

Министерство образования и науки Российской Федерации

Курганский государственный университет

Кафедра энергетики и технологии металлов

## **РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ**

Методические указания и задания к контрольной работе

по дисциплине «Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах» для студентов направления 13.03.02  
«Электроэнергетика и электротехника» (профиль  
«Электроснабжение») всех форм обучения

Курган 2015

Кафедра: «Энергетика и технология металлов»

Дисциплина: «Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах» для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профиль «Электроснабжение») всех форм обучения

Составил: доцент, канд. техн. наук Мошкин В.И.

Составлены на основе переработанных и дополненных методических указаний и задания к курсовой работе «Расчет устойчивости узла нагрузки» по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах». / Сост. В.Н. Серебряков – Саратов: Изд-во СГТУ, 2005. – 30 с.

Утверждены на заседании кафедры 31 августа 2015 г.

Рекомендованы методическим советом университета

«\_\_»\_\_\_\_\_2015 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Методические указания составлены в соответствии с программой курса «Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах». Указания предназначены для студентов направления 13.03.02 к выполнению контрольной работы по расчету устойчивости системы электроснабжения по практическим критериям. В работе для каждой задачи контрольного задания приведены основные теоретические положения и примеры расчетов.

Оформление контрольной работы предусматривает обязательное использование ГОСТ 7.32-2001 .

### 1 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТОВ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

*Устойчивость* – это способность системы возвращаться в исходное состояние после его возмущения (отклонения режимных параметров).

Проблема устойчивости существует не только применительно в целом к системе электроснабжения, но и к отдельно взятой нагрузке, так как последняя при определенных условиях также может быть неустойчивой.

В расчетах устойчивости различают:

- 1) *статическую* устойчивость - устойчивость при малых возмущениях без учета фактора времени;
- 2) *динамическую* устойчивость - устойчивость при больших возмущениях с учетом фактора времени.

#### 1.1 Расчет статической устойчивости системы при нагрузке, заданной комплексным постоянным сопротивлением (задание 1)

В практике расчетов устойчивости электрических систем нагрузку часто представляют упрощенно в виде постоянного комплексного сопротивления. Известно, что если мощность приемной системы соизмерима с мощностью электропередачи, то напряжение на шинах нагрузки снижается с увеличением мощности электропередачи. В свою очередь, мощность на сопротивлении нагрузки падает по квадратичной зависимости вплоть до нуля и поэтому всегда можно сбалансировать мощность нагрузки с мощностью генераторов. Следует иметь в виду, что переходные процессы в нагрузке, не нарушая устойчивости самой нагрузки, влияют на режим работы электропередачи и могут быть причиной аварий. В этом случае статическая устойчивость системы оценивается по критерию

$$dP/d\delta_{12} = 0,$$

где  $P$  - активная мощность передающей станции;

$\delta_{12}$  - угол сдвига между векторами ЭДС генераторов  $G_1$  и  $G_2$  (рис.1).

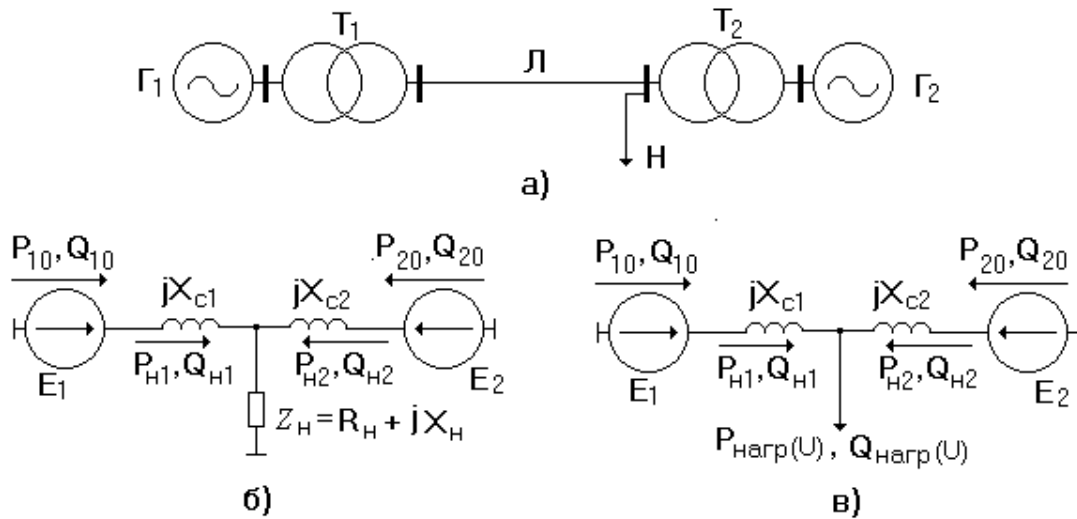


Рис.1- Исследуемая схема:

а - принципиальная схема электропередачи; б - схема замещения электропередачи в случае представления нагрузки комплексным постоянным сопротивлением; в - схема замещения электропередачи в случае представления нагрузки статическими характеристиками

Запас устойчивости определяется по максимуму зависимости  $P = f(\delta_{12})$  при изменяющемся напряжении на нагрузке:

$$K_p = \frac{P_{MAX} - P_0}{P_0} 100\%, \quad (1)$$

где  $P_{MAX}$  - максимальная активная мощность передающей станции;

$P_0$  - активная мощность передающей станции в исходном режиме.

Если приемная система представлена нагрузкой  $H$  и местной станцией  $G_2$  (рис.1 а), то при оценке статической устойчивости системы исходят из постоянства ЭДС обеих станций ( $E_{10}$  и  $E_{20}$ ), которые определяются по известному выражению [1]:

$$E_{i(0)} = \sqrt{\left(U + \frac{Q_{H(i)} \cdot X_{c_i}}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_{H(i)} \cdot X_{c_i}}{U}\right)^2}, \quad (2)$$

где  $U$  - напряжение узловой точки системы, к которой подключена нагрузка, о.е.;

$P_{H(i)}, Q_{H(i)}$  - активная и реактивная мощности, поступающие к узловой точке  $i$  от соответствующего генератора, о.е.;

$X_{c_i}$  - результирующее сопротивление цепи от точки приложения ЭДС соответствующего генератора до шин нагрузки, о.е. (рис.1 б).

