.1 требуется, построив зависимость  $\delta = f(t)$ , графически определить предельное время отключения КЗ при котором устойчивость системы сохранится. Расчет произвести, используя метод последовательных интервалов.

**Решение**

Приведем электромеханическую постоянную времени к базис-

НЫМ УСЛОВИЯМ:

$$T_{j*} = T_j \cdot \frac{P_{\text{НОМ}} / \cos \varphi_{\text{НОМ}}}{S_{\delta}} = 5,42 \cdot \frac{160/0,85}{120} = 8,5 \text{ с.}$$

Решаем дифференциальное уравнение (10.1) методом последовательных интервалов. Длительность расчетного интервала принимаем  $\Delta t = 0,05 \text{ с}$ .

Начальный угол в соответствии с условием составляет  $\delta_0 = 20,54^\circ$ .

Значение постоянного коэффициента  $k$  составит:

$$k = \frac{360 \cdot f \cdot \Delta t^2}{T_{j*}} = \frac{360 \cdot 50 \cdot 0,05^2}{8,5} = 5,29.$$

Электрическая мощность, отдаваемая генератором в первый момент времени после двухфазного КЗ на землю:

$$P_{(0)} = P_{M2} \cdot \sin \delta_0 = 1,66 \cdot \sin 20,54 = 0,582 .$$

Избыток мощности в начале первого интервала:

$$\Delta P_{(0)} = P_{c*} - P_{(0)} = 1 - 0,582 = 0,418.$$

Приращение угла в течение первого интервала времени:

$$\Delta \delta_{(1)} = k \cdot \frac{\Delta P_{(0)}}{2} = 5,29 \cdot \frac{0,418}{2} = 1,11^\circ .$$

Значение угла к концу первого или началу второго интервала времени:

$$\delta_{(1)} = \delta_{(0)} + \Delta \delta_{(1)} = 20,54 + 1,11 = 21,65^\circ .$$

Электрическая мощность, отдаваемая генератором в начале второго интервала времени:

$$P_{(1)} = P_{M2} \cdot \sin \delta_{(1)} = 1,66 \cdot \sin 21,65 = 0,612 .$$



Избыток мощности в начале второго интервала:

$$\Delta P_{(1)} = P_{c*} - P_{(1)} = 1 - 0,612 = 0,388.$$

Приращение угла в течении второго интервала времени:

$$\Delta\delta_{(2)} = \Delta\delta_{(1)} + k \cdot \Delta P_{(1)} = 1,11^\circ + 5,29 \cdot 0,388 = 3,16^\circ.$$

Значение угла к концу второго интервала времени:

$$\delta_{(2)} = \delta_{(1)} + \Delta\delta_{(2)} = 21,65^\circ + 3,16^\circ = 24,85^\circ.$$

Аналогично производится решение для следующих интервалов времени. На рисунке 10.1 приведена зависимость угла  $\delta$  во времени.

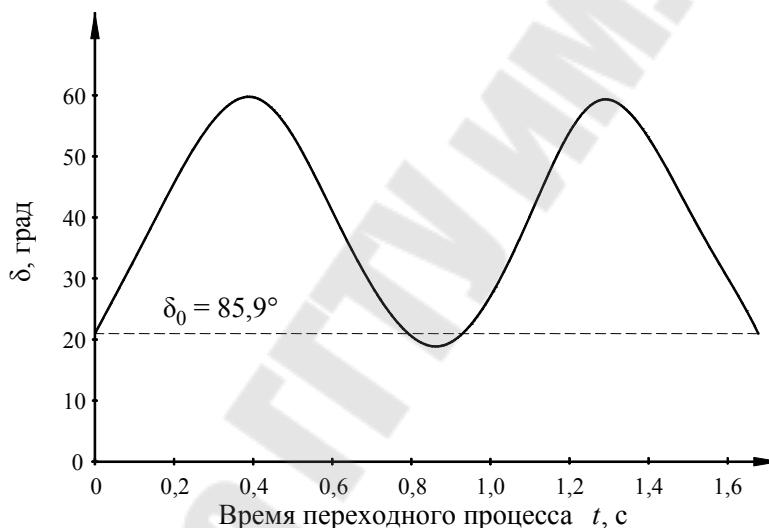


Рисунок 10.2 – Изменение угла  $\delta$  во времени

Таким образом, полученная функция  $\delta(t)$  имеет затухающий апериодический характер и означает, что даже в том случае, если КЗ не будет отключено релейной защитой, устойчивость системы сохранится.

### Практическая часть

#### Задача 10.3

В соответствии с вариантом задания для задачи 9.2 требуется:

1. Построить зависимость  $\delta = f(t)$ ;
  2. Графически определить предельное время отключения КЗ.
- Расчет произвести, используя метод последовательных интервалов.

**Практическая работа № 11:**  
**Расчет самозапуска в узле нагрузки с асинхронными двигателями**

**Краткие теоретические сведения**

Самозапуск – это процесс восстановления нормального режима работы после кратковременного отключения источника питания или снижения напряжения на шинах двигателя.

Процесс самозапуска считается возможен, если при кратковременном изменении напряжения в узле нагрузки двигатель не остановится.

Расчет самозапуска асинхронных двигателей (АД) заключается в проверке условий возможности самозапуска, которые сводятся к определению напряжения на шинах двигателя и расчету кратности тока самозапуска.

Последовательность действий при расчете самозапуска [12]:

1. Определяют синхронную угловую скорость самозапускающего электродвигателя:

$$\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot n_c / 60, \text{ с}^{-1}, \quad (11.1)$$

где  $n_c$  – синхронная скорость вращения поля статора АД, об/мин.

Стоит отметить, что в справочных данных двигателя приводится номинальная скорость вращения ротора двигателя  $n_{\text{ном}}$ , а скорость вращения поля статора  $n_c$  определяется исходя из частоты и числа пар полюсов статора, и имеет вполне определенные значения (табл. 11.1):

$$n_c = 60 \cdot f / p, \text{ об/мин}, \quad (11.2)$$

где  $f$  – частота тока статора, составляет 50 Гц;  $p$  – число пар полюсов обмотки статора.

*Таблица 11.1*

**Определение синхронного поля статора АД**

$2p$	2	4	6	8	10	12	14	16	24	48
$n_c$	3000	1500	1000	750	600	500	428	375	250	125

2. Определяется время замедления агрегата при номинальной нагрузке, т.е. то время, при котором двигатель полностью остановится при номинальной нагрузке на валу:

$$\tau_{j_{\text{НОМ}}} = \frac{J_{\text{пр}} \cdot \omega_{\text{с}}^2}{P_{\text{дв.НОМ}}} \cdot 0,001, \text{ с}, \quad (11.3)$$

где  $J_{\text{пр}}$  – приведенный момент инерции механизма и двигателя, кг·м<sup>2</sup>;  
 $P_{\text{дв.НОМ}}$  – номинальная мощность электродвигателя, кВт.

3. Определяют время замедления агрегата при фактической нагрузке, т.е. то время, при котором двигатель полностью остановится при сохранении текущей нагрузки на валу:

$$\tau_j = \tau_{j_{\text{НОМ}}} / k_3, \text{ с}, \quad (11.4)$$

где  $k_3$  – коэффициент загрузки электродвигателя, о. е.

4. Определяется выбег двигателя, т.е. увеличение скольжение, возникающее при нарушении электроснабжения:

– для механизмов с практически постоянным моментом сопротивления зависимость угловой скорости от времени выбега имеет вид:

$$\omega_* = 1 - t_{\text{п}} / \tau_j, \text{ о.е.}, \quad (11.5)$$

– для механизмов с вентиляторным моментом сопротивления:

$$\omega_* = \tau_j / (t_{\text{п}} + \tau_j), \text{ о.е.}, \quad (11.6)$$

где  $t_{\text{п}}$  – время перерыва электроснабжения, с.

5. Определяется скольжение при выбеге АД:

$$s = 1 - \omega_*, \text{ о.е.}, \quad (11.7)$$

6. Определяется номинальное скольжение АД:

$$s_{\text{НОМ}} = 1 - n_{\text{НОМ}} / n_{\text{с}}, \text{ о.е.}, \quad (11.8)$$

7. Определяется критическое скольжение:

– для двигателя с короткого замкнутым ротором мощностью более 100 кВт:

$$s_k = s_{\text{НОМ}} \left( M_k + \sqrt{M_k^2 - 1} \right), \text{ о.е.}, \quad (11.9)$$

при  $M_k > 1,6$  можно принять:

$$s_k = 2 \cdot s_{\text{НОМ}} \cdot M_k, \text{ о.е.}, \quad (11.10)$$

– для двигателя с фазным замкнутым ротором мощностью более 100 кВт или повышенным скольжением:

$$s_k = s_{\text{НОМ}} \sqrt{\frac{(i_{\text{п}} - 1)}{(1 + i_0^2)(1 + 2s_{\text{НОМ}})}}, \text{ о.е.}, \quad (11.11)$$

где  $i_{\text{п}}$  – кратность тока в момент пуска двигателя, о.е.;  $i_0$  – относительный ток холостого хода асинхронного двигателя, определяется по формуле:

$$i_0 = \sin \varphi_{\text{НОМ}} - \frac{\cos \varphi_{\text{НОМ}}}{M_k + \sqrt{M_k^2 - 1}}, \text{ о.е.} \quad (11.12)$$

где  $\cos \varphi_{\text{НОМ}}$  – номинальный коэффициент активной мощности АД.

8. Определяется кратность пускового тока при скольжении  $s$ :

$$i_{\text{пс}} = i_{\text{п}} \cdot \sqrt{\frac{1 + s_k^2}{1 + (s_k / s)^2}}, \text{ о. е.} \quad (11.13)$$

9. Определяется расчетная полная пусковая мощность двигателя при скольжении  $s$ :

$$S_{\text{пс}} = \frac{i_{\text{пс}} \cdot P_{\text{дв.НОМ}}}{\cos \varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta_{\text{НОМ}}} = \frac{P_{\text{пс}}}{\cos \varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta_{\text{НОМ}}}, \text{ кВА}, \quad (11.14)$$

где  $P_{\text{пс}}$  – расчетная активная пусковая мощность при скольжении  $s$ , кВт;  $\eta_{\text{НОМ}}$  – номинальный КПД электродвигателя.

10. Принимается базисной мощность  $S_{\text{б}}$  и базисным напряжением  $U_{\text{б}}$ . Как правило, за значение базисной мощности принимают мощность питающего трансформатора, а базисное напряжением – на-

пряжение в узле подключения электродвигателя.

11. Определяется индуктивное сопротивление двигателя:

$$x_{\text{дв}} = \frac{S_{\text{б}} \cdot U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{ИС}} \cdot U_{\text{б}}^2}, \text{ о.е.}, \quad (11.15)$$

При числе  $n$  однотипных двигателей на секцию, эквивалентное сопротивление двигателей находится по формуле:

$$x_{\text{дв.экв}} = \frac{x_{\text{дв}}}{n}, \text{ о.е.}, \quad (11.16)$$

12. Определяется напряжение в узле подключения двигателя в момент самозапуска:

$$U_{\text{дв}} = \frac{U_{\text{с}}}{1 + \frac{z_{\text{вш}}}{z_{\text{нш}}}}, \text{ о.е.}, \quad (11.17)$$

где  $U_{\text{с}}$  – напряжение системы, в расчетах самозапуска принимается равным 1,05 о.е.;  $z_{\text{вш}}$  – эквивалентное сопротивление системы выше рассматриваемых шин подключения двигателя, о.е.;  $z_{\text{нш}}$  – эквивалентное сопротивление ниже рассматриваемых шин подключения двигателя, о.е.

13. Производится проверка по минимально допустимому напряжению на зажимах двигателя в зависимости от момента сопротивления на валу [2, 13]:

– для механизмов с постоянным моментом сопротивления:

$$U_{\text{дв}} \geq \sqrt{\frac{1,1 \cdot M_{\text{мх}}}{M_{\text{дв.мин}}}} \quad (11.18)$$

– для механизмов с вентиляторным моментом сопротивления:

$$U_{\text{дв}} \geq \sqrt{\frac{1,1 \cdot M_{\text{мх}}}{M_{\text{к}}}} \quad (11.19)$$

где  $M_{\text{мх}}$  – механический момент сопротивления;  $M_{\text{дв.макс}}$ ;  $M_{\text{дв.мин}}$  –

минимальный момент вращения двигателя, который часто принимают равным пусковому;  $M_{\text{дв.мах}}$  – максимальный (критический) момент вращения двигателя.

Механический момент сопротивления вентиляторной нагрузки пропорционален квадрату скорости вращения и может быть представлен:

$$M_{\text{мх}} = M_0 + c \cdot \omega_*^2, \quad (11.20)$$

где  $M_0$  – момент холостого хода;  $c$  – постоянный коэффициент;  $\omega$  – угловая скорость вала механизма.

14. Определяется величина кратности тока самозапуска, проходящего через трансформатор. При простой связи двигателя с системой через понижающий трансформатор:

$$k_i = \frac{U_c}{z_{\text{вш}} + z_{\text{нш}}}. \quad (11.21)$$

Если  $k_i \leq 4$  для трансформаторов мощностью 25 МВА и ниже и  $k_i \leq 2$  для трансформаторов более 25 МВА до 100 МВА, то при числе самозапусков в сутки до трех включительно самозапуск возможен.

### Пример 11.1

Рассчитать возможность самозапуска восьми асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором через 1 с после отключения короткого замыкания. Двигатели питаются от системы неограниченной мощности через трансформатор мощностью 6,3 МВА,  $U_{\text{ном}} = 35/6,3$  кВ,  $U_k = 7,5$  %. Нагрузка на валу двигателей вентиляторная с параметрами:  $M_{\text{мх}} = 0,1 + 0,4 \cdot \omega^2$ .

Исходные данные двигателя:  $P_{\text{ном}} = 500$  кВт,  $U_{\text{ном}} = 6$  кВ,  $\eta_{\text{ном}} = 95,6$  %,  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,92$ ,  $M_k = 2,1$ ,  $i_{\text{п}} = 6$ ,  $n_{\text{ном}} = 2980$  об/мин,  $J_{\text{пр}} = 15$  кг·м<sup>2</sup>,  $k_3 = 0,8$ , число пар полюсов –  $2p = 2$ .

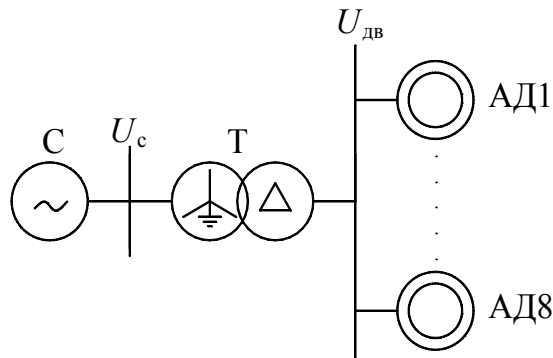


Рисунок 11.1– Расчетная схема электрической схемы

### Решение

Определяем синхронную скорость вращения поля статора двигателя:

$$n_c = 60 \cdot f / p = 60 \cdot 50 / 1 = 3000 \text{ об/мин.}$$

Определяем синхронную угловую скорость самозапускающегося электродвигателя:

$$\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot n_c / 60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 3000 / 60 = 314 \text{ с}^{-1}$$

Определяем время замедления агрегата при номинальной нагрузке:

$$\tau_{j\text{ном}} = \frac{J_{\text{пр}} \cdot \omega_c^2}{P_{\text{дв.ном}}} \cdot 0,001, \text{ с} = \frac{15 \cdot 314^2}{500} \cdot 0,001 = 2,96 \text{ с.}$$

Определяем время замедления агрегата при фактической нагрузке:

$$\tau_j = \tau_{j\text{ном}} / k_3 = 2,96 / 0,8 = 3,7 \text{ с.}$$

Определяем выбег двигателя при вентиляторной нагрузке:

$$\omega_* = \tau_j / (t_{\text{п}} + \tau_j) = 3,7 / (1 + 3,7) = 0,79 \text{ о.е.}$$

Определяем скольжение при выбеге АД:

$$s = 1 - \omega_* = 1 - 0,79 = 0,21 \text{ о.е.}$$

Механическая характеристика асинхронного двигателя, отражающая процесс самозапуска, приведена на рисунке 11.2.

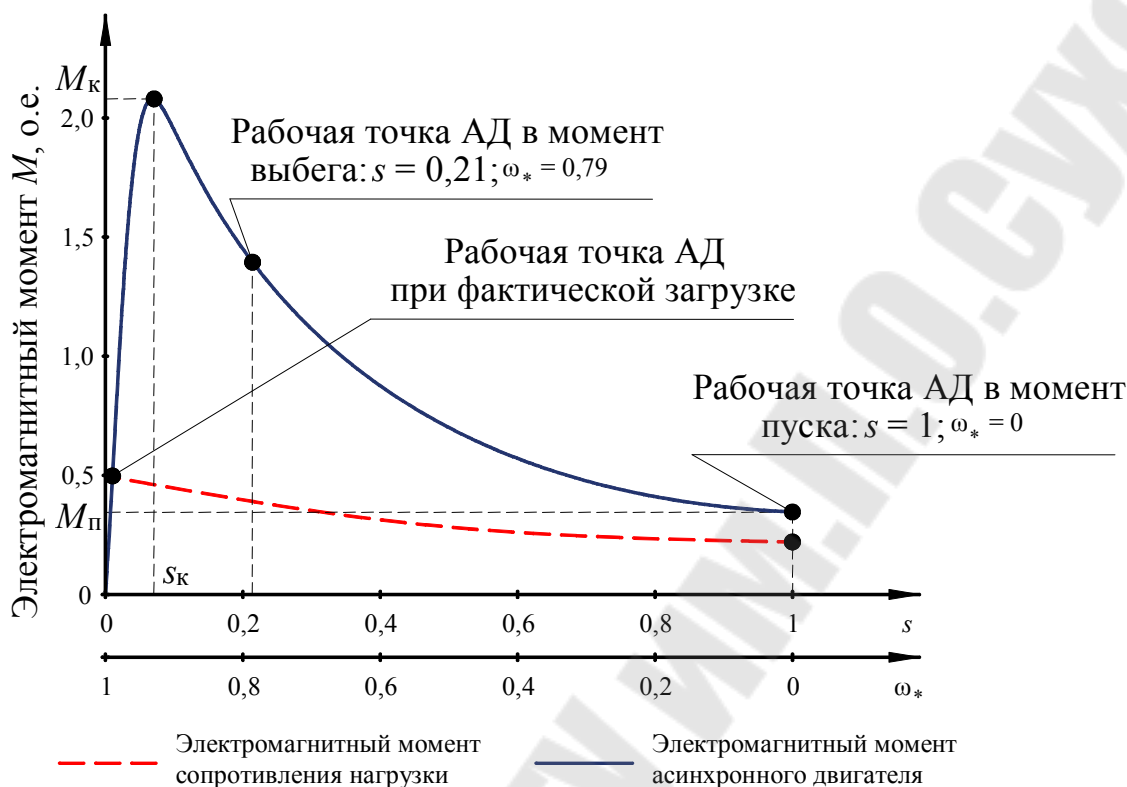


Рисунок 11.2 – К пояснению самозапуска АД

Определяем номинальное скольжение АД:

$$s_{\text{НОМ}} = 1 - 2980/3000 = 0,0067 \text{ о.е.}$$

Определяем критическое скольжение для двигателя с короткого замкнутым ротором мощностью более 100 кВт:

$$s_{\text{к}} = 2 \cdot 0,0067 \cdot 2,1 = 0,028 \text{ о.е.}$$

Определяем кратность пускового тока при скольжении  $s$ :

$$i_{\text{пс}} = i_{\text{п}} \cdot \sqrt{\frac{1 + s_{\text{к}}^2}{1 + (s_{\text{к}}/s)^2}} = 6 \cdot \sqrt{\frac{1 + 0,028^2}{1 + (0,028/0,21)^2}} = 5,95 \text{ о.е.}$$

Определяем расчетную пусковую мощность двигателя при скольжении  $s$ :



$$S_{\text{ПС}} = \frac{i_{\text{ПС}} \cdot P_{\text{ДВ.НОМ}}}{\cos \varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta_{\text{НОМ}}} = \frac{5,95 \cdot 500}{0,92 \cdot 0,956} = 3383 \text{ кВА.}$$

Приводим сопротивления схемы к базисным условиям. Принимаем базисную мощность равную мощности трансформатора  $S_{\text{б}} = 6300 \text{ кВА}$ , базисное напряжение – среднономинальное напряжение в узле подключения двигателя  $U_{\text{б}} = 6,3 \text{ кВ}$ .