Угловая характеристика активной мощности передающей станции  $G_1$  определяется уравнением[1-3]:

$$P_1 = E_1^2 \sin \alpha_{11} / Z_{11} + E_1 E_2 \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) / Z_{12}, \quad (3)$$

где  $Z_{11}, Z_{12}$  - собственное и взаимное сопротивления передающей станции соответственно;  $\alpha_{11}, \alpha_{12}$  - соответственно углы потерь собственного и взаимного сопротивлений.

Максимум характеристики (3) дает значение действительного предела мощности передающей станции  $\Gamma_1$ .

Таким образом, при представлении нагрузки комплексным постоянным сопротивлением нет необходимости знать характер изменения напряжения на ее шинах. Влияние нагрузки на действительный предел передаваемой мощности проявляется через параметры собственного и взаимного сопротивлений.

Для схемы замещения (рис. 1 б) собственное и взаимное сопротивления определяются по формулам:

$$\underline{Z}_{11} = jX_{c1} + jX_{c2} \cdot \underline{Z}_H / (jX_{c2} + \underline{Z}_H); \quad \underline{Z}_{12} = j(X_{c1} + X_{c2}) + jX_{c1} \cdot jX_{c2} / \underline{Z}_H, \quad (4)$$

где  $\underline{Z}_H$  - сопротивление нагрузки.

Сопротивление нагрузки определяется по формуле:

$$\underline{Z}_H = U^2 (\cos \varphi_{HAГP} + j \sin \varphi_{HAГP}) / S_{HAГP}. \quad (5)$$

**Пример 1** На рис. 2 приведена схема электрической системы, содержащая две генераторные станции, питающие комплексную нагрузку. Требуется:

1) определить коэффициент запаса статической устойчивости по идеальному пределу мощности; 2) построить угловую характеристику активной мощности передающей станции и определить коэффициент запаса статической устойчивости по действительному пределу мощности, представив нагрузку постоянным комплексным сопротивлением; 3) определить коэффициент запаса статической устойчивости по действительному пределу мощности, представив нагрузку статическими характеристиками.

Параметры схемы и параметры исходного режима:

$\Gamma_1$ :  $P_H = 50$  МВт;  $X_{*d} = 1,20.e.$ ;  $\cos \varphi = 0,8$ ;  $X'_{*d} = 0,30.e.$ ; АРВ – нет;

$T_1$ :  $S_H = 63$  МВ·А;  $u_K = 10,5\%$ ;  $T_2$ :  $S_H = 160$  МВ·А;  $u_K = 12\%$ ;

$\Gamma_2$ :  $P_H = 130$  МВт;  $X_{*d} = 1,50.e.$ ;  $\cos \varphi = 0,85$ .

Передаваемая мощность станции 1:  $P_{H1} = 50$  МВт;  $\cos \varphi_{H1} = 0,8$ .

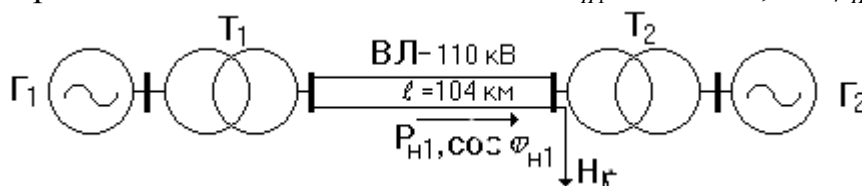


Рис.2- Схема электропередачи

**Решение** Для определения коэффициента запаса по *идеальному* пределу мощности принимают, что генератор  $\Gamma_1$  отдает мощность в приемную систему несоизмеримо бóльшей мощности. При этих условиях напряжение на шинах нагрузки неизменно по величине и фазе при любых режимах работы электропередачи. На рис. 3 приведена схема замещения для расчета идеального предела мощности, без учёта  $\Gamma_2$ .

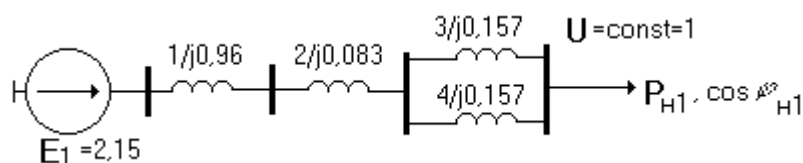


Рис.3- Схема замещения для расчета идеального предела мощности

Расчет выполним в о. е. при приближённом приведении и базисных условиях:

$$S_B = 50 \text{ МВ} \cdot \text{А}; \quad U_B = 115 \text{ кВ.}$$

Параметры схемы замещения и исходного режима будут:

$$X_1 = X_{*d} \frac{S_B}{S_H} = 1,2 \frac{50 \cdot 0,8}{50} = 0,96 \text{ о.е.}; \quad X_2 = \frac{u_K \%}{100} \frac{S_B}{S_H} = \frac{10,5 \cdot 50}{100 \cdot 63} = 0,083 \text{ о.е.};$$

$$X_3 = X_4 = X_0 \cdot \ell \frac{S_B}{U_{CP.CT}^2} = 0,4 \cdot 104 \frac{50}{115^2} = 0,157 \text{ о.е.}; \quad U_* = \frac{U}{U_{CP.CT}} = 115/115 = 1 \text{ о.е.};$$

$$P_{*H1} = P_{H1} / S_B = 50/50 = 1 \text{ о.е.}; \quad Q_{*H1} = P_{*H1} \cdot \tan \varphi = 1 \cdot 0,75 = 0,75 \text{ о.е.}$$

Сопротивление электропередачи со стороны  $\Gamma_1$  до шин нагрузки

$$X_{c1} = X_1 + X_2 + X_3 // X_4 = 0,96 + 0,083 + 0,5 \cdot 0,157 = 1,12 \text{ о.е.}$$

ЭДС генераторов передающей станции ( $\Gamma_1$ ) согласно (2) будет:

$$E_{10} = \sqrt{\left(1 + \frac{0,75 \cdot 1,12}{1}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 1,12}{1}\right)^2} = 2,15 \text{ о.е.}$$

Активная мощность, выдаваемая генератором  $\Gamma_1$ , будет

$$P = \frac{E_{10} \cdot U}{X_{c1}} \cdot \sin \delta = \frac{2,15 \cdot 1}{1,12} \cdot \sin \delta = 1,92 \sin \delta.$$

Максимум мощности, равный 1,92, может быть назван *идеальным* пределом активной мощности для станции 1.