Определяется индуктивное сопротивление двигателя:

$$x_{\text{ДВ}} = \frac{S_{\text{б}} \cdot U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{ПС}} \cdot U_{\text{б}}^2} = \frac{6300 \cdot 6^2}{3383 \cdot 6,3^2} = 1,689 \text{ о.е.}$$

Эквивалентное сопротивление двигателей:

$$x_{\text{ДВ.ЭКВ}} = \frac{x_{\text{ДВ}}}{n} = \frac{1,689}{8} = 0,211 \text{ о.е.}$$

Сопротивление трансформатора:

$$x_{\text{Т}} = \frac{U_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{Н}}} = \frac{7,5}{100} \cdot \frac{6300}{6300} = 0,075 \text{ о.е.}$$

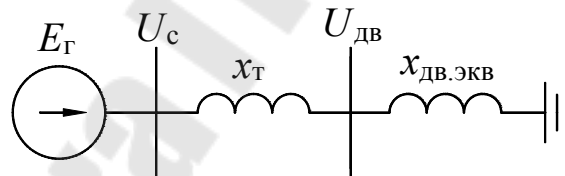


Рисунок 11.3– Схема замещения электрической схемы

Напряжение в узле подключения двигателя в момент самозапуска:

$$U_{\text{ДВ}} = \frac{U_{\text{с}}}{1 + \frac{z_{\text{ВШ}}}{z_{\text{НШ}}}} = \frac{U_{\text{с}}}{1 + \frac{x_{\text{Т}}}{x_{\text{ДВ.ЭКВ}}}} = \frac{1,05}{1 + \frac{0,075}{0,211}} = 0,77 \text{ о.е.}$$

Производим проверку по минимально допустимому напряжению на зажимах двигателя. Для вентиляторной нагрузки определяем механический момент сопротивления в момент выбега:

$$M_{\text{MX}} = 0,1 + 0,4 \cdot \omega_*^2 = 0,1 + 0,4 \cdot 0,79^2 = 0,349 \text{ о.е.}$$

Минимальное напряжение для обеспечения крутящего момента двигателя составит:

$$U_{\text{дв.мин}} = \sqrt{\frac{1,1 \cdot M_{\text{MX}}}{M_{\text{K}}}} = \sqrt{\frac{1,1 \cdot 0,349}{2,1}} = 0,43 \text{ о.е.}$$

По обеспечению минимального напряжения самозапуск возможен, т.к. фактическое значение двигателя  $U_{\text{дв}} = 0,77$  больше  $U_{\text{дв.мин}} = 0,43$ .

Величина кратности тока самозапуска, проходящего через трансформатор:

$$k_i = \frac{U_{\text{c}}}{z_{\text{вш}} + z_{\text{нш}}} = \frac{U_{\text{c}}}{x_{\text{T}} + x_{\text{дв.экв}}} = \frac{1,05}{0,075 + 0,211} = 3,67.$$

Кратность тока самозапуска через трансформатор  $3,67 \leq 4$ , то имеется возможность до трех самозапусков в сутки.

Все условия по проверке самозапуска асинхронных электродвигателей выполнены, поэтому самозапуск возможен не более трех раз в сутки.

### Пример 11.2

К секции шин подключено 6 однотипных АД с фазным ротором с постоянной нагрузкой на валу  $M_{\text{MX}} = 0,2$  о.е. Рассчитать возможность самозапуска асинхронных двигателей через 1 секунду после перерыва электроснабжения.

Исходные данные двигателя:  $P_{\text{ном}} = 1000$  кВт,  $U_{\text{ном}} = 6$  кВ,  $\eta_{\text{ном}} = 94,7\%$ ,  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,83$ ,  $M_{\text{K}} = 2,5$ ,  $M_{\text{п}} = 0,3$ ;  $i_{\text{п}} = 6$ ,  $n_{\text{ном}} = 590$  об./мин,  $J_{\text{пр}} = 320$  кг·м<sup>2</sup>,  $k_3 = 0,8$ , число пар полюсов –  $2p = 10$ .

Исходные данные реактора: тип РБА-6-500-8, номинальное напряжение – 6 кВ, номинальный ток – 500 А, реактивность – 8 %.

Расчетная схема электроснабжения приведена на рисунке 11.4

### Решение

Синхронная скорость вращения поля статора двигателя:

$$n_c = 60 \cdot f / p = 60 \cdot 50 / 10 = 600 \text{ об/мин.}$$

Синхронная угловая скорость самозапускающегося электродвигателя:

$$\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot n_c / 60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 600 / 60 = 62,8 \text{ с}^{-1}$$

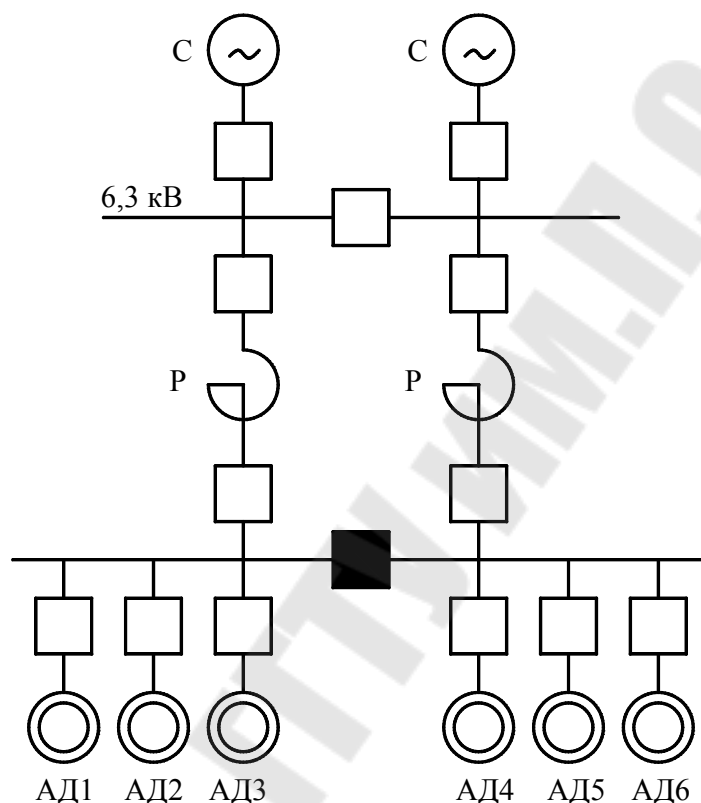


Рисунок 11.4 – Расчетная схема электроснабжения

Примечание: Отключенное состояние выключателя кодируется черным цветом

Время замедления агрегата при номинальной нагрузке:

$$\tau_{j\text{ном}} = \frac{J_{\text{пр}} \cdot \omega_c^2}{P_{\text{дв.ном}}} \cdot 0,001, \text{ с} = \frac{320 \cdot 62,8^2}{1000} \cdot 0,001 = 1,26 \text{ с.}$$

Время замедления агрегата при фактической нагрузке:

$$\tau_j = \tau_{j\text{ном}} / k_3 = 1,26 / 0,8 = 1,58 \text{ с.}$$

Выбег двигателя при постоянной нагрузке:

$$\omega_* = 1 - t_{\Pi} / \tau_j = 1 - 1/1,58 = 0,367 \text{ о.е.}$$

Определяем скольжение при выбеге АД:

$$s = 1 - \omega_* = 1 - 0,367 = 0,633 \text{ о.е.}$$

Номинальное скольжение АД:

$$s_{\text{НОМ}} = 1 - 590/600 = 0,0167 \text{ о.е.}$$

Относительный ток холостого хода асинхронного двигателя:

$$i_0 = \sin \varphi_{\text{НОМ}} - \frac{\cos \varphi_{\text{НОМ}}}{M_{\text{к}} + \sqrt{M_{\text{к}}^2 - 1}} = 0,588 - \frac{0,83}{2,6 + \sqrt{2,6^2 - 1}} = 0,392, \text{ о.е.}$$

Критическое скольжение для двигателя с фазным замкнутым ротором мощностью более 100 кВт:

$$s_{\text{к}} = s_{\text{НОМ}} \sqrt{\frac{(i_{\Pi} - 1)}{(1 + i_0^2)(1 + 2s_{\text{НОМ}})}} = 0,0167 \sqrt{\frac{(6 - 1)}{(1 + 0,392^2)(1 + 2 \cdot 0,0167)}} = 0,034 \text{ о.е.}$$

Кратность пускового тока при скольжении  $s$ :

$$i_{\text{пс}} = i_{\Pi} \cdot \sqrt{\frac{1 + s_{\text{к}}^2}{1 + (s_{\text{к}}/s)^2}} = 6 \cdot \sqrt{\frac{1 + 0,034^2}{1 + (0,034/0,633)^2}} = 5,995 \text{ о. е.}$$

Расчетная пусковая мощность двигателя при скольжении  $s$ :

$$S_{\text{пс}} = \frac{i_{\text{пс}} \cdot P_{\text{дв.НОМ}}}{\cos \varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta_{\text{НОМ}}} = \frac{5,995 \cdot 1000}{0,83 \cdot 0,947} = 7627,1 \text{ кВА.}$$

Приводим сопротивления схемы к базисным условиям. Принимаем базисное напряжение равное среднономинальному значению в узле подключения двигателя  $U_{\text{б}} = 6,3 \text{ кВ}$ , принимаем базисный ток по номинальному току реактора  $I_{\text{б}} = 500 \text{ А}$ , тогда базисная мощность составит:

$$S_{\sigma} = \sqrt{3} \cdot U_{\sigma} \cdot I_{\sigma} = \sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 500 = 5456 \text{ кВА.}$$

Определяется индуктивное сопротивление одного двигателя:

$$x_{\text{дв}} = \frac{S_{\sigma} \cdot U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{ПС}} \cdot U_{\sigma}^2} = \frac{5456 \cdot 6^2}{7627,1 \cdot 6,3^2} = 0,649 \text{ о.е.}$$

Определяется индуктивное сопротивление реактора:

$$x_{\text{р}} = \frac{x_{\text{р}\%}}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{8}{100} \cdot \frac{5456}{5456} = 0,08 \text{ о.е.}$$

Этапы преобразование схемы замещения приведены на рисунке 11.5.

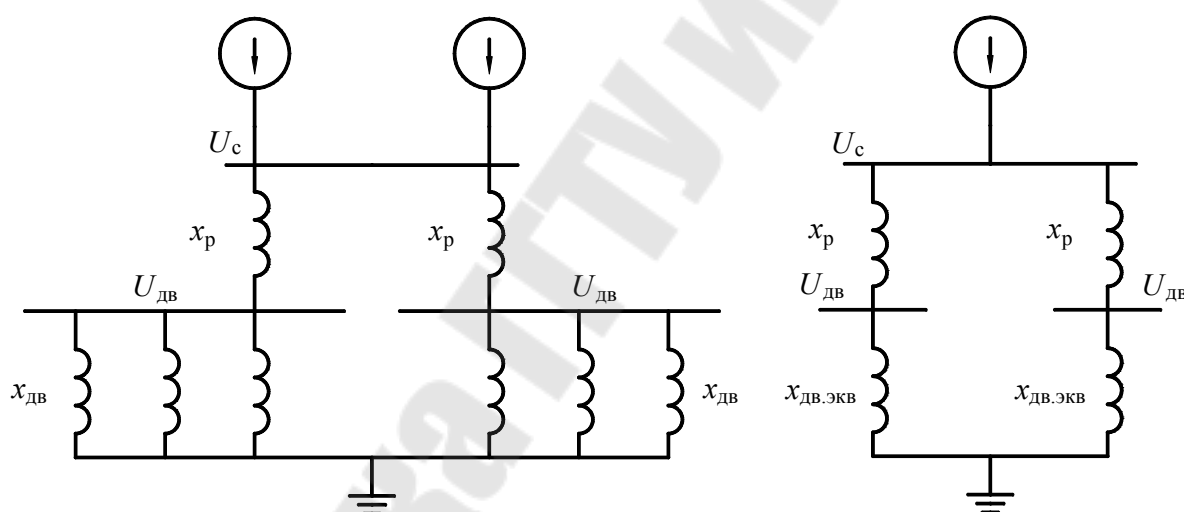


Рисунок 11.5 – Схема замещения электрической сети

Преобразовываем схему замещения к более простому виду. Поскольку секционный выключатель отключен, тогда эквивалентное сопротивление рассчитывается на одну секцию шин:

$$x_{\text{дв.эquiv}} = \frac{x_{\text{дв}}}{n} = \frac{0,649}{3} = 0,216 \text{ о.е.}$$

Напряжение в узле подключения двигателя в момент самозапуска:

$$U_{\text{дв}} = \frac{U_c}{1 + \frac{z_{\text{вш}}}{z_{\text{нш}}}} = \frac{U_c}{1 + \frac{x_p}{x_{\text{дв.экв}}}} = \frac{1,05}{1 + \frac{0,08}{0,216}} = 0,766 \text{ о.е.}$$

Производим проверку по минимально допустимому напряжению на зажимах двигателя при постоянном моменте сопротивления:

$$U_{\text{дв.мин}} = \sqrt{\frac{1,1 \cdot M_{\text{мх}}}{M_{\text{п}}}} = \sqrt{\frac{1,1 \cdot 0,2}{0,3}} = 0,86.$$

Минимальное напряжение составляет  $U_{\text{дв.мин}} = 0,86$  о.е.

Поскольку значение напряжения в узле подключения двигателей снижается до 0,766 о.е. при минимальном значении  $U_{\text{дв.мин}} = 0,86$  самозапуск невозможен.

## Практическая часть

### Задача 11.3

Для расчетной схемы электрической сети, приведенной на рисунке 11.6 после перерыва питания на 0,5 с, требуется:

1. Произвести проверку самозапуска группы асинхронных двигателей;
2. При неуспешном самозапуске группы двигателей найти необходимое количество, обеспечивающее успешность самозапуска.

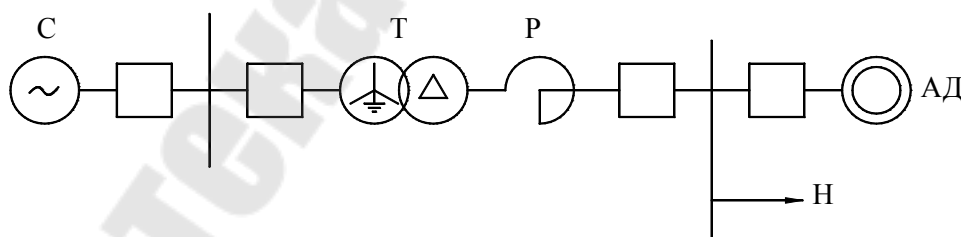


Рисунок 11.6 – Расчетная схема электрической сети

Исходные данные к схеме приведены в таблице приложения П 7.

**Практическая работа № 12:**  
**Расчет пуска в узле нагрузки с асинхронными двигателями.**  
**Выбор группового реактора для снижения уровней пусковых токов**

**Краткие теоретические сведения**

Пуск электродвигателей – это процесс перехода двигателей от неподвижного состояния, соответствующего  $\omega = 0$ , в состояние вращения с номинальной скоростью  $\omega = \omega_n$ .

Условия пуска разделяют легкие, нормальные и тяжелые. При легких пусках требуемый момент в начале вращения двигателя составляет 10–40 % от номинального. В процессе нормального пуска начальный момент не превышает 50–75 % от номинального. Тяжелые условия пуска характеризуются моментами на валу двигателя в момент разгона близким к 100 % от номинального, а в ряде случаев (компрессоры, насосы с открытой задвижкой и т.д.) превышают это значение.

При пуске двигатель потребляет от источника повышенное количество энергии, вследствие чего, происходит увеличение пускового тока. Для асинхронных двигателей с фазным ротором пусковой ток превышает номинальный в 1,5–2 раза, для двигателей с короткозамкнутым ротором в 5–8 раз.

Для облегчения условий пуска и ограничения пускового тока используется пусковой реактор, который снижает напряжение двигателя при пуске за счет падения напряжения в реакторе.

Для выполнения успешного запуска асинхронного двигателя должны выполняться следующие условия:

1. По допустимому электромагнитному моменту двигателя:

$$M_{\text{п}} = M_{\text{п.ном}} \left( \frac{U_{\text{дв}}}{U_{\text{н}}} \right)^2 \geq M_{\text{мх}}, \quad (12.1)$$

где  $M_{\text{п.ном}}$  – номинальный электромагнитный момент двигателя, о.е.;  $U_{\text{дв}}$  – фактическое напряжение на зажимах двигателя, о.е.;  $U_{\text{н}}$  – номинальное напряжение на двигателя, о.е.;  $M_{\text{мх}}$  – механический момент сопротивления, о.е.

2. По допустимому напряжению на зажимах двигателя:

$$U_{\text{дв}} \geq U_{\text{дв.мин}}, \quad (12.2)$$

3. По кратности пускового тока проходящего через трансформатор:

$$k_i \geq k_{i_{\min}}, \quad (12.3)$$

где  $k_{i_{\min}}$  – допустимая кратность тока, проходящего через трансформатор, определяется аналогично расчету самозапуска.

### Пример 12.1

От системы С мощностью 500 МВА через трансформатор Т с параметрами  $S_T = 25 \text{ МВА}$ ,  $U_K = 10,5 \%$ ,  $K_T = 121/6,3$  от секции шин через кабель АПвП 3(1x240) длиной 0,5 км питается асинхронный двигатель АД с параметрами  $P_{\text{ном}} = 1,1 \text{ МВт}$ ;  $U_{\text{ном}} = 6 \text{ кВ}$ ;  $\cos \varphi = 0,9$ ;  $\eta = 93,6 \%$ ;  $i_{\text{п}} = 6,6$ ,  $M_{\text{п}} = 0,45$ . Нагрузка на валу двигателей постоянная  $M_{\text{мх}} = 0,25$ . На общих шинах вместе с двигателем подключена нагрузка Н:  $S_{\text{наг}} = 10 \text{ МВА}$ ;  $\cos \varphi_{\text{наг}} = 0,9$ .

В схеме используется реактор РТОС 6(10)-630-0,7 с номинальными параметрами:  $U_{\text{ном}} = 6 \text{ кВ}$ ;  $I_{\text{ном}} = 630 \text{ А}$ ;  $x_p = 0,7 \text{ Ом}$ .

Расчетная схема приведена на рисунке 12.1.