Коэффициент запаса статической устойчивости по *идеальному* пределу активной мощности найдем по выражению:

$$K_{3(P)} = \frac{P_{MAX} - P_{PH1}}{P_{H1}} \cdot 100 = \frac{1,92 - 1}{1} \cdot 1 = 92\%. \quad (8)$$

Для расчета  $K_{3(P)}$  по *действительному* пределу мощности составим схемы замещения (рис. 4).

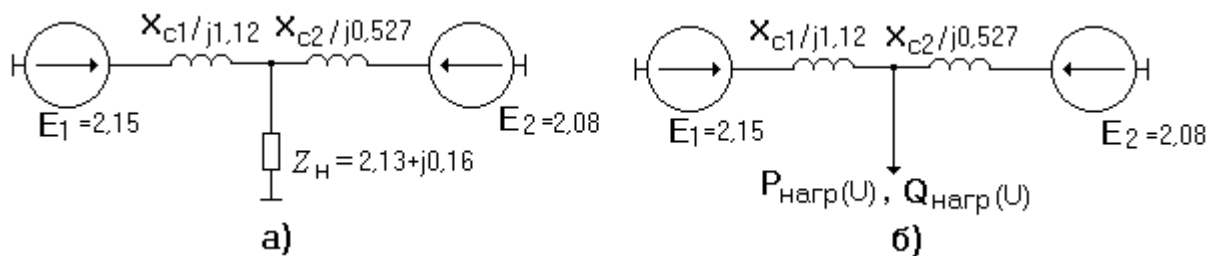


Рис. 4 - Схемы замещения электропередачи

для расчета действительного предела мощности:

а- при нагрузке, заданной постоянным сопротивлением;

б- при нагрузке, заданной статическими характеристиками.

Сопротивление электропередачи со стороны  $\Gamma_2$  до шин нагрузки

$$jX_{c2} = jX_{T2} + jX_{\Gamma 2} = j\left(\frac{12 \cdot 50}{100 \cdot 160} + 1,5 \cdot \frac{50 \cdot 0,85}{130}\right) = j0,527 \text{ о.е.}$$

Сопротивление комплексной нагрузки согласно (5) будет:

$$\underline{Z}_H = 1^2 \cdot (0,8 + j0,6) / 3,75 = 0,213 + j0,16 \text{ о.е.},$$

где

$$S_{HAGP} = P_H / (\cos\varphi \cdot S_B) = 150 / (0,8 \cdot 50) = 3,75 \text{ о.е.}$$

Мощность, поступающая в нагрузку от местной станции  $\Gamma_2$ ,

$$S_{H2} = P_H + jQ_H - P_{H1} - jQ_{H1} = 3 + j2,25 - 1 - j0,75 = 2 + j1,5 \text{ о.е.}$$

Здесь  $P_{*H} = P_H / S_B = 150 / 3 = 3 \text{ о.е.}$ ;  $Q_{*H} = P_{*H} \cdot \tan\varphi = 3 \cdot 0,75 = 2,25 \text{ о.е.}$

ЭДС генератора местной станции согласно (2) будет:

Собственное и взаимное сопротивления для станции 1 определим по (4):

$$\underline{Z}_{11} = j1,12 + j0,527 / (0,213 + j0,16) = 1,28 e^{j84,9^\circ} \text{ о.е.};$$

$$\underline{Z}_{12} = j1,12 + j0,527 + j1,12 \cdot j0,527 / (0,213 + j0,16) = 3,46 e^{j120,74^\circ} \text{ о.е.},$$

откуда фазовые углы собственного и взаимного сопротивлений:

$$\varphi_{11} = 84,9^\circ; \quad \varphi_{12} = 120,74^\circ.$$

Тогда углы потерь собственного и взаимного сопротивлений будут:

$$\alpha_{11} = 90^\circ - \varphi_{11} = 90 - 84,9 = 5,1^\circ; \quad \alpha_{12} = 90 - 120,74 = -30,74^\circ.$$

В итоге выразим угловую характеристику мощности генератора  $\Gamma_1$  по (3)

$$P_1 = \frac{2,15^2}{1,28} \sin 5,1^\circ + \frac{2,15 \cdot 2,08}{3,46} \sin(\delta_{12} + 30,74^\circ) = 0,32 + 1,29 \sin(\delta_{12} + 30,74^\circ).$$

Далее вычисляем значения  $P_1$  при нескольких значениях угла  $\delta_{12}$  (табл. 1) и строим угловую характеристику с помощью, например, MathCad(рис. 5).

Таблица 1

$\delta_{12}, \text{эл. град}$	-30,74	0	30	60	90	120	150
$P_1, \text{о.е.}$	0,32	0,98	1,44	1,6	1,43	0,95	0,3



Рис.5 - Угловая характеристика мощности генератора

Максимум этой характеристики дает значение *действительного* предела активной мощности станции 1:

$$P_{1MAX} = 0,32 + 1,29 = 1,61 \text{ о.е.}$$

Коэффициент запаса статической устойчивости системы по *действительному* пределу мощности будет равен

$$K_{3(P)} = \frac{1,61 - 1}{1} 100 = 61\%.$$

Сравнивая значения коэффициентов запаса статической устойчивости по *идеальному* и *действительному* пределам мощности, видим, что снижение напряжения на шинах нагрузки за счет представления нагрузки комплексным сопротивлением уменьшает запас статической устойчивости станции 1.

## 1.2 Расчет динамических характеристик АД (задание 2)

Любые функциональные зависимости параметров исследуемого объекта с учетом фактора времени называют динамическими характеристиками.

С точки зрения практики для асинхронного двигателя (АД) наиболее важными являются динамические характеристики, возникающие в процессе его пуска, при посадке напряжения на его зажимах и полного отключения от источника питания.

Искомые характеристики наиболее просто могут быть определены путем численного интегрирования уравнения движения АД в о.е.:

$$\Delta m = m_{\Sigma} - m_{MX} = -T_J \frac{ds}{dt}, \quad (9)$$

где  $\Delta m$  - избыточный момент, о.е.;  $m_{\Sigma}$  - электромагнитный момент АД, о.е.;  $m_{MX}$  - статический момент сопротивления производственного механизма, о.е.;  $T_J$  - механическая постоянная времени (постоянная инерции) агрегата АД – производственный механизм, с.

Наиболее просто  $m_{\Sigma}$  можно приближенно рассчитать по формуле Клосса:

$$m_{\Sigma} = \frac{2 \cdot m_{\max}}{s/s_K + s_K/s} \cdot \left(\frac{U}{U_H}\right)^2, \quad (10)$$

где  $m_{\max}$  - кратность максимального момента (пергрузочная способность) асинхронного двигателя, о.е.;  $s_K$  - критическое скольжение, определяемое из известного соотношения [2]:

$$s_K = s_H (m_{\max} + \sqrt{m_{\max}^2 - 1}). \quad (11)$$

Для большинства производственных механизмов момент  $m_{MX}$  можно определить по общему выражению [2]:

$$m_{MX} = m_{П.МХ} + (k_{нг} - m_{П.МХ}) \left(\frac{1-s}{1-s_H}\right)^{\gamma}, \quad (12)$$

где  $m_{П.МХ}$  - момент трогания механизма из положения покоя, о.е.;  $k_{нг}$  - коэффициент нагрузки двигателя, о.е.;  $\gamma = 0:1:2$  - показатель, характеризующий механическую характеристику механизма  $m_{MX} = f(s)$ .

Постоянную инерции  $T_J$  всего агрегата можно рассчитать так [2]:

$$T_J = \frac{(GD^2 + GD_{ПРИБ.МХ}^2)n_0^2}{364P_H}, \quad (13)$$

где  $GD^2$  - маховый момент ротора АД, т·м<sup>2</sup>;  $P_H$  - номинальная мощность двигателя, кВт;  $GD_{ПРИБ.МХ}^2$  - приведенный к валу АД маховый момент механизма, т·м<sup>2</sup>;  $n_0$  - синхронная частота вращения ротора АД, об/мин.



В свою очередь  $GD_{ПРИВ.МХ}^2$  рассчитывают по выражению [2]:

$$GD_{ПРИВ.МХ}^2 = GD_{МХ}^2 (n_{0.МХ} / n_0)^2, \quad (14)$$

где  $n_{0.МХ}$  - синхронная частота вращения вала механизма, об/мин.

Зная механические характеристики  $m_{\vartheta} = f(s)$  и  $m_{МХ} = f(s)$ , определяют как разность характеристику избыточного момента  $\Delta m = f(s)$ .

Если эту зависимость  $\Delta m = f(s)$  разбить на интервалы по скольжению  $\Delta s_1, \Delta s_2 \dots \Delta s_i \dots \Delta s_n$ , **начиная со скольжения  $s=1$** , при котором начинается переходный процесс, и на каждом интервале определить *среднюю* величину избыточного момента  $\Delta m_{i(ср)}$ , то на любом интервале скольжения уравнение движения будет иметь простой вид:

$$\Delta m_{i(ср)} = -T_J \cdot \Delta s_i / \Delta t_i.$$

Таким образом, время переходного процесса (при пуске, посадке напряжения, выбеге и др.) может быть найдено в виде суммы из соотношения:

$$t = -T_J \sum_{i=1}^n \frac{\Delta s_i}{\Delta m_{i(ср)}}. \quad (15)$$

Заметим, что рассмотренный метод расчета динамических характеристик АД универсален, так как позволяет найти искомые зависимости при любом характере моментов АД и производственного механизма. Точность расчета зависит только от числа интервалов разбиения и принятых в расчете аналитических выражений для  $m_{\vartheta} = f(s)$  и  $m_{МХ} = f(s)$ .

**Пример 2** Для АД заданы следующие параметры:

$P_H = 1 \text{ МВт}$ ;  $m_{МАХ} = 2 \text{ о.е.}$ ;  $s_H = 0,025$ ;  $GD^2 = 1 \text{ т} \cdot \text{м}^2$ ;  $k_{нг} = 0,9$ ;  $n_0 = 600 \text{ об/мин}$ ;

$m_{П.МХ} = 0,15 \text{ о.е.}$ ;  $\gamma = 2$ ;  $GD_{ПРИВ.МХ}^2 = 4 \text{ т} \cdot \text{м}^2$ ;  $n_{0.МХ} = 200 \text{ об/мин}$ ;  $U_{ОСТ} = 0,5 \text{ о.е.}$

**Т р е б у е т с я :**

- а) рассчитать время пуска АД *при номинальном* напряжении на его зажимах;
- б) определить допустимую продолжительность посадки напряжения  $U_{ОСТ}$ ;
- в) определить допустимую продолжительность посадки напряжения при его полном исчезновении;
- г) рассчитать время выбега АД для случаев (б) и (в).

**Решение**

**а) Расчет времени пуска АД (задание 2).**

По (10) определяем механическую характеристику  $m_{\vartheta} = f(s)$  при номинальном напряжении на зажимах АД

$$m_{\vartheta} = \frac{2 \cdot 2}{s / 0,093 + 0,093 / s} = \frac{0,372 \cdot s}{s^2 + 0,0086},$$

где

$$s_K = 0,025(2 + \sqrt{2^2 - 1}) = 0,093.$$

По (12) определяем характеристику статического момента сопротивления производственного механизма ( $m_{МХ} = f(s)$ ):

$$m_{МХ} = 0,15 + (0,9 - 0,15)((1 - s)/(1 - 0,025))^2.$$

Так как двигатель работает при коэффициенте нагрузки  $k_{нг} = 0,9$ , то его рабочее скольжение будет несколько меньше номинального значения. Используя (10), определим величину рабочего скольжения  $s_p$  после подстановки:

$$0,9 = 0,372 \cdot s_p / (s_p^2 + 0,0086^2),$$

откуда

$$s_p = \frac{0,372 - \sqrt{0,372^2 - 4 \cdot 0,9 \cdot 0,00774}}{2 \cdot 0,9} = 0,022.$$

Определяем постоянную инерции агрегата «двигатель-производственный механизм» по формулам (13)–(14):

$$T_J = \frac{(1 + 0,444) \cdot 600^2}{364 \cdot 1000} = 1,43 \text{ с}; \quad GD_{ПРИБ.МХ}^2 = 4 \cdot (200 / 600)^2 = 0,444 \text{ м} \cdot \text{м}^2.$$

Разбиваем далее весь интервал изменения скольжения двигателя от  $s = 1$  до  $s = s_p$  на отдельные участки  $\Delta s_i$ , начиная со значения скольжения  $s = 1$ . При этом на каждом участке определяем величину избыточного момента  $\Delta m_i$ , затем среднего избыточного момента  $\Delta m_{i(ср)}$  и находим время достижения соответствующего скольжения, используя (15).