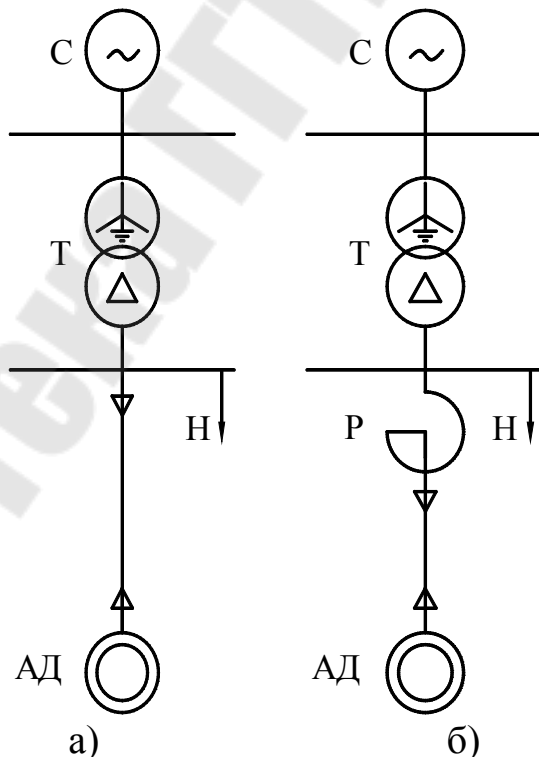


Рисунок 12.1 –Схема электрической сети:  
а) при отсутствии реактора; б) при включении реактора



Требуется определить:

– остаточное напряжение на шинах и выводах двигателя в момент пуска при наличии и отсутствии пускового реактора и сравнить с допустимым.

– величину снижения момента двигателя после подключения реактора.

### Решение

Расчет выполним в относительных единицах, приближенном приведении. За базисную мощность принимаем мощность трансформатора  $S_{\sigma} = S_T = 25$  МВА, за базисное напряжение на шинах  $U_{\sigma} = 6,3$  кВ.

Реактивное сопротивление системы:

$$x_c = \frac{S_{\sigma}}{S_{кз}} = \frac{25}{500} = 0,05 \text{ о.е.}$$

Сопротивление трансформатора:

$$x_T = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{25}{25} = 0,105 \text{ о.е.}$$

Активная мощность нагрузки в именованных единицах:

$$P_H = S_H \cdot \cos\varphi = 10 \cdot 0,9 = 9 \text{ кВт.}$$

Реактивная мощность нагрузки в именованных единицах:

$$Q_H = P_H \cdot \operatorname{tg}(\arccos(\varphi)) = 9 \cdot \operatorname{tg}(\arccos(0,9)) = 4,36 \text{ квар.}$$

Полная мощность нагрузки в именованных единицах:

$$S_H = P_H + jQ_H = 9 + j4,36 \text{ МВА.}$$

Приводим мощность нагрузки в базисным единицам:

$$S_H = P_H / S_{\sigma} + jQ_H / S_{\sigma} = 9/25 + j4,36/25 = 0,36 + j0,17 \text{ о.е.}$$

Активное сопротивление нагрузки:

$$r_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{P_{\text{н}}} = \frac{1^2}{0,36} = 2,78 \text{ о.е.}$$

Реактивное сопротивление нагрузки:

$$x_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{Q_{\text{н}}} = \frac{1^2}{0,17} = 5,88 \text{ о.е.}$$

Удельное активное и реактивное сопротивление кабеля АПВП 3(1x240) по каталожным данным составляет  $r_0 = 0,130$  Ом/км,  $x_0 = 0,071$  Ом/км. Сопротивление кабеля в относительных единицах составит:

$$r_{\text{кл}} = r_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{ср.ном}}^2} = 0,13 \cdot 5 \cdot \frac{25}{6,3^2} = 0,4 \text{ о.е.}$$

$$x_{\text{кл}} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{ср.ном}}^2} = 0,071 \cdot 5 \cdot \frac{25}{6,3^2} = 0,22 \text{ о.е.}$$

$$z_{\text{кл}} = r_{\text{кл}} + jx_{\text{кл}} = 0,4 + j0,22 \text{ о.е.}$$

Номинальная мощность реактора:

$$S_{\text{ном}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{ном}} \cdot U_{\text{ном}} = \sqrt{3} \cdot 630 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 6,5 \text{ МВА.}$$

Сопротивление реактора:

$$x_{\text{р}} = x_{\text{р}} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{н}}} = 0,7 \cdot \frac{25}{6,5} = 2,69 \text{ о.е.}$$

Пусковая мощность двигателя:

$$S_{\text{пуск}} = \frac{P_{\text{дв}} \cdot i_{\text{п}}}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{1,1 \cdot 6,6}{0,936 \cdot 0,9} = 8,618 \text{ МВА.}$$

Сопротивление двигателя в момент пуска:

$$x_{\text{дв}} = \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{пуск}}} = \frac{25}{8,618} = 3,02 \text{ о.е.}$$

Схема замещения электрической сети приведена на рисунке 12.2.

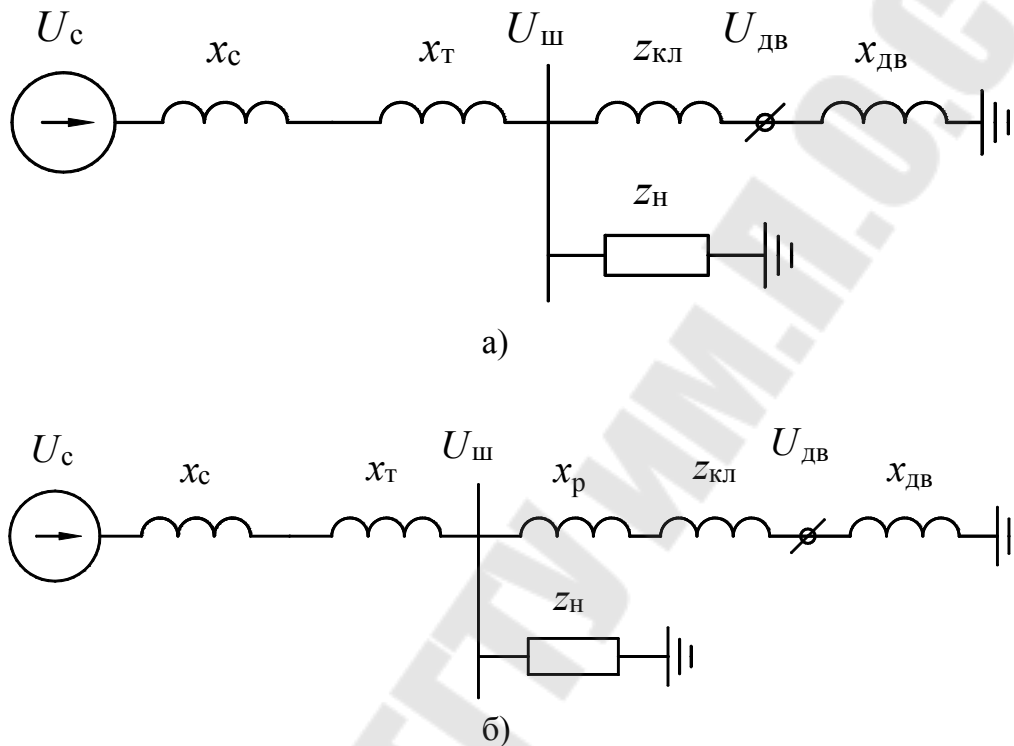


Рисунок 12.2 –Схема замещения электрической сети:  
а) при отсутствии реактора; б) при включении реактора

Производим расчет минимально-допустимого напряжения для прокрута двигателем постоянной нагрузки на валу:

$$U_{\text{дв.мин}} = \sqrt{\frac{1,1 \cdot M_{\text{мх}}}{M_{\text{п}}}} = \sqrt{\frac{1,1 \cdot 0,25}{0,45}} = 0,78.$$

### При отсутствии реактора

Определяем напряжение на шинах. Эквивалентное сопротивление выше и ниже шин составит:

$$z_{\text{вш}} = jx_c + jx_T = j0,05 + j0,105 = j0,155 = 0,155e^{j90^\circ} \text{ о.е.}$$

Сопротивление ниже шин составит:

$$\begin{aligned}
 z_{\text{НШ}} &= \frac{(r_{\text{кл}} + jx_{\text{кл}} + jx_{\text{дв}}) \cdot (r_{\text{н}} + jx_{\text{н}})}{(r_{\text{кл}} + jx_{\text{кл}} + jx_{\text{дв}}) + (r_{\text{н}} + jx_{\text{н}})} = \\
 &= \frac{(0,4 + j0,22 + j3,02) \cdot (2,78 + j5,88)}{(0,4 + j0,22 + j3,02) + (2,78 + j5,88)} = 0,498 + j2,14 = \\
 &= 2,198e^{j76,9^\circ} \text{ о.е.}
 \end{aligned}$$

Напряжение на шинах составит:

$$U_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{с}}}{1 + \frac{z_{\text{вш}}}{z_{\text{НШ}}}} = \frac{1,05}{1 + \frac{0,155}{2,198}} = 0,98 \text{ о.е.}$$

Определяем напряжение на зажимах двигателя. Эквивалентное сопротивление выше и ниже зажимов двигателя составит:

$$z_{\text{вд}} = r_{\text{кл}} + jx_{\text{кл}} = 0,4 + j0,22 = 0,457e^{j28,8^\circ} \text{ о.е.}$$

Сопротивление ниже шин составит:

$$z_{\text{нд}} = jx_{\text{дв}} = j3,02 = 3,02e^{j90^\circ} \text{ о.е.}$$

Напряжение на зажимах двигателя составит:

$$U_{\text{дв}} = \frac{U_{\text{ш}}}{1 + \frac{z_{\text{вд}}}{z_{\text{нд}}}} = \frac{0,98}{1 + \frac{0,457}{3,02}} = 0,85 \text{ о.е.}$$

Определим снижение пускового момента за счет потери напряжения в питающем кабеле:

$$M_{\text{п}} = M_{\text{п}} \left( \frac{U_{\text{дв}}}{U_{\text{н}}} \right)^2 = 0,45 \left( \frac{0,85}{1} \right)^2 = 0,32 \text{ о.е.}$$

Условия запуска по обеспечению минимального напряжения и пускового момента двигателя выполняются:

$$U_{\text{дв}} = 0,85 \leq U_{\text{дв.мин}} = 0,78.$$

$$M_{\text{п}} = 0,32 \leq M_{\text{мх}} = 0,25.$$

### При включении реактора

Определяем напряжение на шинах. Эквивалентное сопротивление выше и ниже шин составит:

$$z_{\text{вш}} = jx_{\text{с}} + jx_{\text{т}} = j0,05 + j0,105 = j0,155 = 0,155e^{j90^\circ} \text{ о.е.}$$

Сопротивление ниже шин составит:

$$\begin{aligned} z_{\text{нш}} &= \frac{(jx_{\text{р}} + r_{\text{кл}} + jx_{\text{кл}} + jx_{\text{дв}}) \cdot (r_{\text{н}} + jx_{\text{н}})}{(jx_{\text{р}} + r_{\text{кл}} + jx_{\text{кл}} + jx_{\text{дв}}) + (r_{\text{н}} + jx_{\text{н}})} = \\ &= \frac{(j2,69 + 0,4 + j0,22 + j3,02) \cdot (2,78 + j5,88)}{(j2,69 + 0,4 + j0,22 + j3,02) + (2,78 + j5,88)} = 0,77 + j3,066 = \\ &= 3,16e^{j75,9^\circ} \text{ о.е.} \end{aligned}$$

Напряжение на шинах составит:

$$U_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{с}}}{1 + \frac{z_{\text{вш}}}{z_{\text{нш}}}} = \frac{1,05}{1 + \frac{0,155}{3,16}} = 1,0 \text{ о.е.}$$

Определяем напряжение на зажимах двигателя. Эквивалентное сопротивление выше и ниже зажимов двигателя составит:

$$\begin{aligned} z_{\text{вд}} &= jx_{\text{р}} + r_{\text{кл}} + jx_{\text{кл}} = j2,69 + 0,4 + j0,22 = 0,4 + j2,91 = \\ &= 2,94e^{j82,2^\circ} \text{ о.е.} \end{aligned}$$

Сопротивление ниже шин составит:

$$z_{\text{нд}} = jx_{\text{дв}} = j3,02 = 3,02e^{j90^\circ} \text{ о.е.}$$

Напряжение на зажимах двигателя составит:

$$U_{\text{дв}} = \frac{U_{\text{ш}}}{1 + \frac{z_{\text{вд}}}{z_{\text{нд}}}} = \frac{1,0}{1 + \frac{2,94}{3,02}} = 0,51 \text{ о.е.}$$

Снижение пускового момента при реакторном пуске составит [11, стр. 374]:

$$M_{\text{п.р}} = M_{\text{п}} \left( \frac{U_{\text{дв}}}{U_{\text{н}}} \right)^2 = 0,45 \left( \frac{0,51}{1} \right)^2 = 0,12 \text{ о.е.}$$

Таким образом, в момент пуска не обеспечиваются условия минимально-допустимого напряжения и условие обеспечения пускового момента:

$$U_{\text{дв}} = 0,51 \leq U_{\text{дв.мин}} = 0,86.$$

$$M_{\text{п.р}} = 0,12 \leq M_{\text{мх}} = 0,3.$$

Включение токоограничивающего реактора недопустимо.

### Пример 12.2

Двигатель питается от системы неограниченной мощности через линию длиной 20 км, трансформатор мощностью 25 МВА,  $U_{\text{ном}}=35/6,3\text{кВ}$ ,  $U_{\text{к}}=7,5\%$  и алюминиевую кабельную линию длиной 2 км сечением  $35 \text{ мм}^2$  и  $x_0=0,0637 \text{ Ом/км}$ . Мощность неотключаемой нагрузки равна 4 МВАр.

Исходные данные двигателя:  $P_{\text{ном}} = 0,4 \text{ МВт}$ ;  $U_{\text{ном}} = 6 \text{ кВ}$ ;  $\cos \varphi = 0,89$ ;  $\eta = 93,5 \%$ ;  $i_{\text{п}} = 5,1$ .

Расчетная схема электрической сети приведена на рисунке 12.3.

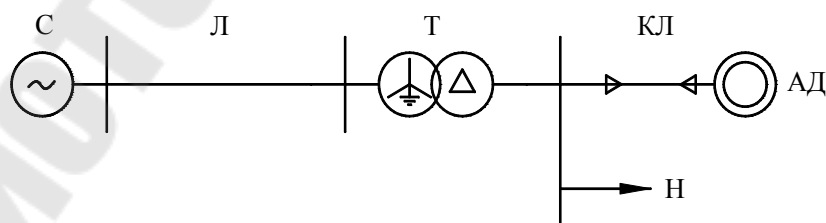


Рисунок 12.3 –Схема электрической сети

Выбрать групповой реактор для снижения пускового тока, проходящего через трансформатор на  $d=7 \%$ : и проверить пуск двигателя по условию допустимой кратности тока.

### Решение

Расчет выполним в относительных единицах, приближенном приведении. За базисную мощность принимаем мощность трансформатора  $S_{\text{б}} = S_{\text{т}} = 25$  МВА, за базисное напряжение на шинах  $U_{\text{б}} = 6,3$  кВ.

Сопротивление линии:

$$x_{\text{л}} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{ср}}^2} = 0,4 \cdot 20 \cdot \frac{25}{37^2} = 0,146 \text{ о.е.}$$

Сопротивление трансформатора:

$$x_{\text{т}} = \frac{U_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{н}}} = \frac{7,5}{100} \cdot \frac{25}{25} = 0,075 \text{ о.е.}$$

Приводим мощность нагрузки в базисным условиям:

$$Q_{\text{н}} = Q_{\text{н}} / S_{\text{б}} = 4 / 25 = 0,16 \text{ о.е.}$$

Реактивное сопротивление нагрузки:

$$x_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{Q_{\text{н}}} = \frac{1^2}{0,16} = 6,25 \text{ о.е.}$$

Пусковая мощность двигателя:

$$S_{\text{пуск}} = \frac{P_{\text{дв}} \cdot i_{\text{п}}}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{0,4 \cdot 5,1}{0,935 \cdot 0,89} = 2,45 \text{ МВА.}$$

Сопротивление двигателя в момент пуска:

$$x_{\text{дв}} = \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{пуск}}} = \frac{25}{2,45} = 10,2 \text{ о.е.}$$

Активное сопротивление кабельной линии определяем по формуле (1.4):

$$r_{\text{кл}} = K_{\text{в}} \cdot C_{\text{с}} \cdot \rho \cdot L / S \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{ср}}^2} = 1,044 \cdot 1,02 \cdot 0,0294 \cdot 2 \cdot 10^3 / 35 \cdot \frac{25}{6,3^2} = 1,1 \text{ о.е.}$$

Реактивное сопротивление кабельной линии:

$$x_{\text{кл}} = x_0 \cdot l \frac{S_6}{U_{\text{ср.ном}}^2} = 0,0637 \cdot 2 \cdot \frac{25}{6,3^2} = 0,08 \text{ о.е.}$$

Расчетная схема замещения приведена на рисунке 12.4.

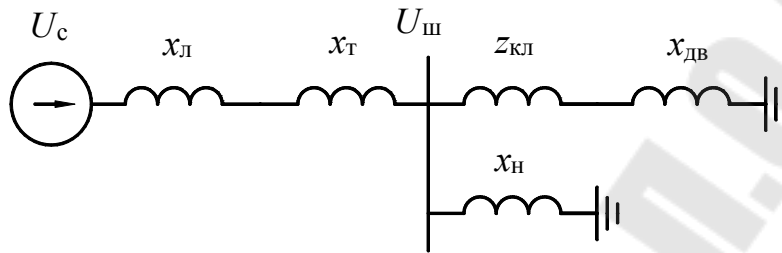


Рисунок 12.4 –Схема замещения электрической сети

Определяем эквивалентное сопротивление схемы:

$$z_{\text{эКВ}} = jx_{\text{л}} + jx_{\text{т}} + \frac{(r_{\text{кл}} + jx_{\text{кл}} + jx_{\text{дв}}) \cdot jx_{\text{н}}}{r_{\text{кл}} + jx_{\text{кл}} + jx_{\text{дв}} + jx_{\text{н}}} = j0,146 + j0,075 + \frac{(1,1 + j0,08 + j10,2) \cdot j6,25}{1,1 + j0,08 + j10,2 + j6,25} = 0,157 + j4,118 = 4,12e^{j87,8^\circ} \text{ о.е.}$$

Значение тока, проходящего через трансформатор, составит:

$$k_i = \frac{U_c}{z_{\text{эКВ}}} = \frac{1,05}{4,12} = 0,245 \text{ о.е.}$$

Составим уравнение для снижения тока, проходящего через трансформатор, на  $d=7\%$ :

$$k_i' = \left(1 - \frac{d}{100}\right) \cdot k_i = \frac{U_c}{z_{\text{эКВ}} + x_p}$$

Выражаем сопротивление реактора



$$x_p = \frac{U_c / \left(1 - \frac{d}{100}\right) - k_i \cdot z_{\text{экв}}}{k_i} = \frac{1,05 / \left(1 - \frac{7}{100}\right) - 0,245 \cdot 4,12}{0,245} = 0,489 \text{ о.е.}$$

Определяем активное сопротивление реактора:

$$x_p = x_p \cdot \frac{U_{\text{сп}}^2}{S_{\sigma}} = 0,489 \cdot \frac{6,3^2}{25} = 0,77 \text{ Ом.}$$

Принимаем реактор РТОС 6(10)-630-0,7  $U_{\text{ном}} = 6 \text{ кВ}$ ;  
 $I_{\text{ном}} = 630 \text{ А}$ ;  $x_p = 0,7 \text{ Ом}$ .

Определяем кратность тока, проходящего через трансформатор после установки реактора:

$$k_i' = \frac{U_c}{z_{\text{экв}} + x_p} = \frac{U_c}{4,12 + 0,077} = 0,25.$$

По допустимой кратности тока запуск двигателя обеспечивается, поскольку  $k_i' = 0,25 < k_i \leq 4$ .

### Задача 12.2

Группа двигателей питается от системы С мощностью  $S_{\text{КЗ}}$  через линию Л длиной  $l$ , трансформатор Т мощностью  $S_{\text{Т}}$ . К общей шине вместе с двигателями подключена реактивная нагрузка мощностью  $Q_{\text{Н}}$ . Расчетная схема приведена на рисунке 12.5.