Расчет ведем от значения  $s = 1$  до  $s = 0,022$ . Результаты расчета  $m_{\mathcal{E}} = f(s)$ ,  $m_{MX} = f(s)$ ,  $\Delta m = f(s)$ , времени пуска  $t_{ПУСК}$  приведены в табл.3 и на рис. 6.

Таблица 3

Параметр	Скольжение							
	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,093	0,022	0
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Расчет режима пуска при $U = 1 \text{ о.е.}$								
$m_{\mathcal{E}}$	0,37	0,46	0,61	0,88	1,53	2	0,9	0
$m_{MX}$	0,15	0,182	0,276	0,434	0,655	0,799	0,9	0,939
$\Delta m$	0,22	0,278	0,334	0,446	0,875	1,201	0	-
$\Delta m_{i(ср)}$	-	0,249	0,306	0,39	0,661	1,038	0,6	-
$t_{ПУСК}, \text{с}$	-	1,149	2,084	2,817	3,25	3,4	3,57	-
Расчет режима посадки напряжения при $U_{осм} = 0,5 \text{ о.е.}$								
$m_{\mathcal{E}}$	0,092	0,115	0,152	0,22	0,382	0,5	0,225	0
$\Delta m$	-0,058	-0,067	-0,124	-0,214	-0,273	-0,299	-0,675	-
$\Delta m_{i(ср)}$	-0,062	-0,095	-0,169	-0,206	-0,285	-0,487	-	-
$t_{ВЫБ}, \text{с}$	11,45	6,836	3,825	2,133	0,745	0,208	-	-
Расчет режима посадки напряжения при $U_{осм} = 0$								
$\Delta m$	-0,15	-0,182	-0,276	-0,434	-0,655	-0,799	0,9	0,939
$\Delta m_{i(ср)}$	-0,166	-0,229	-0,355	-0,544	-0,727	-0,849	-	-
$t_{ВЫБ}, \text{с}$	4,634	2,911	1,662	0,856	0,33	0,12	-	-

Если в процессе разгона АД окажется, что его электромагнитный мо-

мент при номинальном напряжении на его зажимах будет меньше или равен моменту нагрузки на валу при скольжении  $s > s_{kp}$ , то пуск АД неосуществим. В этом случае студент обязан самостоятельно скорректировать параметры двигателя таким образом, чтобы пуск был обеспечен.

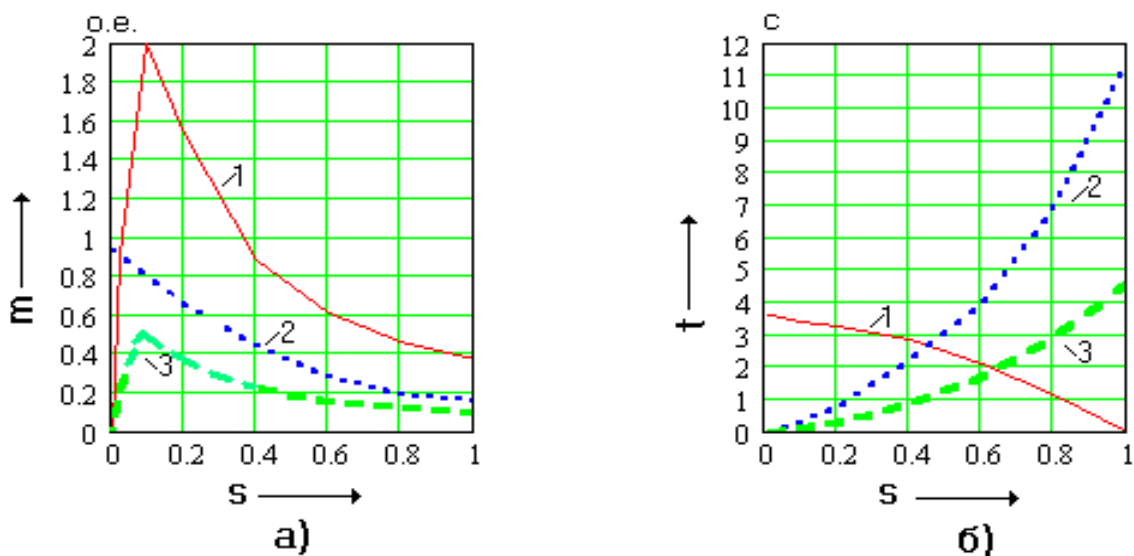


Рис. 6 - К определению динамических характеристик АД:

- а) характеристики моментов: 1- статический электромагнитный момент при  $U = 1$  o.e.; 2- статический момент сопротивления производственного механизма; 3- статический электромагнитный момент при  $U_{ост} = 0,5$ ;
- б) временные характеристики: 1- пусковая характеристика; 2- характеристика выбега при  $U_{ост} = 0,5$ ; 3- характеристика выбега  $U_{ост} = 0$ .

#### б) Определение допустимой продолжительности посадки напряжения $U_{ост}$ (задание 2)

При длительной посадке напряжения от номинального значения до  $U_{ост} = 0,5$  o.e. работающий АД будет тормозиться и остановится, так как его электромагнитный момент становится меньше момента механизма на всем диапазоне изменения скольжения от  $s_p$  до 1. Время допустимой посадки напряжения в рассматриваемом случае не ограничено с точки зрения устойчивости АД, так как при номинальном напряжении на зажимах АД его электромагнитный момент превышает момент сопротивления приводимого рабочего механизма при скольжениях  $s > s_K$  (таким образом, при восстановлении номинального значения напряжения при любом скольжении выбега двигателя вновь развернется до рабочего скольжения  $s_p$ ).

Заметим, если характеристики электромагнитного момента и момента нагрузки на валу АД пересекаются в области его неустойчивой работы ( $s_H > s_K$ ) при номинальном напряжении на зажимах АД, то время допустимой

посадки напряжения будет определяться интервалом времени, за который АД достигнет скольжения  $s_{\Pi}$  в процессе выбега.

в) Время допустимой посадки напряжения до значения  $U_{\text{ост}} = 0$  также неограниченно с точки зрения устойчивости АД в силу сохранения условий, рассмотренных в предыдущем пункте.

г) Очевидно, при полном отключении питания выбег АД происходит более интенсивно по сравнению с предыдущим случаем, так как момент  $m_{\text{э}}(s) = 0$ .

### 1.3 Расчёт динамической устойчивости генераторов станции 1 (задание 2)

В электрической системе возможны не только малые, но и так называемые большие возмущения, например, короткие замыкания. По нормативам принимают двухфазные короткие замыкания на землю длительностью 0.18 с в сети 220 кВ и двухфазные короткие замыкания на землю или однофазные короткие замыкания длительностью 0,12 с в сети 500 кВ. Они не должны вызывать нарушения динамической устойчивости и наступления асинхронного хода. В противном случае необходимо применение специальных мер, повышающих устойчивость.

В простейшем случае для системы станция-шины возможно применение качественных методов, которые в отличие от количественных дают возможность быстро ответить на вопрос об устойчивости системы и выделить область параметров, в которых устойчивость сохраняется. К качественным методам относится метод площадей (энергий) [3, с.77-82].

**В контрольной работе методом площадей требуется определить устойчивость системы при симметричном (несимметричном) коротком замыкании в точке к.з.** Считать, что короткое замыкание произошло в начале одной из линий  $L$ ; оно ликвидируется отключением линии. Для применения метода площадей следует определить амплитуды характеристик мощности режимов: *нормального, аварийного, послеаварийного*, при представлении генераторов их переходными параметрами ( $E'_q, X'_d$ ). Нормальному режиму соответствует параллельная совместная работа двух линий  $L$  и внешнее сопротивление, найденное ранее. Пусть для рассмотренного примера

$$X_{\text{вн}(б)}^* = 1.655 \text{ о.е.}; \quad X'_{d\Sigma} = X'_d + X_{\text{вн}} = 1.92 + 1.655 = 3.575 \text{ о.е.}$$

*Аварийному* режиму соответствуют схемы замещения рис.7,8, в которых присутствует дополнительное сопротивление -шунт. Дополнительное сопротивление должно быть определено в первом задании. Например, для двухфазного короткого замыкания на землю примем:  $\Delta X^{(1,1)} = X_{2\Sigma} // X_{0\Sigma} = 2.193 // 0.44 = 0.366 \text{ о.е.}$  Это сопротивление в схеме замещения аварийного режима должно быть помещено в точку короткого замыкания. Если задан вид трехфазного короткого замыкания, то  $\Delta X^{(3)} = 0$ . Переходная электродвижущая сила  $E'_q$ , пропорциональна полному потокосцеплению

обмотки возбуждения и остается практически постоянной на достаточно больших интервалах времени.

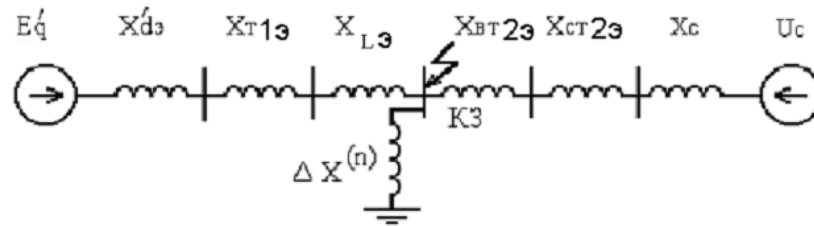


Рис.7– Схема замещения аварийного режима

Схему следует упростить:

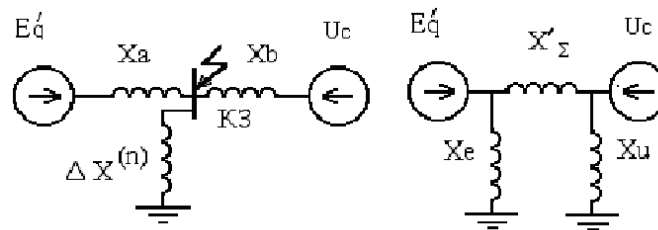


Рис.8–Упрощенная схема замещения аварийного режима

Величины  $X_e$  и  $X_u$  на поток активной мощности не влияют и их можно не учитывать.

Далее следует преобразование схемы и определение амплитуды характеристики мощности аварийного режима. Для двухфазного короткого замыкания на землю по данным рассмотренного примера  $X_{\Sigma(\phi)}^* = 6.1 \text{ o.e.}$

Послеаварийному режиму в задании 2 соответствует схема замещения, подобная рис.7, но с одним сопротивлением  $X_L$ , вторую линию следует считать отключенной выключателями линии в связи с ликвидацией короткого замыкания. Внешнее сопротивление для послеаварийного режима следует

определить.

$$X_{\text{вн}(\phi)n/ав}^* = X_{T1(\phi)\text{Э}}^* + X_{L(\phi)}^* + X_{BT2(\phi)\text{Э}}^* + X_{CT2(\phi)\text{Э}}^* + X_{C(\phi)}^* =$$

$$0.76 + 1.22 + 0.285 + 0 + 0 = 2.265 \text{ o.e.}$$

$$X_{d\Sigma(\phi)n/ав}^* = X'_{d(\phi)\text{Э}}^* + X_{\text{вн}(\phi)n/ав}^* = 1.9 + 2.265 = 4.185 \text{ o.e.}$$

Примерный вид характеристик мощности трех режимов, характеристика турбины, возможные площадки ускорения и торможения приведены на рис.9.