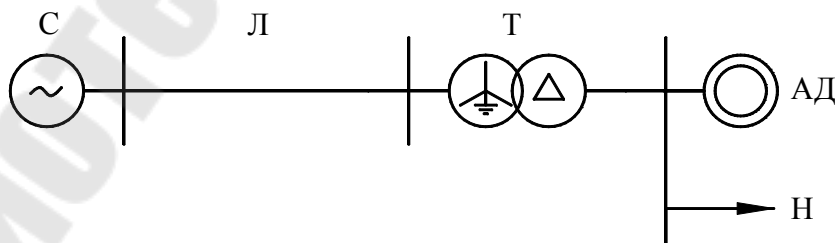


Рисунок 12.5 –Схема электрической сети

Требуется проверить все условия пуска и выбрать групповой реактор для снижения пускового тока на величину  $d$ . Исходные данные к задаче приведены в приложении П 8.

## Практическая работа № 13: Расчет времени выбега и пуска асинхронного двигателя

### Краткие теоретические сведения

В процессе запуска группы двигателей большие токи могут вызвать понижение напряжения, создать неблагоприятные условия на другие двигатели и привести к тому, что рассматриваемый двигатель фактически будет разгоняться медленнее, чем это предполагалось при неизменном напряжении на его зажимах. В этих условиях требуется определение времени пуска двигателя и определение зависимости пускового тока от времени [11, стр. 371].

Процесс движения двигателя описывается уравнением:

$$T_j \frac{ds}{dt} = M_{\text{дв}} - M_{\text{мх}} = \Delta M, \quad (13.1)$$

где  $M_{\text{дв}}$  – электромагнитный момент двигателя;  $M_{\text{мх}}$  – момент сопротивления рабочего механизма;  $T_j$  – постоянная инерции агрегата, определяется суммой маховых моментов двигателя и механизма.

Определение времени пуска двигателя требует выяснения зависимости вращающего момента двигателя  $M_{\text{дв}}$  и момента сопротивления  $M_{\text{мх}}$  от скольжения  $s$ .

### Расчет времени пуска асинхронного двигателя

Зачастую для расчета времени пуска используются упрощенные решения при аппроксимации зависимостей  $M_{\text{дв}} = f(s)$  и  $M_{\text{мх}} = f(s)$ , используя метод последовательных интервалов. Для этого производится разбиение на равные участки по скольжению  $\Delta s$ :

$$\Delta s_1 = \Delta s_2 = \dots = \Delta s_i. \quad (13.2)$$

Тогда уравнение движения на любом интервале будет иметь вид:

$$\Delta M_i = T_j \frac{\Delta s_i}{\Delta t_i}. \quad (13.3)$$

Откуда общее время от момента пуска до установившегося режима имеет вид:

$$t = \frac{T_j}{\Delta M} \int_{s_1}^{s_2} ds = T_j \sum_{i=1}^n \frac{\Delta s_i}{\Delta M_i}. \quad (13.4)$$

### Расчет времени выбега асинхронного двигателя

При постоянном моменте сопротивления  $M_{\text{мх}} = \text{const}$  можно получить аналитическое выражение в течение всего процесса выбега двигателя. Электромагнитный момент двигателя может быть представлен формулой Клосса:

$$M_{\text{дв}} = \frac{2 \cdot M_{\text{к}}}{s / s_{\text{кр}} + s_{\text{кр}} / s}, \quad (13.5)$$

где  $M_{\text{к}}$  – кратность критического момента двигателя (иногда используется обозначение  $b_{\text{к}}$ );  $s_{\text{кр}}$  – критическое скольжение двигателя.

Тогда величина  $\Delta M = M_{\text{дв}} - M_{\text{мх}}$  при подстановке формулы (13.5) примет вид:

$$\Delta M = M_{\text{мх}} \left/ \left( \frac{2 \cdot b_{\text{с}} \cdot s_{\text{кр}} \cdot s}{2 \cdot b_{\text{с}} \cdot s_{\text{кр}} \cdot s - (s^2 + s_{\text{кр}}^2)} - 1 \right) \right., \quad (13.6)$$

где  $b_{\text{с}} = M_{\text{к}} / M_{\text{мх}}$ .

Осуществив подстановку выражения (13.6) в формулу (13.4) получим общее выражение по расчету времени выбега (или пуска) двигателя:

$$\begin{aligned} t &= \frac{T_j}{M_{\text{мх}}} \int_{s_1}^{s_2} \left( 1 + \frac{2 \cdot b_{\text{с}} \cdot s_{\text{кр}} \cdot s}{s^2 - 2 \cdot b_{\text{с}} \cdot s_{\text{кр}} \cdot s + s_{\text{кр}}^2} \right) ds = \\ &= \frac{T_j}{M_{\text{мх}}} \left[ (s_2 - s_1) + 2 \cdot b_{\text{с}} \cdot s_{\text{кр}} \int_{s_1}^{s_2} \left( \frac{s}{s^2 - 2 \cdot b_{\text{с}} \cdot s_{\text{кр}} \cdot s + s_{\text{кр}}^2} \right) ds \right], \end{aligned} \quad (13.7)$$

Из формулы (13.7) время выбега от угловой скорости  $\omega_1 = (1 - s_1) \cdot \omega_{\text{с}}$  до  $\omega_2 = (1 - s_2) \cdot \omega_{\text{с}}$  при  $\omega_2 < \omega_1$  и при  $M_{\text{мх}} < 1$  определяется по формуле:

$$t_B = \frac{T_j}{M_{\text{MX}}} \left[ s_2 - s_1 + b_c \cdot s_{\text{кр}} \left( \ln \frac{a}{b} + c \right) \right], \quad (13.8)$$

где параметра  $a$ ,  $b$  и  $c$ :

$$a = s_2^2 - 2 \cdot b_c \cdot s_{\text{кр}} \cdot s_2 + s_{\text{кр}}^2; \quad (13.9)$$

$$b = s_1^2 - 2 \cdot b_c \cdot s_{\text{кр}} \cdot s_1 + s_{\text{кр}}^2; \quad (13.10)$$

$$c = \frac{2 \cdot b_c (\varphi_2 - \varphi_1)}{\sqrt{1 - b_c^2}}, \quad (13.11)$$

где  $\varphi_1 = \arctg \left( \frac{s_1 / s_{\text{кр}} - b_c}{\sqrt{1 - b_c^2}} \right)$ ;  $\varphi_2 = \arctg \left( \frac{s_2 / s_{\text{кр}} - b_c}{\sqrt{1 - b_c^2}} \right)$  выражаются в радианах.

Время выбега от предшествующего установленного режима до полной остановки определяется при подстановке в формулу (13.8)  $s_2=1$  и  $s_1=s_{\text{уст}}$ .

### Пример 13.1

Определить время пуска асинхронного двигателя при постоянной нагрузке на валу  $M_{\text{MX}} = 1,0$ , критическом моменте  $M_{\text{к}} = 3,0$  и скольжении  $s_{\text{к}} = 0,2$  с постоянной инерции агрегата  $T_j = 5,3$  сек.

### Решение

Результаты построения электромагнитной характеристики двигателя, определяемые по формуле (13.5), и ее аппроксимированное значение приведены на рисунке 13.1.

Аппроксимация механической характеристики двигателя осуществляется по формуле:

$$M_{\text{cp}(i)} = \frac{M_i + M_{i-1}}{2}. \quad (13.12)$$

Расчетные значения электромагнитной характеристики двигателя приведены в таблице 13.1.

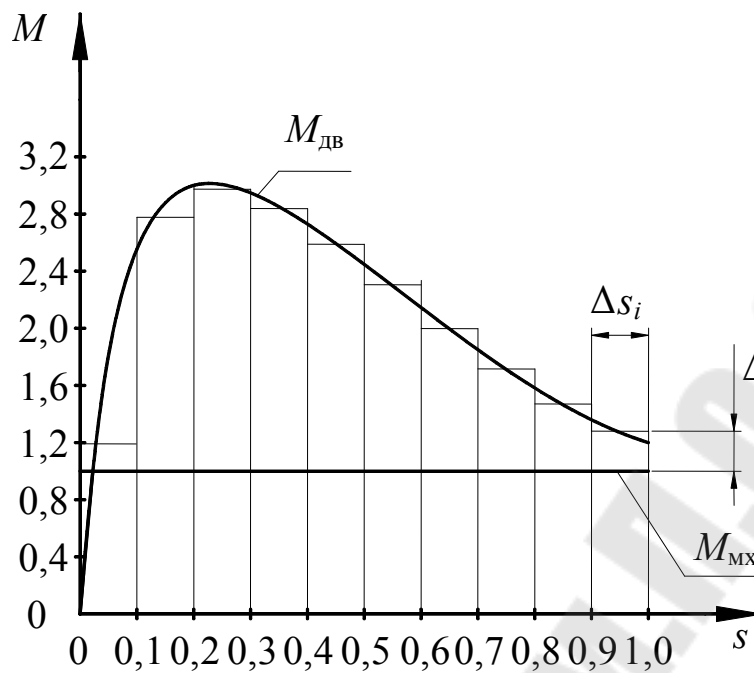


Рисунок 13.1 – Пояснение к графоаналитическому решению уравнения движения ротора асинхронного двигателя

Таблица 13.1 – Расчетные значения для построения характеристики двигателя и момента сопротивления

Скольжение, $s$ , о.е.	Электромагнитный момент двигателя, $M_{дв}$ , о.е.	Момент сопротивления, $M_c$ , о.е.
1	1,15	1
0,9	1,27	1
0,8	1,41	1
0,7	1,58	1
0,6	1,80	1
0,5	2,07	1
0,4	2,40	1
0,3	2,77	1
0,2	3,00	1
0,1	2,40	1
10-10	3E-09	1

За расчетный интервал принимаем величину скольжения  $\Delta s_i = 0,1$ , тогда для первого интервала времени результат аппроксимации электромагнитного момента составит:

$$M_{ср.дв(1)} = \frac{1,15 + 1,27}{2} = 1,21 \text{ о.е.}$$

Небаланс моментов:

$$\Delta M_{(1)} = M_{\text{ср.дв}(1)} - M_{\text{мх.}(1)} = 1,21 - 1 = 0,21 \text{ о.е.}$$

Время разгона на интервале времени составит:

$$\Delta t_{(1)} = T_j \frac{\Delta s_{(1)}}{\Delta M_{(1)}} = 5,3 \cdot \frac{0,1}{0,21} = 2,5 \text{ с.}$$

Результаты расчета на остальных участках характеристики аналогичны и сведены в таблицу 13.2.

Таблица 13.2 – Результаты расчета времени пуска двигателя

Номер интервала, $i$	$M_{\text{ср.дв}}$ , о.е	$M_{\text{с}}$ , о.е	$\Delta M$ , о.е.	$T_j$ , с	$\Delta s$ , о.е.	$\Delta t$ , о.е.
1	1,21	1	0,21	5,30	0,10	2,50
2	1,34	1	0,34	5,30	0,10	1,55
3	1,50	1	0,50	5,30	0,10	1,06
4	1,69	1	0,69	5,30	0,10	0,77
5	1,93	1	0,93	5,30	0,10	0,57
6	2,23	1	1,23	5,30	0,10	0,43
7	2,58	1	1,58	5,30	0,10	0,33
8	2,88	1	1,88	5,30	0,10	0,28
9	2,70	1	1,70	5,30	0,10	0,31
10	1,20	1	0,20	5,30	0,10	2,65
Итого						10,45

Таким образом, полное время разгона двигателя составило:

$$t_{(1)} = \sum \Delta t_{(i)} = 10,45 \text{ с.}$$

### Пример 13.2

Определить время полного выбега двигателя (от предшествующей установившейся скорости до полной остановки), обусловленное снижением напряжения в сети на 50 %, при номинальной нагрузке на валу  $M_{\text{мх}}=1,0$ , номинальном критическом моменте двигателя  $M_{\text{к}}=3,0$  и скольжении  $s_{\text{к}}=0,2$  с постоянной инерции агрегата  $T_j=5,3$  сек.

### Решение

Принимая за базис номинальное напряжение двигателя, опреде-

лим характеристику мощности при снижении напряжения на 50 %:

$$M_{\text{к}} = M_{\text{к}} \left( \frac{U_{\text{дв}}}{U_{\text{н}}} \right)^2 = 3,0 \left( \frac{0,5}{1,0} \right)^2 = 0,75 \text{ о.е.}$$

Построение электромагнитной характеристики двигателя осуществляется по формуле (13.5) и приведено на рисунке 13.2.

Установившееся скольжение  $s_{\text{уст}}$  определяется точкой равновесия электромагнитного момента и механического момента сопротивления в результате чего, уравнение движения ротора можно представить как:

$$M_{\text{дв}} - M_{\text{мх}} = \frac{2 \cdot M_{\text{к}}}{s / s_{\text{кр}} + s_{\text{кр}} / s} - M_{\text{мх}} = 0. \quad (13.13)$$

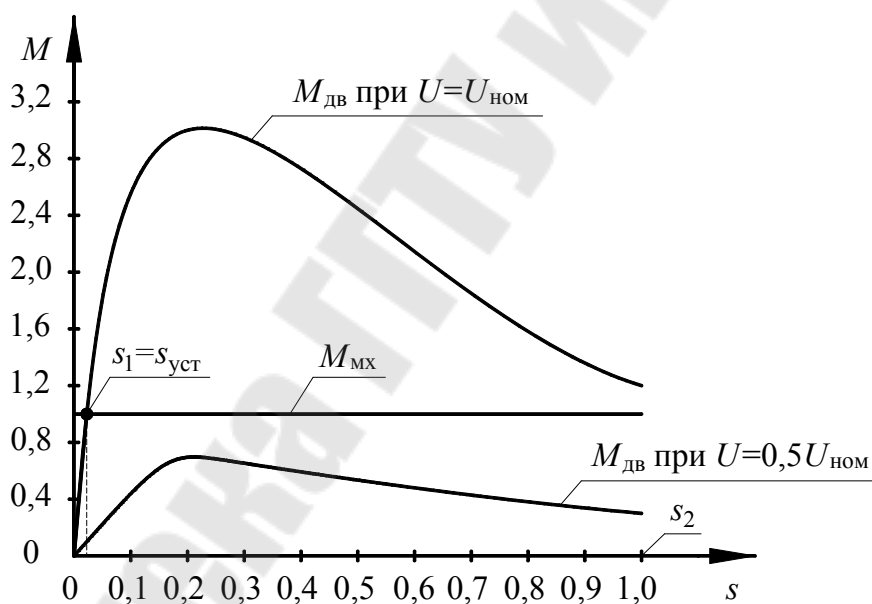


Рисунок 13.2 –К пояснению о выбеге двигателя

Примечание: На график величина  $s_2 = 1$ , что соответствует режиму полной остановки двигателя.

Приведенное уравнение является квадратным и имеет следующие корни:

$$\begin{cases} s_{(1)} = -\frac{s_{\text{кр}} \sqrt{M_{\text{к}}^2 - M_{\text{мх}}^2} - s_{\text{кр}} \cdot M_{\text{к}}}{M_{\text{мх}}}; \\ s_{(2)} = \frac{s_{\text{кр}} [M_{\text{к}} + \sqrt{(M_{\text{к}} - M_{\text{мх}})(M_{\text{к}} + M_{\text{мх}})}]}{M_{\text{мх}}}. \end{cases}$$

Для двигательного режима баланс моментов соблюдается при значении  $s_{(1)}$ :

$$s_{(1)} = s_1 = s_{\text{уст}} = -\frac{0,2\sqrt{3^2 - 1^2} - 0,2 \cdot 3}{1} = 0,034 \text{ о.е.}$$

Определим величину  $b_c$  с учетом снижения напряжения:

$$b_c = M_{\text{к}} / M_{\text{мх}} = 0,75 / 1 = 0,75 \text{ о.е.}$$

Определяем параметры  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ :

$$\varphi_1 = \arctg\left(\frac{s_1 / s_{\text{кр}} - b_c}{\sqrt{1 - b_c^2}}\right) = \arctg\left(\frac{0,034 / 0,2 - 0,75}{\sqrt{1 - 0,75^2}}\right) \cdot \frac{\pi}{180} = 1,42 \text{ рад.}$$

$$\varphi_2 = \arctg\left(\frac{s_2 / s_{\text{кр}} - b_c}{\sqrt{1 - b_c^2}}\right) = \arctg\left(\frac{1 / 0,2 - 0,75}{\sqrt{1 - 0,75^2}}\right) \cdot \frac{\pi}{180} = -0,712 \text{ рад.}$$

Определяем параметры  $a$ ,  $b$  и  $c$ :

$$a = s_2^2 - 2 \cdot b_c \cdot s_{\text{кр}} \cdot s_2 + s_{\text{кр}}^2 = 1^2 - 2 \cdot 0,75 \cdot 0,2 \cdot 1 + 0,2^2 = 0,74.$$

$$b = s_1^2 - 2 \cdot b_c \cdot s_{\text{кр}} \cdot s_1 + s_{\text{кр}}^2 = 0,034^2 - 2 \cdot 0,75 \cdot 0,2 \cdot 0,034 + 0,2^2 = 0,031.$$

$$c = \frac{2 \cdot b_c (\varphi_2 - \varphi_1)}{\sqrt{1 - b_c^2}} = \frac{2 \cdot 0,75 (1,42 - (-0,712))}{\sqrt{1 - 0,75^2}} = 4,835.$$

Время полной остановки двигателя составит:



$$\begin{aligned}
 t_{\text{в}} &= \frac{T_j}{M_{\text{мх}}} \left[ s_2 - s_1 + b_c \cdot s_{\text{кр}} \left( \ln \frac{a}{b} + c \right) \right] = \\
 &= \frac{5,3}{1} \left[ 1 - 0,034 + 0,75 \cdot 0,2 \left( \ln \frac{0,74}{0,031} + 4,835 \right) \right] = 11,46 \text{ с.}
 \end{aligned}$$

Таким образом, полное время останова двигателя составит 11,46 с.

### Задача 13.3

В соответствии с вариантом задания, приведенным в таблице П9, определить время пуска двигателя при вентиляторной нагрузке на валу. В задаче механический момент сопротивления приведен зависимостью:

$$M_{\text{мх}} = M_0 + c \cdot (1-s)^2, \quad (13.14)$$

где  $M_0$  – момент холостого хода;  $c$  – постоянный коэффициент.

### Задача 13.4

Определить время выбега двигателя при котором происходит изменение скольжения от  $s_1 = s_{\text{уст}}$  до  $s_2$ . Исходные данные к задаче приведены в таблице П9.

## Практическая работа № 14: Расчет критического напряжения опрокидывания асинхронных двигателей

### Краткие теоретические сведения

В нормальных условиях отдельные асинхронные двигатели имеют большие запасы статической устойчивости, так как во многом определяются запасом максимального и рабочего вращающегося момента. Такое утверждение справедливо для единичных двигателей или группы двигателей, питающихся от шин с напряжением, не зависящим от режимов работы двигателей. В противном случае, когда двигатели питаются от генераторов соизмеримой (конечной) мощности, напряжение на шинах может существенно изменяться при отклонении режимов работы двигателя и, в конечном счете, приводить к нарушению устойчивости (опрокидыванию).

Рассмотрим систему, приведенную на рисунке 14.1, где электрические сопротивления генератора  $x_g$ , линии  $x_l$ , трансформатора  $x_t$ , индуктивное сопротивление рассеивания  $x_s$  и изменяющее активное сопротивление  $r_2/s$  соизмеримы по величине.