Предельный угол отключения  $\delta_{\text{откл}} = \delta_{\text{откл.макс}}$  в качаниях соответствует равенству площадок  $F_{\text{торм}} = F_{\text{пуск}}$ . Численное значение площадок ускорения, торможения можно получить интегрированием. Отметим характерную особенность: механическая инерция агрегата генератор - турбина препятствует скачкообразному изменению угла  $\delta$ , угол изменяется во времени плавно, что благоприятно сказывается на переходных процессах.

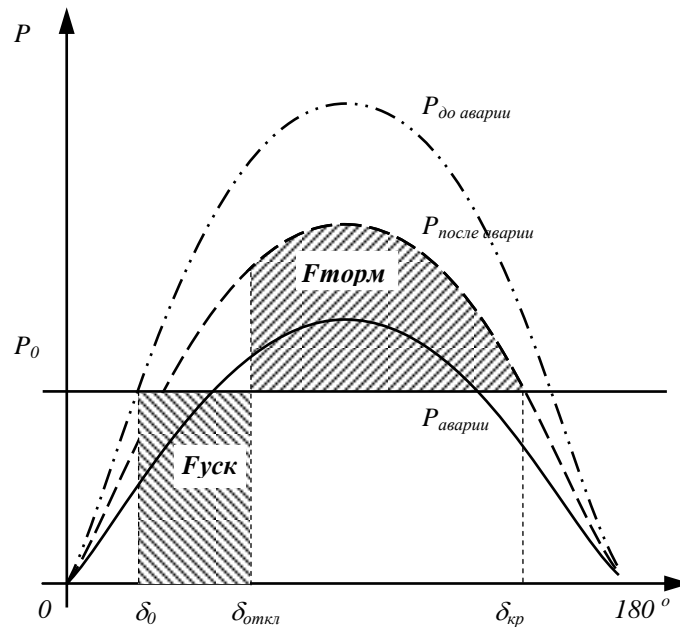


Рис.9- Характеристики мощности простейшей системы

$$\delta_0 = \arcsin \frac{P_0}{P_{\max \text{ до аварии}}}; \quad \delta_{\text{кр}} = 180^\circ - \arcsin \frac{P_0}{P_{\max \text{ после аварии}}}.$$

Все расчеты выполняются для **трехфазного** и **двухфазного** к.з. на землю и происходит в начале цепи линии  $W$ .

Качественный анализ устойчивости ЭЭС проведем при наличии на генераторах станции 1 регуляторов возбуждения пропорционального действия,

#### 1.4 Расчет и построение угловых характеристик мощности нормального, аварийного и послеаварийного режимов

##### 1.4.1 Нормальный режим

Для нормального режима работы все параметры берем из ранее найденных пунктов расчета. Характеристика мощности (без учета явнополюсности) имеет следующий вид[7]:

$$P'_E = \frac{E' \cdot U_{\Sigma}}{x'_{\Sigma}} \cdot \sin \delta' = \frac{1,248 \cdot 1,0}{3,438} \cdot \sin \delta' = 0,363 \sin \delta';$$

Откуда исходный угол нагрузки  $\delta'_0 = 23,54^\circ$ .

##### 1.4.2 Послеаварийный режим

В послеаварийном режиме (режим II) происходит отключение одной цепи линии  $W$ , на которой произошло короткое замыкание. Тогда сопротивление системы возрастет и составит  $x_{\Sigma}^{\text{II}} = x_3 + x_5 = 0,555 + 2,014 = 2,569$  ., о.е.

Находим взаимное сопротивление схемы замещения

$$x''_{d\Sigma} = x'_d + x''_c = 1,876 + 2,569 = 4,445, \text{ о.е.}$$

Характеристика мощности в послеаварийном режиме примет вид:

$$P''_E = \frac{E' \cdot U_{\Sigma}}{x''_{d\Sigma}} \cdot \sin \delta' = \frac{1,248 \cdot 1,0}{4,445} \cdot \sin \delta' = 0,281 \sin \delta'$$

### 1.4.3 Аварийный режим

В аварийном режиме рассматривается 2 вида к.з.: трехфазное и двухфазное на землю. В месте аварии вводится шунт с сопротивлением  $x_D$ . Для трехфазного режима  $x_D=0$ , для двухфазного на землю  $x_D=x_{2\Sigma}/x_{0\Sigma}$ .

Определим результирующие сопротивления схем обратной и нулевой последовательностей. В схеме замещения обратной последовательности сопротивления трансформатора  $T1$  и линии  $W$  остаются неизменными (см. задание 1), а сопротивление генератора  $G1$  пересчитывается. ЭДС источников равны нулю.

Сопротивления генератора  $G1$  обратной последовательности:

$$x_1 = x_{2*} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном}} \cdot n_1} \cdot \left( \frac{U_{\text{ном}}}{U_{62}} \right)^2 = 0,3 \cdot \frac{1000}{68,75 \cdot 3} \cdot \left( \frac{13,8}{12,55} \right)^2 = 1,759 \text{ о.е.,}$$

где  $x_{2*}$  – сопротивление генератора токам обратной последовательности, о. е.

Преобразуем схему замещения обратной последовательности.

$$x_7 = x_1 + x_3 = 1,759 + 0,555 = 2,314 \text{ ;о.е.}$$

$$x_8 = x_5 // x_6 = \frac{x_5}{2} = \frac{2,014}{2} = 1,007 \text{ ;о.е.}$$

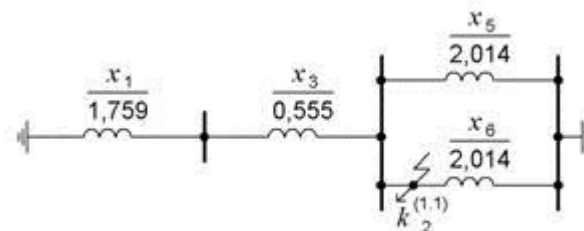


Рисунок 10– Схема замещения обратной последовательности

$$x_{2\Sigma} = x_7 // x_8 = \frac{x_7 \cdot x_8}{x_7 + x_8} = \frac{2,314 \cdot 1,007}{2,314 + 1,007} = 0,702$$

$$x_{0\Sigma} = x_{06} = x_{W'}^{(0)} = 5 \cdot x_5^{(1)} = 5 \cdot 2,014 = 10,07$$

Сопротивление трансформатора  $T1$  не изменяется и равно  $x_{03} = x_3 = 0,555$  о.е..