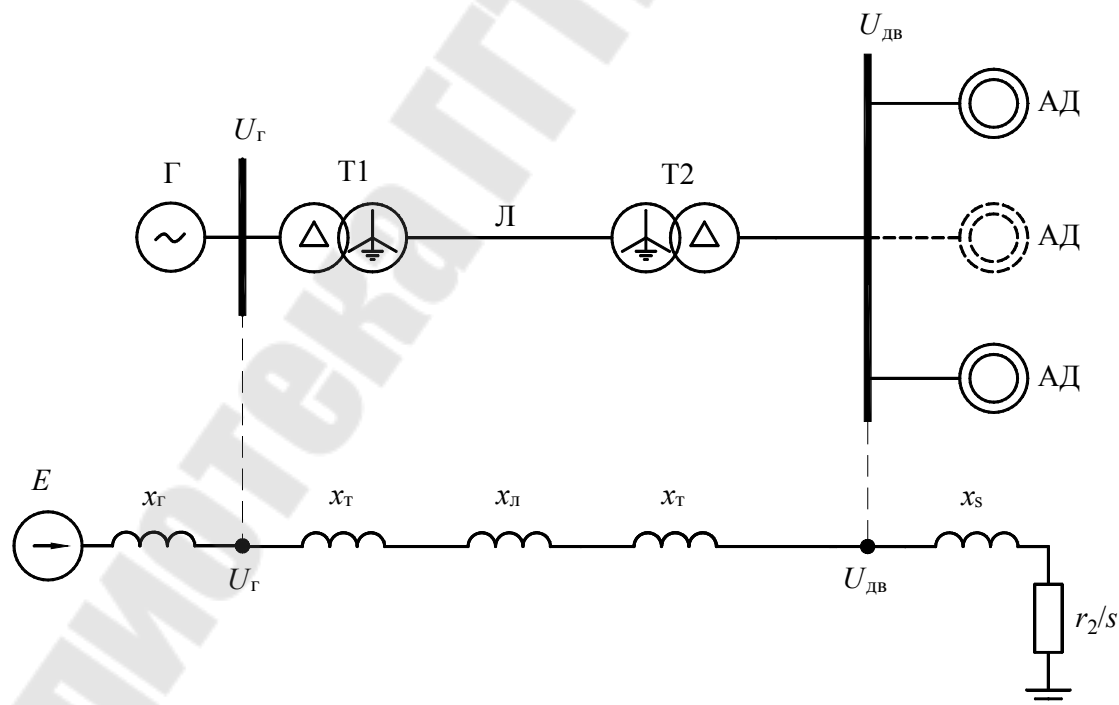


Рисунок 14.1 – Схема электрической сети и ее схема замещения

Примечание: Для упрощения анализа устойчивости индуктивное сопротивление рассеивания двигателя не учитывалось

Ток, обусловленный ЭДС генератора, определяется по формуле:

$$I = \frac{E}{\sqrt{x^2 + (r_2/s)^2}}. \quad (14.1)$$

где  $x = x_r + x_{T1} + x_l + x_{T2} + x_s$  – суммарное сопротивление сети.

Сопротивления рассеяния двигателя в относительных единицах определяется по формуле:

$$x_s = \frac{U^2}{2M_k}, \quad (14.2)$$

где  $M_k$  – кратность максимального момента, о.е.

Активная мощность, потребляемая двигателем, определяется по формуле:

$$P = I^2 \cdot (r_2/s). \quad (14.3)$$

Подставляя выражение (14.1) в (14.3) и упрощая его, получим:

$$P = \frac{E^2 \cdot r_2 s}{(xs)^2 + r_2^2}. \quad (14.4)$$

Значение критического скольжения двигателя определяется из условия  $dP/ds = 0$ , откуда:

$$s_{кр} = \frac{r_2}{x}. \quad (14.5)$$

Подставляя критическое скольжение в формулу (14.4), получаем выражения для определения максимальной электромагнитной мощности, развиваемой двигателем:

$$P_m = \frac{E^2}{2x}. \quad (14.6)$$

На рисунке 14.2 приведено пояснение исследуемых величин.

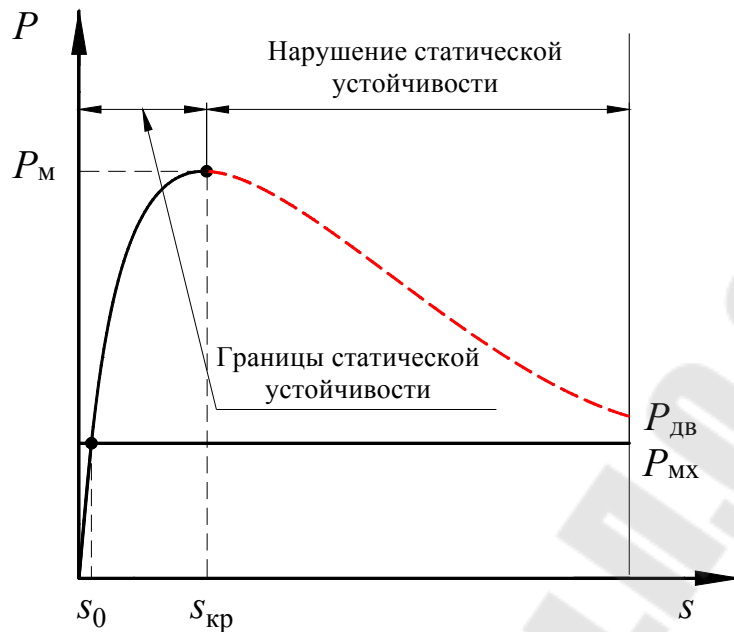


Рисунок 14.2 – К пояснению о максимальной мощности и критическом скольжении

Область статической устойчивости двигателя находится между синхронной угловой скоростью вращения и критическим скольжением. В нормальных условиях двигатель работает в границах статической устойчивости (рисунок 14.2). Нарушение статической устойчивости может быть вызвано увеличением механической мощности или снижением напряжения. Напряжение, при котором максимальная электромеханическая мощность становится равная электромеханической ( $P_M = P_{мх} = P_0$ ), называется критическим и определяется исходя из (14.6) по формуле:

$$E_{кр} = \sqrt{2P_0x}, \quad (14.7)$$

где  $P_0$  – фактическая мощность двигателя.

Уровень статической устойчивости, как отдельных асинхронных двигателей, так и узлов нагрузки в целом оценивают путем расчета коэффициента запаса по напряжению:

$$k_U = \frac{E_0 - E_{кр}}{E_0}, \quad (14.8)$$

где  $E_0$  – ЭДС генераторов в номинальном режиме работы.

Для обеспечения устойчивости нагрузки, коэффициент запаса не должен быть меньше 0,15 в нормальных условиях и 0,1 в аварийных режимах работы энергосистемы [3].

### Пример 14.1

6 асинхронных двигателей серии А-315-59-4У4 питаются от электрической станции с установленными двумя турбогенераторами Т-6-2У3 через трансформатор Т1 мощностью 16 МВА,  $U_{\text{ном}}=6,5/115$  кВ,  $U_{\text{к}}=10,5\%$ , линию длиной 300 км, трансформатор Т2 мощностью 16 МВА,  $U_{\text{ном}}=115/6,5$  кВ,  $U_{\text{к}}=10,5\%$ . Схема электрической сети и схема замещения приведены на рисунке 14.1.

Исходные данные:

– двигатель:  $P_{\text{ном}} = 1$  МВт;  $P_0 = 0,9$  МВт;  $U_{\text{ном}} = 6$  кВ;  
 $\cos \varphi = 0,89$ ;  $\eta = 93,5\%$ ;  $M_{\text{к}} = 2,1$ .

– генератор:  $P_{\text{ном}} = 6$  МВт;  $\cos \varphi = 0,8$ ;  $U_{\text{н}} = 6,3$  кВ;  
 $x'_{*d} = 0,1708$  о.е.

Требуется определить критическое значение ЭДС генератора и коэффициент запаса по напряжению.

### Решение

Принимаем базисные величины. За базисное напряжение принимаем напряжение на шинах двигателей  $U_{\text{б}} = U_{\text{дв}} = 6,3$  кВ, за базисную мощность принимаем суммарную мощность асинхронных двигателей  $S_{\text{б}} = 6 \cdot P_{\text{ном}} = 6 \cdot 1 = 6$  МВт.

Напряжение на шинах подключения двигателя в относительных единицах:

$$U_{\text{дв}} = \frac{U_{\text{дв}}}{U_{\text{б}}} = \frac{6,3}{6,3} = 1 \text{ о.е.}$$

Определяем эквивалентное реактивное сопротивление двух генераторов в относительных единицах при приближенном приведении:

$$x_{\text{Г}} = \frac{1}{n} x'_{*d} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном}}} = 0,5 \frac{6}{6/0,8} = 0,4 \text{ о.е.}$$

Определяем реактивное сопротивление трансформатора Т1 в относительных единицах:

$$x_{T1} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{6}{16} = 0,039 \text{ о.е.}$$

Определяем реактивное сопротивление линии в относительных единицах:

$$x_L = 0,5 \cdot x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{cp}^2} = 0,4 \cdot 300 \cdot \frac{6}{115^2} = 0,054 \text{ о.е.}$$

Определяем реактивное сопротивление трансформатора T2 в относительных единицах:

$$x_{T2} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{6}{16} = 0,039 \text{ о.е.}$$

Определяем реактивное сопротивление рассеивания двигателя в относительных единицах:

$$x_s = \frac{U^2}{2M_k} = \frac{1^2}{2 \cdot 2,1} = 0,238 \text{ о.е.}$$

Суммарное сопротивление питающей сети:

$$x_c = x_T + x_{T1} + x_L + x_{T2} = 0,4 + 0,039 + 0,054 + 0,039 = 0,532 \text{ о.е.}$$

Фактическая потребляемая активная и реактивная мощность двигателей в относительных единицах:

$$P_{\Sigma 0} = \frac{n \cdot P_0}{S_{\bar{6}}} = \frac{6 \cdot 0,9}{6} = 0,9 \text{ о.е.}$$

$$Q_{\Sigma 0} = \frac{n \cdot P_0 \cdot \text{tg}(\arccos(\varphi))}{S_{\bar{6}}} = \frac{6 \cdot 0,9 \cdot \text{tg}(\arccos(0,89))}{6} = 0,461 \text{ о.е.}$$

Определяем ЭДС генератора:

$$E' = \sqrt{\left( U_c + \frac{Q_{\Sigma 0} \cdot x_c}{U_c} \right)^2 + \left( \frac{P_{\Sigma 0} \cdot x_c}{U_c} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left( 1 + \frac{0,461 \cdot 0,532}{1} \right)^2 + \left( \frac{0,9 \cdot 0,532}{1} \right)^2} = 1,33 \text{ о.е.}$$

Определяем критическое значение ЭДС генератора:

$$E_{\text{кр}} = \sqrt{2P_{\Sigma 0}(x_c + x_s)} = \sqrt{2 \cdot 0,9(0,532 + 0,238)} = 1,18 \text{ о.е.}$$

Коэффициент запаса ЭДС генератора:

$$k_E = \frac{E' - E_{\text{кр}}}{E'} = \frac{1,33 - 1,18}{1,18} = 0,127 \text{ о.е.}$$

Требуемый коэффициент запаса не соблюдается, так как фактическое значение 0,127 о.е. меньше установленного 0,15 о.е.

#### Задача 14.2

Группа высоковольтных насосных агрегатов питается от системы С мощностью  $S_{\text{кз}}$  через линию Л длиной  $l$ , трансформатор Т мощностью  $S_{\text{Т}}$ . Расчетная схема приведена на рисунке 14.3.

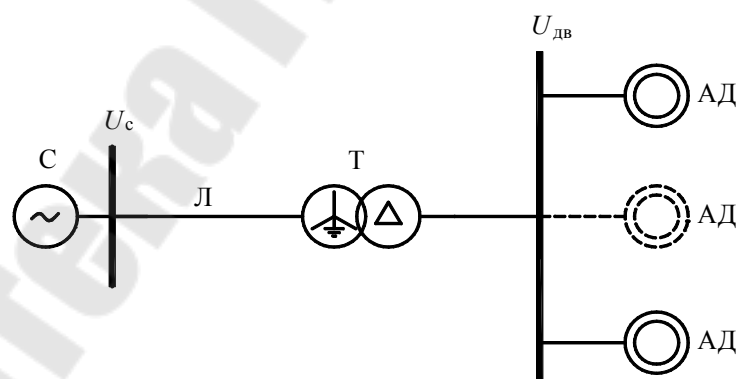


Рисунок 14.3 – Расчетная схема электрической сети

Требуется определить величину критического напряжения питающей системы и коэффициент запаса по напряжению. Исходные данные к задаче приведены в приложении П 8.

## Практическая работа № 15: Набросы нагрузки на электрические двигатели

### Краткие теоретические сведения

К резким изменениям режимов работы относятся набросы нагрузки на асинхронные и синхронные двигатели. Наборос нагрузки определяет изменение момента сопротивления в связи с увеличением нагрузки на приводимом двигателе механизме или уменьшением ее с последующим восстановлением исходного момента.

Основной задачей при исследовании влияния наброса нагрузки на устойчивость работы электродвигателей является предельного времени снятия нагрузки.

Изменение механического момента с  $M_{\text{мх1}}$  до  $M_{\text{мх2}}$  синхронного двигателя приведет к появлению площадки ускорения, ограниченной площадью  $abca$  и приведенной на рисунке 15.1. Это приводит к увеличению угла  $\delta$  начнет и торможению двигателя. Если площадка ускорения превысит площадку торможения, то динамическая устойчивость будет нарушена и двигатель остановится.

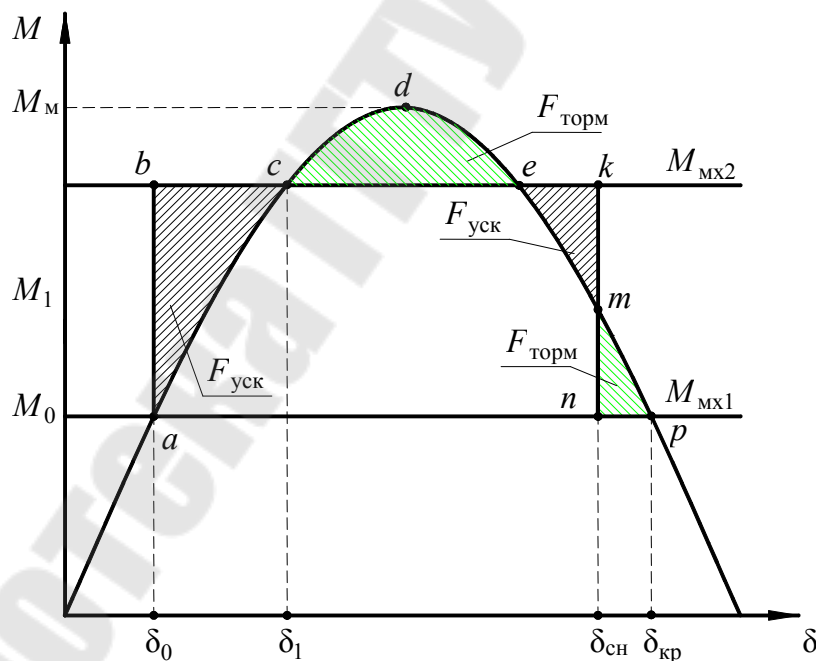


Рисунок 15.1 – Площадки ускорения и торможения при набросе нагрузки на синхронный двигатель

Для обеспечения устойчивой работы синхронного двигателя необходимо снизить момент сопротивления рабочего механизма с  $M_{\text{мх2}}$  до  $M_{\text{мх1}}$ . Предельный угол снятия нагрузки в данном случае определя-



ется равенством площадок ускорения и торможения после решения интегрального уравнения:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{сн}} (M_{\text{мх2}} - M_{\text{м}} \sin \delta) d\delta + \int_{\delta_{сн}}^{\delta_{\text{кр}}} (M_{\text{мх1}} - M_{\text{м}} \sin \delta) d\delta. \quad (15.1)$$

Максимальный электромагнитный момент определяется по формуле:

$$M_{\text{м}} = \frac{E'U}{\omega x'_{d\Sigma}}, \text{ о.е.} \quad (15.2)$$

где  $E'$  – переходная ЭДС синхронного двигателя, о.е.;  $\omega$  – угловая частота сети, о.е.;  $x'_{d\Sigma}$  – суммарное сопротивление питающей сети, о.е.

После интегрирования и преобразования уравнения получим величину предельного угла снятия набора нагрузки:

$$\delta_{сн} = \frac{M_{\text{мх2}}\delta_0 - M_{\text{мх1}}\delta_{\text{кр}} - M_{\text{м}}(\cos\delta_{\text{кр}} - \cos\delta_0)}{M_{\text{мх2}} - M_{\text{мх1}}}. \quad (15.3)$$

Предельное время, в течение которого необходимо снять нагрузку, определяется численным решением уравнения движения ротора синхронного двигателя.

При набросе нагрузки на асинхронный двигатель скольжение начинает увеличиваться, и если механический момент сопротивления больше электромагнитного момента двигатель остановится. Если снять наброс нагрузки до предельного скольжения  $s_{\text{пр}}$  двигатель начнет разгоняться и в конечном счете, вернется в устойчивую область работы со скольжением  $s_0$ .

Таким образом, для сохранения динамической устойчивости асинхронного двигателя необходимо соблюдения условия:

$$s < s_{\text{пр}}, \quad (15.4)$$

где  $s$  – фактическое скольжение в момент снятия наброса нагрузки, о.е.

Предельное время отключение определяется, решая уравнение

движение ротора (см. формулу 13.5) относительно переменной  $dt$  и интегрируя в пределах рабочего скольжения  $s_0$  и предельно допустимого  $s_{пр}$ :

$$t_{пр} = \frac{T_j}{M_{MX2}} \int_{s_0}^{s_{пр}} \left( 1 + \frac{2 \cdot M_k / M_{MX2} \cdot s_{кр} \cdot s}{s^2 - 2 \cdot M_k / M_{MX2} \cdot s_{кр} \cdot s + s_{кр}^2} \right) ds. \quad (15.5)$$

На рисунке 15.2 приведена электромеханическая характеристика асинхронного двигателя при набросе нагрузки.

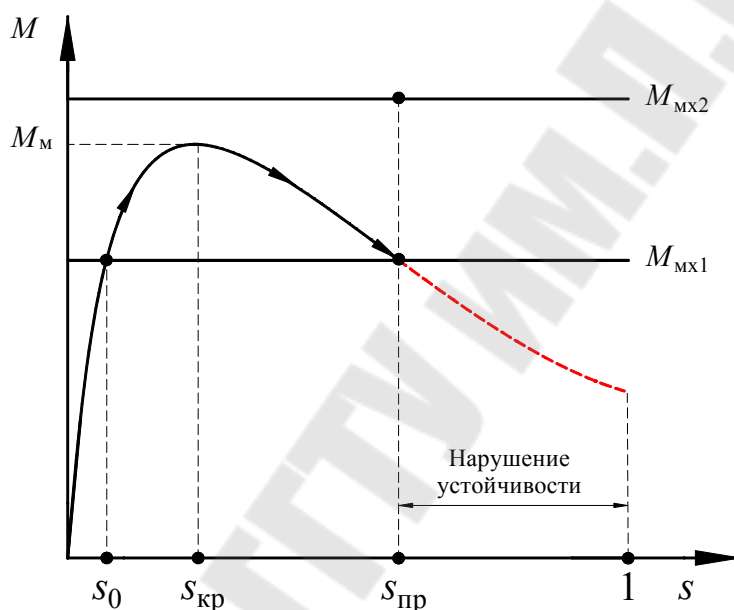


Рисунок 15.2 – Наброс нагрузки на асинхронный двигатель

### Пример 15.1

Синхронный двигатель СДН14-49-6У3 мощностью 800 кВт, номинальным напряжением 10 кВ, коэффициентом мощности  $\cos \varphi = 0,8$  и переходным сопротивлением  $x'_d = 0,41$  о.е. питается от шин бесконечно большой мощности через трансформатор мощностью 1,6 МВА,  $U_{НОМ} = 35/10,5$  кВ и  $U_k = 6,5$  %.

Наброс нагрузки на синхронный двигатель происходит скачком с нулевого момента  $M_{MX1} = 0$  до максимального  $M_{MX2} = M_M$  и с  $M_{MX1} = 0$  до  $M_{MX2} = 1,5M_M$ . Требуется определить предельный угол снятия наброса нагрузки.

### Решение

Расчетная схема электрической сети и её схема замещения приведены на рисунке 15.3.

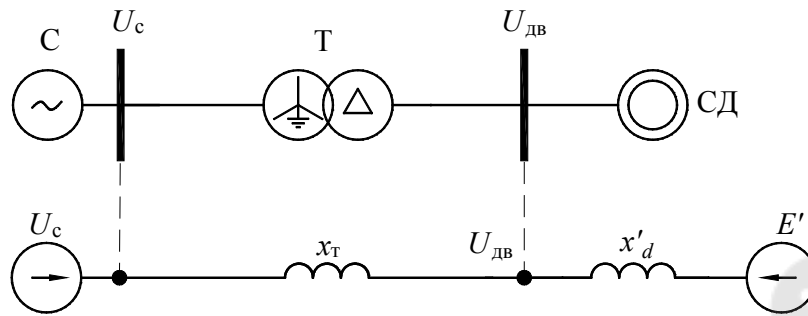


Рисунок 15.3 – Расчетная схема электрической схемы и её схема замещения

Приводим сопротивления схемы к базисным условиям. Принимаем базисное напряжение равное среднономинальному значению в узле подключения двигателя  $U_{\text{б}} = 10,5$  кВ, за базисную мощность принимаем активную мощность синхронного двигателя  $S_{\text{б}} = 0,8$  МВА.

Мощность двигателя в относительных единицах:

$$P_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{дв}}}{S_{\text{б}}} = \frac{0,8}{0,8} = 1 \text{ о.е.}$$

$$Q_{\text{дв}} = \frac{Q_{\text{дв}}}{S_{\text{б}}} = \frac{P_{\text{дв}} \cdot \text{tg}(\arccos(\varphi))}{S_{\text{б}}} = \frac{0,8 \cdot \text{tg}(\arccos(0,8))}{0,8} = 0,83 \text{ о.е.}$$

Напряжение на шинах двигателя в относительных единицах:

$$U_{\text{дв}} = \frac{U_{\text{дв}}}{U_{\text{б}}} = \frac{10,5}{10,5} = 1 \text{ о.е.}$$

Определяем реактивное сопротивление генератора в относительных единицах при приближенном приведении:

$$x'_d = x'_{*d} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}} = x'_{*d} \frac{S_{\text{б}}}{P_{\text{НОМ}} / \cos \varphi_{\text{НОМ}}} = \frac{0,41 \cdot 0,8}{0,8 / 0,8} = 0,328 \text{ о.е.}$$

Определяем реактивное сопротивление трансформатора Т в относительных единицах:

$$x_{\text{Т}} = \frac{U_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{Н}}} = \frac{6,5}{100} \cdot \frac{0,8}{1,6} = 0,033 \text{ о.е.}$$

Сопротивление передающей сети:

$$x'_{d\Sigma} = x'_d + x_{T*} = 0,328 + 0,033 = 0,361 \text{ о.е.}$$

Определяем переходную ЭДС двигателя за переходным реактивным сопротивлением  $x'_{d*}$ :

$$\begin{aligned} E' &= \sqrt{\left( U_{\text{дв}} - \frac{Q_{\text{дв}} \cdot x'_{d\Sigma}}{U_{\text{дв}}} \right)^2 + \left( \frac{P_{\text{дв}} \cdot x'_{d\Sigma}}{U_{\text{дв}}} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left( 1 - \frac{0,83 \cdot 0,361}{1} \right)^2 + \left( \frac{1 \cdot 0,361}{1} \right)^2} = 0,79 \text{ о.е.} \end{aligned}$$

Максимальный электромагнитный момент:

$$M_{\text{м}} = \frac{E'U}{\omega x'_{d\Sigma}} = \frac{0,79 \cdot 1}{1 \cdot 0,361} = 2,2 \text{ о.е.}$$

Предельный угол снятия наброса нагрузки при набросе нагрузки с  $M_{\text{мх1}} = 0$  до  $M_{\text{мх2}} = M_{\text{м}}$  составит:

$$\delta_{\text{сн}} = \left( \frac{2,2 \cdot 0 - 0 \cdot 180 - 2,2(\cos(180) - \cos(0))}{2,2 - 0} \right) \frac{180}{\pi} = 115^\circ.$$

Предельный угол снятия наброса нагрузки при набросе нагрузки с  $M_{\text{мх1}} = 0$  до  $M_{\text{мх2}} = 1,5M_{\text{м}}$  составит:

$$\delta_{\text{сн}} = \left( \frac{1,5 \cdot 2,2 \cdot 0 - 0 \cdot 180 - 2,2(\cos(180) - \cos(0))}{1,5 \cdot 2,2 - 0} \right) \frac{180}{\pi} = 76^\circ.$$

На рисунке 15.4 приведена характеристика электромагнитного момента с указанием площадок ускорения и торможения при набросе нагрузки и физической интерпретации предельного угла снятия наброса.

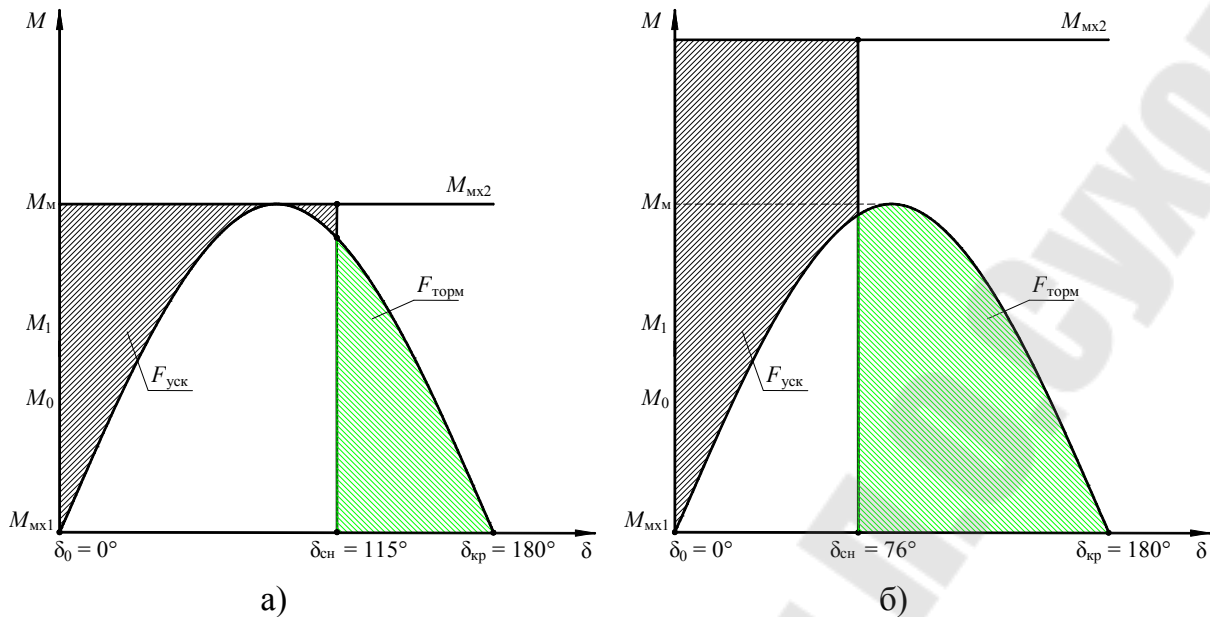


Рисунок 15.4 – наброс нагрузки на синхронный двигатель:  
 а – при набросе нагрузки с  $M_{MX1} = 0$  до  $M_{MX2} = M_M$ ;  
 б –  $M_{MX1} = 0$  до  $M_{MX2} = 1,5M_M$

### Пример 15.2

Асинхронный двигатель, электромагнитный момент которого описывается зависимостью  $M_{дв}(s) = \frac{2 \cdot M_k}{s/s_{кр} + s_{кр}/s} = \frac{2 \cdot 3}{s/0,2 + 0,2/s}$ , работает с постоянным электромагнитным моментом сопротивления  $M_{MX1} = 2$  о.е. Определить предельное время снятия наброса нагрузки при увеличении механического момента сопротивления с  $M_{MX1} = 2$  до  $M_{MX2} = 4$  о.е. Постоянная инерции двигателя составляет  $T_j = 5,3$  сек.

### Решение

Определим пусковой момент асинхронного двигателя при  $s = 1$ :

$$M_{дв}(s) = \frac{2 \cdot M_k}{s/s_{кр} + s_{кр}/s} = \frac{2 \cdot 3}{1/0,2 + 0,2/1} = 1,15.$$

Установившийся режим работы асинхронного двигателя описывается уравнением:

$$M_{дв} - M_{MX1} = \frac{2 \cdot M_k}{s/s_{кр} + s_{кр}/s} - M_{MX1} = 0. \quad (15.6)$$

Уравнение является квадратным и имеет два корня (рассмотрено

в примере 13.2):

$$\begin{cases} s_{(1)} = -\frac{s_{\text{кр}} \sqrt{M_{\text{к}}^2 - M_{\text{мх1}}^2} - s_{\text{кр}} \cdot M_{\text{к}}}{M_{\text{мх1}}}; \\ s_{(2)} = \frac{s_{\text{кр}} [M_{\text{к}} + \sqrt{(M_{\text{к}} - M_{\text{мх1}})(M_{\text{к}} + M_{\text{мх1}})}]}{M_{\text{мх1}}}. \end{cases}$$

Определим корни уравнения:

$$s_{(1)} = -\frac{0,2\sqrt{3^2 - 2^2} - 0,2 \cdot 3}{2} = 0,076 \text{ о.е.}$$

$$s_{(2)} = \frac{0,2[3 + \sqrt{(3-2)(3+2)}]}{2} = 0,524 \text{ о.е.}$$

Корни уравнения получились положительными, что говорит о наличии двух точек равновесия электромагнитного и механического момента  $M_{\text{мх1}}$  в двигательном режиме (рисунок 15.5).

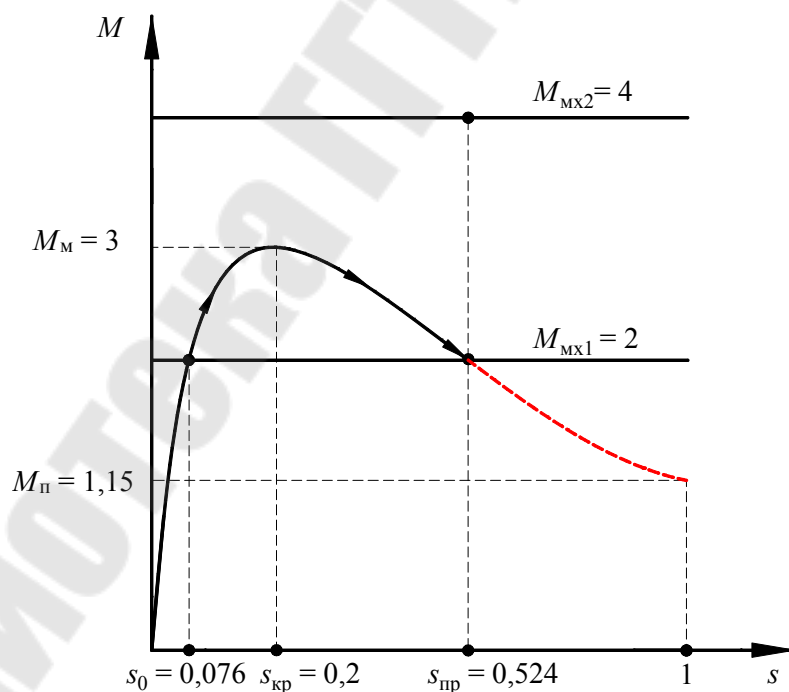


Рисунок 15.5 – Определение электромеханической характеристики асинхронного двигателя

Точка  $s_{(1)}$  является рабочей, а  $s_{(2)} = s_{\text{пр}}$  – предельной точкой динамической устойчивости.

Поскольку численное решение уравнения (15.5) получается громоздким целесообразно использовать программные пакеты (например Mathcad) для решения математических задач. Таким образом, предельное время снятия наброса нагрузки составит:

$$t_{\text{пр}} = \frac{T_j}{M_{\text{мх2}}} \int_{s_0}^{s_{\text{пр}}} \left( 1 + \frac{2 \cdot M_{\text{к}} / M_{\text{мх2}} \cdot s_{\text{кр}} \cdot s}{s^2 - 2 \cdot M_{\text{к}} / M_{\text{мх2}} \cdot s_{\text{кр}} \cdot s + s_{\text{кр}}^2} \right) ds =$$

$$= \frac{5,3}{4} \int_{0,076}^{0,524} \left( 1 + \frac{2 \cdot 3/4 \cdot 0,2 \cdot s}{s^2 - 2 \cdot 3/4 \cdot 0,2 \cdot s + 0,2^2} \right) ds = 1,761 \text{ с.}$$

На рисунке 15.6 приведено графическое пояснение к определению предельного времени снятия наброса нагрузки.

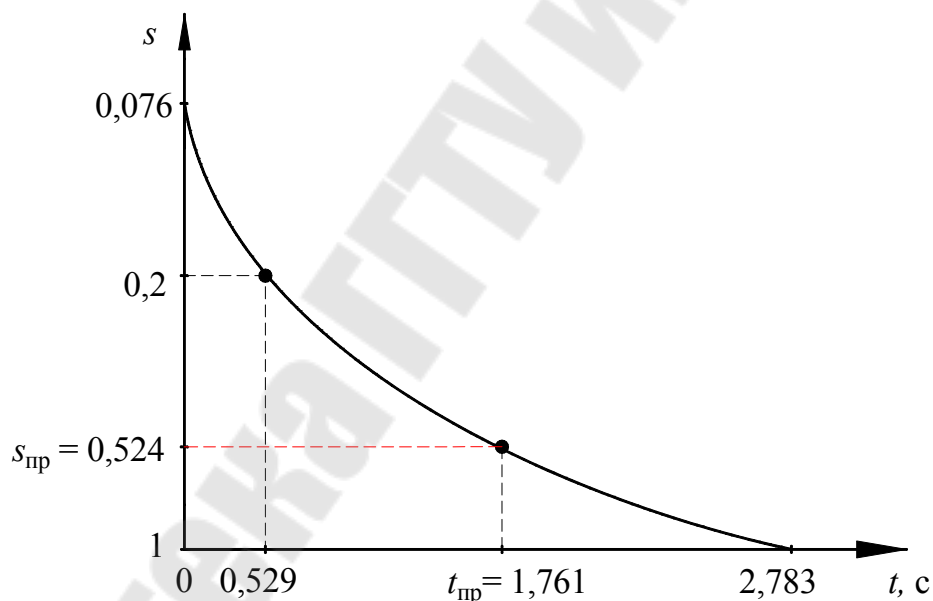


Рисунок 15.6 – К пояснению о расчете предельного времени снятия наброса нагрузки

### Задача 15.3

Синхронный двигатель, работающий с нагрузкой  $M_{\text{мх1}} = 0,5M_{\text{м}}$ , питается от шин бесконечно большой мощности. В момент времени  $t_0$  произошел наброс нагрузки с  $M_{\text{мх1}} = 0,5M_{\text{мх1}}$  до  $M_{\text{мх2}} = 2M_{\text{м}}$ . Определить предельный угол снятия наброса при котором двигатель вступит в синхронизм. Построить механическую характеристику синхронного

двигателя с указанием площадок ускорения и торможения. Исходные данные к задаче приведены в приложении П10.

#### **Задача 15.4**

Для примера 15.3 требуется, построив зависимость  $\delta = f(t)$ , графически определить предельное время снятия наброса нагрузки при котором двигатель сохранит устойчивость. Расчет произвести, используя метод последовательных интервалов.

Примечание к задаче 15.4:

1. Расчет производится аналогично примеру 10.2, принимая во внимание, что в относительных единицах электромагнитный момент двигателя совпадает с мощностью  $M \equiv P$ .
2. Для определения электромеханической постоянной инерции двигателя, следует воспользоваться формулой (8.2). Исходные данные махового момента ротора и механизма приведены в таблице приложения П10.

#### **Задача 15.5**

Асинхронный двигатель, параметры которого приведены в таблице приложения П9, работает с нагрузкой  $M_{\text{мх1}} = 1,5 + 0,5 \cdot (1-s)^2$ . После резкого изменения нагрузки с  $M_{\text{мх1}}$  до  $M_{\text{мх2}} = 2,5 + 0,5 \cdot (1-s)^2$  двигатель начал затормаживаться. Определите время полной остановки и предельное время сохранения динамической устойчивости асинхронного двигателя.

Примечание к задаче 15.5:

1. Расчет времени торможения двигателя схож с расчетом времени выбега двигателя алгоритм которого приведен в практической работе № 13.
2. Нахождения корней уравнения и выполнение операций, связанных с интегрированием уравнения движения ротора колесообразно производить с использование программного комплекса MathCad или его аналогов.



## Практическая работа № 16: Мероприятия по повышению устойчивости энергосистемы

### Краткие теоретические сведения

Для обеспечения устойчивой работы энергосистемы используют различные мероприятия, выполняемые на стадии проектирования или в процессе эксплуатации. К таким мероприятиям можно отнести: установку устройств продольной компенсации (УПК) реактивной мощности, использование резистивного заземления нейтралей трансформаторов, применение шунтирующих реакторов при работе генераторов с АРВ, отключение части синхронных машин, разгрузка мощности нагрузки и др.

*Устройства продольной компенсации.* Схема электрической сети с УПК и схема замещения приведены на рисунках 16.1, 16.2. Установка УПК в линию позволяет повысить устойчивость работы генератора за счет отрицательной составляющей сопротивления конденсаторной батареи  $x_c$  и снижения суммарного сопротивления сети:

$$x_{\Sigma 1} = x'_d + x_{T1} - x_c + x_{л1} + x_{T2}. \quad (16.1)$$

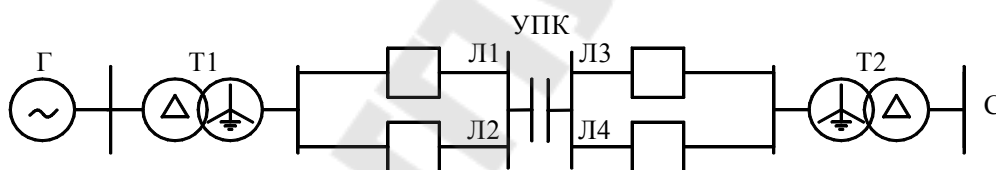


Рисунок 16.1 – Схема электрической системы с устройством продольной компенсации

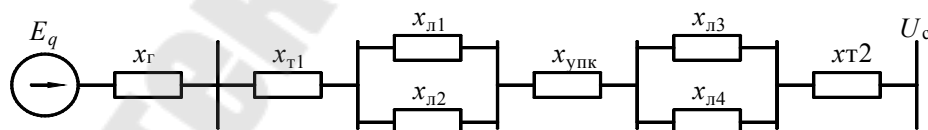


Рисунок 16.2 – Схема замещения

*Резистивное заземление нейтралей трансформатора.* В высоковольтных электросетях нейтрали трансформатора заземляются наглухо. Если нейтраль заземлять через небольшое сопротивление, то работы изоляции не меняется, а устойчивость систем при несимметричных коротких замыканиях существенно повышается. Такой эффект происходит за счет увеличения сопротивления аварийного шунта  $x_{ш}$ , который определяет взаимное сопротивление схемы:

$$x_{12} = x_1 + x_2 + \frac{x_1 \cdot x_2}{x_{ш}}. \quad (16.2)$$

При увеличении сопротивления  $x_{ш}$  за счет заземления через сопротивление взаимное сопротивление снижается за счет увеличения сопротивления нулевой последовательности. Это приводит к росту предела передаваемой мощности и увеличению устойчивости системы.

*Разгрузка мощности нагрузки.* При возникновении аварийного дефицита мощности  $\Delta P_{\Gamma}$  частота в энергосистеме начинает снижаться. Частота энергосистемы по условиям устойчивости не должна снижаться ниже допустимого значения. В установившемся режиме при отсутствии снижения нагрузки аварийное значение частоты определяется по формуле:

$$f_{ав} = f_0 - \frac{\Delta P_{\Gamma} f_0}{P_{н0} k_{н}}, \quad (16.3)$$

где  $f_0$  – номинальная частота сети, 50 Гц;  $\Delta P_{\Gamma} = P_{н0} - P_{г0}$  – небаланс мощности потребления  $P_{н0}$  и генерации  $P_{г0}$ , МВт;  $\Delta f_{уст}$  – величина абсолютного снижения частоты, Гц;  $k_{н}$  – регулирующий эффект нагрузки по частоте, для большинства энергосистем варьируется от 1,5 до 3 о.е.

Необходимый объем отключаемой нагрузки для предотвращения частоты ниже минимально  $f_{min}$ :

$$\Delta P_{н} = \frac{\Delta P_{\Gamma} - \Delta P_{н0} (1 - f_{min} / f_0) k_{н}}{1 - (1 - f_{min} / f_0) k_{н}}. \quad (16.4)$$

### Пример 16.1

Определить требуемую мощность конденсаторных батарей в устройстве продольной компенсации для повышения предела передаваемой мощности в два раза. Расчетная схема и её схема замещения приведены на рисунках 16.1, 16.2.

Исходные данные приведены в относительных единицах, где в качестве базисных условий принято:  $S_6 = 80$  МВт;  $U_c = U_6 = 230$  кВ.

Исходные данные:

Генератор Г:  $E' = 1,34$  о.е.;  $x'_d = 0,193$  о.е.;

Трансформатор Т1:  $x_{T1} = 0,081$  о.е.;

Линия Л1, Л2, Л3, Л4:  $x_{Л} = 0,077$  о.е.;

Трансформатор Т2:  $x_{T2} = 0,07$  о.е.

### Решение

Предел передаваемой мощности из условия увеличения в два раза определяется по формуле:

$$2P_M = \frac{E' \cdot U_c}{x'_{d\Sigma 1} - x_{\text{упк}}}, \quad (16.5)$$

где  $x'_{d\Sigma 1}$  – суммарное сопротивление системы в исходном режиме:

$$\begin{aligned} x'_{d\Sigma 1} &= x'_d + x_{T1} + \frac{x_{Л1} \cdot x_{Л2}}{x_{Л1} + x_{Л2}} + \frac{x_{Л3} \cdot x_{Л4}}{x_{Л3} + x_{Л4}} + x_{T2} = \\ &= 0,193 + 0,081 + 0,077 / 2 + 0,077 / 2 + 0,07 = 0,421 \text{ о.е.} \end{aligned}$$

Предел передаваемой мощности в нормальном режиме:

$$P_M = \frac{E' U_c}{x'_{d\Sigma 1}} = \frac{1,34 \cdot 1}{0,421} = 3,183 \text{ о.е.}$$

Из формулы (16.5) выражаем  $x_{\text{упк}}$ :

$$x_{\text{упк}} = x'_{d\Sigma 1} - \frac{E' U_c}{2P_M} = 0,421 - \frac{1,34 \cdot 1}{2 \cdot 3,183} = 0,21 \text{ о.е.}$$

Определяем мощность конденсаторных батарей в относительных единицах:

$$Q_{\text{упк}*} = \frac{U^2}{x_{\text{упк}}} = \frac{1^2}{0,21} = 4,762 \text{ о.е.}$$

Переводим в именованные единицы:

$$Q_{\text{упк}} = Q_{\text{упк}*} \cdot S_6 = 4,762 \cdot 80 = 380 \text{ МВАр.}$$

### Задача 16.2

Электроснабжение потребителей осуществляется от электростанции, работающей в установившемся режиме с мощностью  $P_{г0}$  и частотой  $f_0 = 50$  Гц. Регулировочный эффект нагрузки по частоте определяется коэффициентом  $k_H$ . Требуется определить:

1. Аварийное снижение частоты  $f_{ав}$  в результате небаланса мощностей  $P_{г0}$  и  $P_{н0}$ ;
2. Мощность отключаемой нагрузки для восстановления частоты до минимального уровня  $\Delta f_{min}$ .

Исходные данные к задаче приведены в приложении П11.

### Задача 16.3

В электрической сети, схема которой приведена на рисунке 16.3, в начале линии происходит однофазное КЗ. На трансформаторах в схеме имеется глухозаземленная нейтраль. Требуется оценить влияние установки в нейтраль трансформаторов Т1 и Т2 реактивного сопротивления  $x_3 = 0,1$  о.е. на устойчивость системы с построением площадок ускорения и торможения в нормальном и аварийном режимах работы.

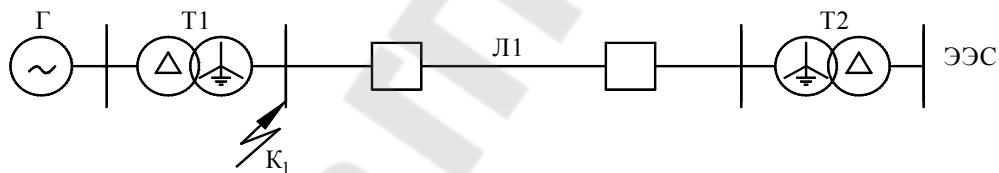


Рисунок 16.3 – Схема электрической сети

Исходные данные в соответствии с вариантом задания приведены в приложении П 1.

Примечание: Задача рассматривается аналогично примеру 9.1 с учетом особенностей построения схемы замещения для сети с глухозаземленной нейтралью и сети при добавления в нейтраль сопротивления  $x_3$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Евминов, Л.И. Электромагнитные переходные процессы в системах электроснабжения: пособие для практических занятий по одноименному курсу для студентов энергетических специальностей дневной и заочной форм обучения / Л.И. Евминов. – Гомель, 2009. – 304 с.
2. Калентионюк, Е.В. Устойчивость электроэнергетических систем / Е.В. Калентионюк. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 375 с
3. Руководящие указания по устойчивости систем. – Мн.: Белэнерго, 2005. – 19 с.
4. Голованов, И.Г. Переходные процессы в ЭЭС. Часть 2: Электромеханические переходные процессы: Методические указания по практическим занятиям и самостоятельной работе студентов / И. Г. Голованов. – Ангарск, 2014. – 90 с.
5. Калентионюк, Е.В. Устойчивость электроэнергетических систем. Сборник задач и примеры их решения / Е.В. Калентионюк, А.А. Волков, Е.В. Мышковец и В.М. Цыганков ; под ред. Е.В. Калентионюк ; кол. авт. Белорусский национальный технический университет, Кафедра «Электрические системы». – Минск : БНТУ, 2007. – 130 с : ил.
6. Хрущев, Ю.В. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах: учебное пособие / Ю.В. Хрущев, К.И. Заповодников, А.Ю. Юшков // Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 168 с.
7. Токощав, В.И. Устойчивость электроэнергетических систем / В.И. Токощав, В.В. Кротенюк // Курс лекций по одноименной дисциплине для студентов специальности «Электроэнергетические системы и сети» – Гомель: ГГТУ имени П.О.Сухого, 2014. – 223 с.
8. Эрнст, А.Д. Электромеханические переходные процессы в электрических системах. Курс лекций. / А.Д. Эрнст. – Нижневартовск: Изд-во НВГУ, 2013. – 130 с.
9. Козлов, А.Н. Электромеханические переходные процессы в электрических системах / А.Н. Козлов, В.А. Козлов, А.С. Степанов // Учебно-методическое пособие к курсовому проектированию – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2013. – 111 с.
10. Ежков, В.В. Переходные процессы электрических систем в примерах и иллюстрациях / В.В. Ежков, Н.И. Зеленохат, И.В. Литкенс

и др.; Под ред. В.А. Строев // Учеб. пособие для вузов – М.: Знак, 1996 – 224 с.

11. Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В.А. Веников // Учебник для электроэнергетических специальностей вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.

12. Токочаков, В.И. Устойчивость электрических систем: Практикум для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение» дневной и заочной форм обучения / В.И. Токочаков. – Гомель, 2007. – 57 с.

13. Голоднов, Ю.М. Самозапуск электродвигателей / Ю.М. Голоднов. – М.: Энергоатомиздат, 1985 г. – 136 стр.

14. Неклепаев, Б. П. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учеб. пособие для вузов / Б. П. Неклепаев, И. П. Крючков – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатом-издат, 1989. – 608 с: ил.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение П 1

### Параметры элементов электрической сети

Номер по журналу	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<b>Генератор</b>																				
$P_H$ , МВт	70	160	110	63	160	160	110	160	63	63	160	110	63	160	160	110	160	63	63	160
$\cos\varphi_H$ , о.е.	0,8	0,85	0,75	0,8	0,85	0,85	0,8	0,83	0,81	0,81	0,85	0,8	0,82	0,84	0,84	0,81	0,84	0,8	0,84	0,82
$U_H$ , кВ	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
$x^*_{*d}$ , о.е.	2,3	2,1	2,35	2,2	2,1	2,2	2,34	2,1	2,2	2,0	2,25	2,32	2,21	2,12	2,0	2,22	2,1	2,15	2,4	2,2
$x'_{*d}$ , о.е.	0,277	0,275	0,27	0,28	0,285	0,27	0,277	0,275	0,27	0,28	0,285	0,277	0,275	0,27	0,28	0,285	0,275	0,27	0,26	0,28
<b>Трансформатор Т1:</b>																				
$S_H$ , МВА	80	250	400	125	200	250	400	200	125	80	250	400	125	200	250	400	200	125	80	250
$U_K$ , %	11	8	9	10	7	7,6	8	9	10	11	8	9	10	7	7,6	8	9	10	11	8
$U_H$ , кВ	10,5/ 121	11,0/ 242	10,5/ 340	11,0/ 242	10,5/ 120	10,5/ 242	10,5/ 340	11,0/ 242	10,5/ 120	10,5/ 121	10,5/ 242	11,0/ 340	11,0/ 242	10,5/ 120	11,0/ 242	10,5/ 340	11,0/ 242	10,5/ 120	10,5/ 121	11,0/ 242
<b>Трансформатор Т2:</b>																				
$S_H$ , МВА	125	300	400	125	240	300	400	240	125	125	300	400	125	240	300	400	240	125	125	300
$U_K$ , %	10	11	8	9	10	7	7,6	8	9	10	11	8	9	10	7	7,6	8	9	10	11
$U_H$ , кВ	115/ 38,5	230/ 121	330/ 230	230/ 121	115/ 38,5	230/ 121	330/ 230	230/ 121	115/ 38,5	115/ 38,5	230/ 121	330/ 230	230/ 121	115/ 38,5	230/ 10,5	330/ 10,5	230/ 11	115/ 38,5	115/ 38,5	230/ 38,5
<b>Линия</b>																				
$x_0$ , Ом·км	0,4	0,38	0,35	0,42	0,41	0,4	0,38	0,39	0,37	0,4	0,38	0,35	0,42	0,41	0,4	0,38	0,39	0,37	0,4	0,38
$l$ , км	300	310	320	350	380	290	285	270	250	265	290	280	245	275	290	220	350	340	290	285
<b>Нагрузка</b>																				
$P_H$ , МВт	23	10	21	14	25	17	30	18	30	11	15	16	24	17	16	26	16	29	28	28
$\cos\varphi_H$	0,6	0,7	0,65	0,62	0,73	0,71	0,74	0,68	0,78	0,8	0,6	0,7	0,65	0,63	0,77	0,71	0,75	0,68	0,79	0,82
<b>Мощность перетока в энергосистему</b>																				
$P_c$ , МВт	33	105	62	34	95	100	56	99	23	37	102	66	27	100	101	59	101	24	24	92
$\cos\varphi_c$	0,58	0,88	0,55	0,61	0,63	0,55	0,63	0,84	0,68	0,89	0,82	0,65	0,52	0,60	0,60	0,70	0,71	0,77	0,65	0,85

Продолжение таблицы П 1.

Номер по журналу	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Шунтирующий реактор																				
Q <sub>p</sub> , МВар	40	21	36	26	42	31	50	33	50	21	27	29	41	31	29	43	29	49	47	48
Конденсаторная батарея																				
Q <sub>БК</sub> , МВар	41	78	78	49	74	73	46	64	47	74	76	59	50	69	55	48	65	66	47	63

Приложение П 2

**Базовая ступень приведения сопротивлений схемы**

Номер по журналу	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Базисная ступень	U <sub>1</sub> , U <sub>2</sub>	U <sub>2</sub> , U <sub>4</sub>	U <sub>3</sub> , U <sub>4</sub>	U <sub>1</sub> , U <sub>4</sub>	U <sub>4</sub> , U <sub>1</sub>	U <sub>4</sub> , U <sub>3</sub>	U <sub>1</sub> , U <sub>3</sub>	U <sub>4</sub> , U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub> , U <sub>1</sub>	U <sub>3</sub> , U <sub>1</sub>	U <sub>1</sub> , U <sub>3</sub>	U <sub>2</sub> , U <sub>4</sub>	U <sub>3</sub> , U <sub>4</sub>	U <sub>1</sub> , U <sub>4</sub>	U <sub>4</sub> , U <sub>1</sub>	U <sub>4</sub> , U <sub>3</sub>	U <sub>1</sub> , U <sub>3</sub>	U <sub>4</sub> , U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub> , U <sub>1</sub>	U <sub>3</sub> , U <sub>1</sub>

Приложение П 3

**Вид нормального и переходного режима работы ЭЭС**

Номер по журналу	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Нормальный режим	К3 – вкл.; К1 – вкл.	К3 – вкл.; К1 – вкл.	К3 – вкл.; К2 – вкл.	К3 – вкл.; К2 – вкл.	К3 – вкл.; К4 – вкл.	К3 – вкл.; К4 – вкл.	К3 – вкл.; К5 – вкл.	К3 – вкл.; К5 – вкл.	К1 – вкл.; К2 – вкл.	К1 – вкл.; К2 – вкл.	К2 – вкл.; К4 – вкл.	К2 – вкл.; К4 – вкл.	К4 – вкл.; К5 – вкл.	К4 – вкл.; К5 – вкл.	К1 – вкл.; К4 – вкл.	К1 – вкл.; К4 – вкл.	К1 – вкл.; К5 – вкл.	К1 – вкл.; К5 – вкл.	К2 – вкл.; К5 – вкл.	К2 – вкл.; К5 – вкл.
Переходной режим	К3 – вкл.; К1 – откл.	К3 – вкл.; К1 – откл.	К3 – вкл.; К2 – откл.	К3 – вкл.; К2 – откл.	К3 – вкл.; К4 – откл.	К3 – вкл.; К4 – откл.	К3 – вкл.; К5 – откл.	К3 – вкл.; К5 – откл.	К1 – вкл.; К2 – откл.	К1 – вкл.; К2 – откл.	К2 – вкл.; К4 – откл.	К2 – вкл.; К4 – откл.	К4 – вкл.; К5 – откл.	К4 – вкл.; К5 – откл.	К1 – вкл.; К4 – откл.	К1 – вкл.; К4 – откл.	К1 – вкл.; К5 – откл.	К1 – вкл.; К5 – откл.	К2 – вкл.; К5 – откл.	К2 – вкл.; К5 – откл.



**Исходные данные к задачам по теме № 7 «Расчет устойчивости комплексной нагрузки по практическим критериям»**

Номер по журналу	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Исходные данные к задаче 7.3, 7.4																				
Сопротивление $x'_{d\Sigma}$	0,63	0,54	0,68	0,87	0,69	0,78	0,74	0,58	0,88	0,59	0,55	0,87	0,64	0,68	0,54	0,56	0,51	0,52	0,52	0,64
Коэффициент реактивной мощности $\operatorname{tg}\varphi_H$	0,73	0,59	0,52	0,88	1,27	1,30	0,75	0,79	1,14	1,25	0,54	0,85	0,88	0,62	1,09	1,07	1,24	0,59	1,10	0,71
Исходные данные к задаче 7.5																				
Зависимость $E_q = f(U_H)$	$E_q = 5,5U_H^2 - 6,5U_H + 5,57$	$E_q = 5,3U_H^2 - 8,0U_H + 4,0$	$E_q = 4,3U_H^2 - 5,0U_H + 3,3$	$E_q = 5,5U_H^2 - 5,0U_H + 2,3$	$E_q = 5,8U_H^2 - 6,8U_H + 5,5$	$E_q = 1,5U_H^2 - 1,0U_H + 2,0$	$E_q = 2,5U_H^2 - 3,0U_H + 1,5$	$E_q = 2,5U_H^2 - 3,0U_H + 1,7$	$E_q = 4,5U_H^2 - 3,2U_H + 1,7$	$E_q = 4,9U_H^2 - 2,2U_H + 1,3$	$E_q = 6,2U_H^2 - 2,2U_H + 1,2$	$E_q = 0,5U_H^2 - 0,4U_H + 1,3$	$E_q = 4,5U_H^2 - 6,1U_H + 5,2$	$E_q = 5,4U_H^2 - 5,3U_H + 5,0$	$E_q = 4,5U_H^2 - 4,5U_H + 5,6$	$E_q = 5,4U_H^2 - 6,2U_H + 5,7$	$E_q = 5,0U_H^2 - 6,0U_H + 5,0$	$E_q = 5,2U_H^2 - 6,4U_H + 4,5$	$E_q = 4,2U_H^2 - 4,5U_H + 2,5$	$E_q = 5,1U_H^2 - 6,2U_H + 5,52$

**Исходные данные к задачам по теме № 8 «Расчет динамической устойчивости электрической системы методом площадей. Определение предельного угла отключения короткого замыкания»**

Номер по журналу	Условие переходного процесса
1	В электрической системе, приведенной на рисунке 8.8 а), в точке $K_1$ происходит трехфазное КЗ. Через промежуток времени $t$ отключаются и включаются две цепи линии, в результате чего, КЗ успешно ликвидируется, а устойчивость системы сохраняется.
2	В электрической системе, приведенной на рисунке 8.8 а), в точке $K_2$ происходит трехфазное КЗ. Через промежуток времени $t$ срабатывает однократное АПВ поврежденной линии. АПВ срабатывает успешно, ликвидировав КЗ. В результате устойчивость системы сохранилась.
3	В электрической системе, приведенной на рисунке 8.8 а), в точке $K_3$ происходит однофазное КЗ. Через промежуток времени $t$ срабатывает однофазное КЗ переходит в двухфазное, нарушая при этом устойчивость системы.
4	В электрической системе, приведенной на рисунке 8.8 а), в точке $K_3$ происходит однофазное КЗ. Через промежуток времени $t_1$ однофазное КЗ переходит в двухфазное, а через время $t_2$ в трехфазное. В результате аварийной ситуации устойчивость системы нарушается.
5	В электрической системе, приведенной на рисунке 8.8 а), в точке $K_2$ происходит двухфазное КЗ. Через промежуток времени $t$ срабатывает двухкратное АПВ поврежденной линии. АПВ срабатывает успешно после второго включения. КЗ ликвидировано, в результате чего, устойчивость системы сохранилась.
6	В электрической системе, приведенной на рисунке 8.8 б), в точке $K_1$ происходит однофазное КЗ. Через промежуток времени $t$ однофазное КЗ переходит в двухфазное, после чего происходит отключение и включение линии на короткое замыкание. В результате устойчивость системы не сохранилась.
7	В электрической системе, приведенной на рисунке 8.8 б), в точке $K_3$ происходит однофазное КЗ. Через промежуток времени $t$ происходит отключение линии и включение на короткое замыкание. Несмотря на это, устойчивость системы сохраняется.

Номер по журналу	Условие переходного процесса
8	В электрической системе, приведенной на рисунке 8.8 б), в точке $K_2$ происходит однофазное КЗ. Через промежуток времени $t$ однофазное КЗ переходит в трехфазное, после чего успешно срабатывает АПВ, ликвидируя КЗ. В результате устойчивость системы сохранилась.
9	В электрической системе, приведенной на рисунке 8.8 б), в точке $K_2$ происходит однофазное КЗ. Через промежуток времени $t$ однофазное КЗ переходит в трехфазное, после чего успешно срабатывает двухкратное АПВ, ликвидируя КЗ. В результате устойчивость системы сохранилась.
10	В электрической системе, приведенной на рисунке 8.8 б), в точке $K_2$ происходит однофазное КЗ. Через промежуток времени $t$ однофазное КЗ переходит в двухфазное, после чего не успешно срабатывает двухкратное АПВ, не ликвидируя КЗ. В результате устойчивость системы не сохранилась.
11	В электрической системе, приведенной на рисунке 8.8 б), в точке $K_1$ происходит однофазное КЗ. Через промежуток времени $t$ происходит отключение линии и включение на короткое замыкание. В результате устойчивость системы сохранилась.
12	В электрической системе, приведенной на рисунке 8.8 б), в точке $K_1$ происходит однофазное КЗ. Через промежуток времени $t$ происходит отключение линии и включение на короткое замыкание. В результате устойчивость системы не сохранилась.
13	В электрической системе, приведенной на рисунке 8.8 а), в точке $K_3$ происходит трехфазное КЗ. Через промежуток времени $t$ релейной защитой короткое замыкание ликвидируется. Однако в результате устойчивость системы не сохранилась.
14	В электрической системе, приведенной на рисунке 8.8 а), в точке $K_3$ происходит однофазное КЗ. Через промежуток времени $t$ релейной защитой короткое замыкание ликвидируется. Однако в результате устойчивость системы не сохранилась.
15	В электрической системе, приведенной на рисунке 8.8 а), в точке $K_1$ происходит трехфазное КЗ. Через промежуток времени $t$ релейной защитой короткое замыкание ликвидируется. Однако в результате устойчивость системы не сохранилась.

Номер по журналу	Условие переходного процесса
16	В электрической системе, приведенной на рисунке 8.8 а), в точке $K_1$ происходит однофазное КЗ. Через промежуток времени $t$ релейной защитой короткое замыкание ликвидируется. В результате устойчивость системы сохранилась.
17	В электрической системе, приведенной на рисунке 8.8 б), в точке $K_3$ происходит трехфазное КЗ. Через промежуток времени $t$ релейной защитой короткое замыкание ликвидируется. Однако в результате устойчивость системы не сохранилась.
18	В электрической системе, приведенной на рисунке 8.8 б), в точке $K_3$ происходит однофазное КЗ. Через промежуток времени $t$ релейной защитой короткое замыкание ликвидируется. Однако в результате устойчивость системы не сохранилась.
19	В электрической системе, приведенной на рисунке 8.8 б), в точке $K_1$ происходит трехфазное КЗ. Через промежуток времени $t$ релейной защитой короткое замыкание ликвидируется. Однако в результате устойчивость системы не сохранилась.
20	В электрической системе, приведенной на рисунке 8.8 б), в точке $K_1$ происходит однофазное КЗ. Через промежуток времени $t$ релейной защитой короткое замыкание ликвидируется. В результате устойчивость системы сохранилась.

**Исходные данные к задачам по теме № 9 «Построение угловых характеристик мощности простейшей системы в нормальном, аварийном и послеаварийном режимах для анализа динамической устойчивости при симметричном и несимметричном КЗ. Расчет сопротивления аварийного шунта КЗ»**

Номер по журналу	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Точка КЗ	2	1	2	2	1	2	1	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	1	1	2
Вид КЗ	$K^1$	$K^{1,1}$	$K^1$	$K^2$	$K^2$	$K^1$	$K^2$	$K^{1,1}$	$K^2$	$K^{1,1}$	$K^{1,1}$	$K^2$	$K^1$	1	$K^2$	$K^2$	$K^2$	$K^2$	$K^2$	$K^{1,1}$

**Исходные данные к задачам по теме № 11 «Расчет самозапуска в узле нагрузки с асинхронными двигателями»**

№ вар.	Система	Линия	Трансформатор			Тип реактора	Двигатели на одну секцию шин													Нагрузка
	U <sub>c</sub> , кВ		L, км	S <sub>ном</sub> , МВА	U <sub>к</sub> , %		K <sub>т ном</sub>	Тип	Кол., шт.	P <sub>ном</sub> , кВт	U <sub>ном</sub> , кВ	n <sub>ном</sub> , об/мин	η <sub>ном</sub> , %	cos φ <sub>ном</sub>	M <sub>п</sub> , о.е.	M <sub>к</sub> , о.е.	J <sub>пр</sub> , кг·м <sup>2</sup>	k <sub>з</sub> , о.е.	Момент сопр. M <sub>мх</sub> , о.е.	
1	38	15	4	7,5	35/6,3	РБС 10-2×630-0,25	A312-32-4У4	4	400	6	1480	93,5	0,89	1	2,1	147,5	0,8	0,5	0,6	
2	36	55	10	8	35/6,3	РБСУ 10-2×630-0,25	A312-41-4У4	5	500	6	1480	93,5	0,89	1,1	2,2	212,5	0,75	0,7+0,5ω*	1,2	
3	37	60	25	10,5	35/6,3	РБСГ 10-2×630-0,25	A312-52-4У4	2	630	6	1480	94,5	0,89	1,1	2,2	317,5	0,9	0,6	8	
4	115	40	6,3	11	121/6,3	РБС 10-2×630-0,40	A313-46-4У4	3	800	6	1485	95	0,9	1	2,1	350	0,75	0,8+0,4ω*	0,9	
5	118	60	10	11	121/6,3	РБСУ 10-2×630-0,40	A313-59-4У4	2	1000	6	1485	94,5	0,9	1,2	2,5	412,5	0,85	0,8	2,5	
6	120	90	16	11	121/6,3	РБСГ 10-2×630-0,40	A312-35-6У4	7	250	6	985	92	0,85	1,1	2,2	185	0,7	0,5+0,4ω*	1,8	
7	115	30	25	11	121/6,3	РБС 10-2×630-0,56	A312-39-6У4	15	320	6	985	92,5	0,86	1,2	2,2	225	0,85	0,4	1,3	
8	120	80	40	11	121/6,3	РБСУ 10-2×630-0,56	A312-49-6У4	10	400	6	985	93	0,87	1,2	2,4	282,5	0,9	0,5+0,5ω*	3,6	
9	122	50	80	11	121/6,3	РБСГ 10-2×630-0,56	A312-37-6У4	7	500	6	985	93,5	0,87	1	2	560	0,95	0,45	10	
10	37	10	6,3	7,5	35/6,3	РБС 10-2×1000-0,14	A312-46-6У4	3	630	6	985	94	0,87	1	2	696	0,7	0,4+0,5ω*	1	
11	230	150	32	12	220/6,3	РБСУ 10-2×1000-0,14	A312-59-6У4	10	800	6	985	94,5	0,87	1	2,2	885	0,8	0,6	0,6	
12	230	100	40	12	220/6,3	РБСГ 10-2×1000-0,14	A312-35-8У4	12	200	6	740	92	0,81	1,2	2,1	411,5	0,75	0,45+0,6ω*	1,2	

Продолжение таблицы П 7

№ вар.	Система $U_c$ , кВ	Линия $L$ , км	Трансформатор			Тип реактора	Двигатели на одну секцию шин													Нагрузка $Q_n$ , МВар
			$S_{ном}$ , МВА	$U_k$ , %	$K_{Tном}$		Тип	Кол., шт.	$P_{ном}$ , кВт	$U_{ном}$ , кВ	$n_{ном}$ , об/мин	$\eta_{ном}$ , %	$\cos \varphi_{ном}$	$M_{п}$ , о.е.	$M_{к}$ , о.е.	$J_{пр}$ , кг·м <sup>2</sup>	$k_3$ , о.е.	Момент сопр. $M_{мх}$ , о.е.		
13	232	90	63	12	220/6,3	РБС 10-2×1000-0,22	A312-42-8У4	7	250	6	740	92,5	0,82	1,1	2,1	515	0,9	0,5	8	
14	232	120	80	11	220/6,3	РБСУ 10-2×1000-0,22	A312-52-8У4	10	320	6	740	92,5	0,82	1,1	2,1	673	0,75	0,3+0,7 $\omega^*$	0,9	
15	115	60	2,5	10,5	110/6,3	РБСГ 10-2×1000-0,22	A312-42-8У4	1	400	6	740	93,5	0,83	1,2	2,1	1025	0,85	0,4	2,5	
16	115	40	6,3	10,5	115/6,3	РБС 10-2×1000-0,28	A312-52-8У4	2	500	6	735	94	0,84	1,2	2,0	1213	0,7	0,6+0,7 $\omega^*$	1,8	
17	118	50	10	10,5	115/6,3	РБСУ 10-2×1000-0,28	A312-62-8У4	5	630	6	735	94	0,84	1,3	2,1	1702	0,85	0,65	1,3	
18	117	55	16	10,5	115/6,3	РБСГ 10-2×1000-0,28	A312-42-10У4	4	200	6	590	91,5	0,79	1,3	2,4	427,5	0,9	0,65+0,5 $\omega^*$	3,6	
19	115	50	25	10,5	115/6,3	РБСД 10-2×1000-0,35	A312-52-10У4	2	250	6	590	92	0,8	1,3	2,5	562,5	0,95	0,55	10	
20	117	80	40	10,5	115/6,3	РБС 10-2×1600-0,14	A313-42-10У4	10	320	6	590	92,5	0,81	1,1	2,1	835	0,7	0,6+0,75 $\omega^*$	1	

Примечание:

1. В цифровом обозначении реактора первое число – номинальное напряжение, кВ; второе – номинальный ток, А; третье – номинальное индуктивное сопротивление, Ом.
2. В исходных данных приведен суммарный момент инерции двигателя и механизма  $J_{пр}$ .
3. Технические характеристики двигателей принимались по [14].

Исходные данные к задачам по теме № 12 и №14

№ вар.	Система		Линия L, км	Трансформатор			Величина снижения пус- кового тока $d$ , %	Двигатели на одну секцию шин								Момент сопр. $M_{мх}$ , о.е.	На- грузка $Q_H$ , МВар	
	$U_c$ , кВ	$S_{кз}$ , МВА		$S_{ном}$ , МВА	$U_k$ , %	$K_{Тном}$		Тип	Кол., шт.	$P_{ном}$ , кВт	$U_{ном}$ , кВ	$n_{ном}$ , об/ мин	$\eta_{ном}$ , %	$\cos \varphi_{ном}$	$M_{п}$ , о.е.			$i_{п}$ , о.е.
1	38	314	15	4	7,5	35/6,3	59	A312-32-4У4	2	400	6	1480	93,5	0,89	1	6,1	0,5	0,6
2	36	402	55	10	8	35/6,3	40	A312-41-4У4	2	500	6	1480	93,5	0,89	1,1	5,7	0,7*	1,2
3	37	469	60	25	10,5	35/6,3	36	A312-52-4У4	2	630	6	1480	94,5	0,89	1,1	5,7	0,6	8
4	115	379	40	6,3	11	121/6,3	53	A313-46-4У4	3	800	6	1485	95	0,9	1	5,4	0,8	0,9
5	118	272	60	10	11	121/6,3	25	A313-59-4У4	2	1000	6	1485	94,5	0,9	1,2	6,2	0,8	2,5
6	120	615	90	16	11	121/6,3	16	A312-35-6У4	3	250	6	985	92	0,85	1,1	5,7	0,5*	1,8
7	115	581	30	25	11	121/6,3	23	A312-39-6У4	6	320	6	985	92,5	0,86	1,2	6,0	0,4	1,3
8	120	249	80	40	11	121/6,3	11	A312-49-6У4	5	400	6	985	93	0,87	1,2	5,7	0,5*	3,6
9	122	653	50	80	11	121/6,3	23	A312-37-6У4	3	500	6	985	93,5	0,87	1	4,6	0,45	10
10	37	652	10	6,3	7,5	35/6,3	24	A312-46-6У4	3	630	6	985	94	0,87	1	4,6	0,4	1
11	230	463	150	32	12	220/6,3	45	A312-59-6У4	4	800	6	985	94,5	0,87	1	5,3	0,6	0,6
12	230	539	100	40	12	220/6,3	5	A312-35-8У4	5	200	6	740	92	0,81	1,2	5,0	0,45*	1,2



Продолжение таблицы П 8

№ вар.	Система		Линия L, км	Трансформатор			Величина снижения пус- кового тока $d$ , %	Двигатели на одну секцию шин								Момент сопр. $M_{мх}$ , о.е.	На- грузка $Q_n$ , МВар	
	$U_c$ , кВ	$S_{кз}$ , МВА		$S_{ном}$ , МВА	$U_k$ , %	$K_{т ном}$		Тип	Кол., шт.	$P_{ном}$ , кВт	$U_{ном}$ , кВ	$n_{ном}$ , об/ мин	$\eta_{ном}$ , %	$\cos \varphi_{ном}$	$M_{п}$ , о.е.			$i_{п}$ , о.е.
13	232	226	90	63	12	220/6,3	69	A312-42-8У4	4	250	6	740	92,5	0,82	2,1	5,1	0,5	8
14	232	342	120	80	11	220/6,3	20	A312-52-8У4	5	320	6	740	92,5	0,82	2,1	5,2	0,3	0,9
15	115	462	60	2,5	10,5	110/6,3	31	A312-42-8У4	1	400	6	740	93,5	0,83	2,1	5,1	0,4	2,5
16	115	452	40	6,3	10,5	115/6,3	20	A312-52-8У4	2	500	6	735	94	0,84	2,0	5	0,6	1,8
17	118	406	50	10	10,5	115/6,3	12	A312-62-8У4	5	630	6	735	94	0,84	2,1	5,3	0,65	1,3
18	117	613	55	16	10,5	115/6,3	48	A312-42-10У4	4	200	6	590	91,5	0,79	2,4	5,5	0,65	3,6
19	115	529	50	25	10,5	115/6,3	19	A312-52-10У4	2	250	6	590	92	0,8	2,5	5,9	0,55	10
20	117	692	80	40	10,5	115/6,3	63	A313-42-10У4	5	320	6	590	92,5	0,81	2,1	4,8	0,6	1

## Исходные данные к задаче по теме № 13 «Расчет времени выбега и пуска асинхронного двигателя»

№ вар	Параметры двигателя			Момент сопротивления		Скольжение при выбегае, $s_2$ , о.е.
	Постоянная инерции агрегата, $T_j$ , о.е.	Критический момент, $M_k$ , о.е.	Критическое скольжение, $s_k$ , о.е.	Момент холостого хода, $M_0$ , о.е.	Постоянный коэффициент, с	
1	6,8	2,5	0,05	0,2	0,5	1,0
2	4,1	2,9	0,08	0,25	0,7	0,8
3	5,6	3,1	0,1	0,4	1,5	0,9
4	7,2	3,0	0,22	0,8	0,5	0,9
5	2,5	3,4	0,14	0,1	2,0	0,9
6	6,3	2,7	0,11	0,15	0,5	0,9
7	5,9	2,6	0,19	0,5	0,2	1,0
8	6,9	2,4	0,27	0,9	2,0	0,8
9	5,8	2,8	0,25	0,6	1	0,8
10	4,0	3,3	0,12	0,1	2,5	0,9
11	7,3	2,5	0,05	0,2	0,5	0,9
12	3,4	2,9	0,08	0,25	0,7	0,8
13	6,9	3,1	0,1	0,4	1,5	0,8
14	7,5	3,0	0,22	0,8	0,5	0,9
15	2,9	3,4	0,14	0,1	2,0	0,8
16	3,7	2,7	0,11	0,15	0,5	0,8
17	5,9	2,6	0,19	0,5	0,2	1,0
18	5,6	2,4	0,27	0,9	2,0	1,0
19	7,5	2,8	0,25	0,6	1	1,0
20	3,0	3,3	0,12	0,1	2,5	0,9

## Исходные данные к задачам по теме № 15 «Набросы нагрузки на электрические двигатели»

№ вар	Параметры синхронного двигателя						
	Марка двигателя	Активная мощность $P_{\text{ном}}$ , кВт	Полная мощность $S_{\text{ном}}$ , кВА	Напряжение $U_{\text{ном}}$ , кВ	Маховый момент, т·м <sup>2</sup>		Переходное сопротивление двигателя, о.е.
					Двигателя	Механиз- ма	
1	СТД-630-23УХЛ4	630	735	6,1	0,053	0,57	0,33
2	СТД-800-23УХЛ4	800	935	6,1	0,056	0,61	0,33
3	СТД-1000-23УХЛ4	1000	1160	6,1	0,06	0,68	0,28
4	СТД-1000-23УХЛ4	1000	1160	6,1	0,006	0,68	0,37
5	СТД-1000-23УХЛ5	1000	1160	6,1	0,702	0,68	0,23
6	СТД-1250-23УХЛ4	1250	1450	6,1	0,112	0,74	0,29
7	СТД-1600-23УХЛ4	1600	1850	6,1	0,112	0,84	0,39
8	СТД-1600-23УХЛ5	1600	1850	6,1	0,112	0,84	0,43
9	СТД-2000-23УХЛ4	2000	2300	6,1	0,123	0,89	0,39
10	СТД-2500-23УХЛ4	2500	2870	6,1	0,23	1,01	0,25
11	СТД-3150-23УХЛ4	3150	3860	6,1	0,258	1,13	0,43
12	СТД-4000-23УХЛ4	4000	4580	6,1	0,278	1,21	0,23
13	СТД-5000-23УХЛ4	5000	5740	6,1	0,32	1,5	0,43
14	СТД-630-2РУХЛ4	630	735	6,1	0,053	0,57	0,30
15	СТД-800-2РЗУХЛ4	800	935	6,1	0,056	0,61	0,22
16	СТД-1000-2РУХЛ4	1000	1160	6,1	0,06	0,68	0,24
17	СТД-1250-2РУХЛ4	1250	1450	6,1	0,102	0,74	0,36
18	СТД-1600-2РУХЛ4	1600	1850	6,1	0,112	0,84	0,32
19	СТД-2000-2РУХЛ4	2000	2300	6,1	0,123	0,89	0,41
20	СТД-2500-2РУХЛ4	2500	2870	6,1	0,23	1,01	0,36

**Исходные данные к задаче 16.2 по теме № 16 «Мероприятия по повешению устойчивости энергосистемы»**

№ вар	Мощность генерации, $P_{Г0}$ , МВт	Мощность потребления, $P_{Н0}$ , МВт	Регулировочный эффект по частоте $k_H$	Минимальная частота $f_{мин}$ , Гц
1	142	199	1,7	49,0
2	172	188	2,6	49,0
3	112	184	2,8	49,0
4	137	181	2,3	49,0
5	176	196	2,8	49,0
6	135	157	2,0	49,0
7	73	134	2,2	49,0
8	124	125	2,2	49,0
9	109	164	2,3	49,0
10	107	195	2,7	49,0
11	40	76	2,2	49,0
12	35	60	1,6	49,0
13	28	54	2,6	49,0
14	49	62	2,9	49,0
15	46	188	2,8	49,0
16	30	188	1,7	49,0
17	26	178	2,9	49,0
18	25	41	1,9	49,0
19	23	60	1,7	49,0
20	23	49	2,6	49,0

**Капанский Алексей Александрович**

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ  
ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ**

**Практикум  
по одноименной дисциплине  
для студентов специальности 1-43 01 03  
«Электроснабжение (по отраслям)»  
дневной и заочной форм обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 05.06.19.

Рег. № 27Е.  
<http://www.gstu.by>