Генератор  $G1$  в схеме замещения нулевой последовательности участвовать не будет, так как находится за обмоткой трансформатора  $T1$ , соединенной в треугольник.

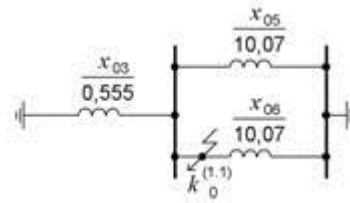


Рисунок 11– Схема замещения нулевой последовательности

$$x_{07} = x_{05} // x_{06} = \frac{x_{05}}{2} = \frac{10,07}{2} = 5,035 \text{ о.е.}$$

$$x_{0\Sigma} = x_{03} // x_{07} = \frac{x_{03} \cdot x_{07}}{x_{03} + x_{07}} = \frac{0,555 \cdot 5,035}{0,555 + 5,035} = 0,50 \text{ о.е.}$$

Определим сопротивление шунта при двухфазном к.з. на землю

Преобразуем схему к расчетному виду

$$x_7 = x_1 + x_3 = 1,876 + 0,555 = 2,431 \text{ о.е.}$$

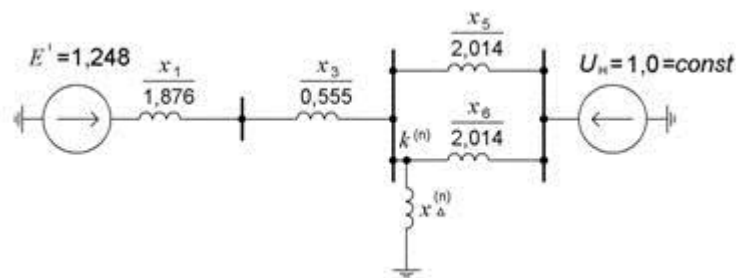


Рисунок 12– Схема замещения аварийного режима

$$x_8 = x_5 // x_6 = \frac{x_5}{2} = \frac{2,014}{2} = 1,007 \text{ о.е.}$$



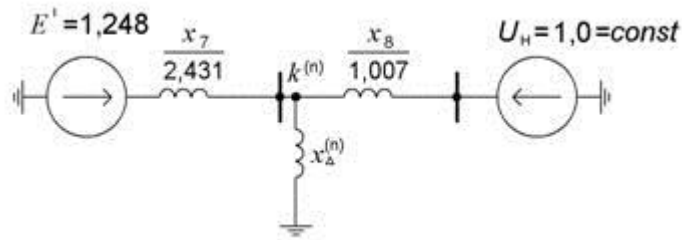


Рисунок 13 – Преобразованная схема замещения

– трехфазное к.з.

$$x_{\Sigma}''' = x_7 + x_8 + \frac{x_7 \cdot x_8}{x_d^{(3)}} = 2,431 + 1,007 + \frac{2,431 \cdot 1,007}{0} = \infty$$

$$P_{\Sigma}''' = \frac{E' \cdot U_{\text{н}}}{x_{\Sigma}'''} = \frac{1,248 \cdot 1,0}{\infty} \cdot \sin \delta' = 0$$

При трехфазном к.з. передача мощности в приемную систему невозможна.

– двухфазное к.з. на землю

$$x_{\Sigma}''' = x_7 + x_8 + \frac{x_7 \cdot x_8}{x_d^{(11)}} = 2,431 + 1,007 + \frac{2,431 \cdot 1,007}{0,292} = 11,82$$

$$P_{\Sigma}''' = \frac{E' \cdot U_{\text{н}}}{x_{\Sigma}'''} = \frac{1,248 \cdot 1,0}{11,82} \cdot \sin \delta' = 0,106 \sin \delta'$$

## 1.5 Определение предельного угла отключения к.з. в простейшей системе и предельного времени отключения

Для определения предельного угла отключения пользуются критерием динамической устойчивости. Площадка ускорения должна быть равна площадке возможного торможения. Предельный угол и определяет равенство этих площадок.

Выражение для определения предельного угла отключения такое[7]:

$$\cos \delta'_{\text{откл.}} = \frac{P_0 (\delta'_{\text{кр}} - \delta'_0) \cdot \frac{\pi}{180} + P_{\text{ж}}'' \cdot \cos \delta'_{\text{кр}} - P_{\text{ж}}''' \cdot \cos \delta'_0}{P_{\text{ж}}'' - P_{\text{ж}}'''}$$

где  $P_{\text{ж}}''$  – максимальная мощность генератора в послеаварийном режиме;

$P_{\text{ж}}'''$  – максимальная мощность генератора в аварийном режиме;

$P_0$  – максимальная мощность генератора в нормальном режиме;

$\delta'_{\text{кр}}$  – критический угол, равный[7]

$$\delta'_{xp} = 180^\circ - \arcsin \frac{P_0}{P''_m} = 180^\circ - \arcsin \frac{0,145}{0,281} = 180^\circ - 31,06^\circ = 148,94^\circ$$

– трехфазное к.з.

$$\cos \delta'_{отклпр.} = \frac{0,145 \cdot (148,94^\circ - 23,54^\circ) \cdot \frac{\pi}{180^\circ} + 0,281 \cdot \cos 148,94^\circ - 0 \cdot \cos 23,54^\circ}{0,281 - 0} = 0,273$$

$$\text{Тогда } \delta'_{отклпр.} = 74,17^\circ$$

– двухфазное к.з. на землю

$$\cos \delta'_{отклпр.} = \frac{0,145 \cdot (148,94^\circ - 23,54^\circ) \cdot \frac{\pi}{180^\circ} + 0,281 \cdot \cos 148,94^\circ - 0,106 \cdot \cos 23,54^\circ}{0,281 - 0,106} = -0,117$$

$$\text{Тогда } \delta'_{отклпр.} = 96,74^\circ$$

Из полученных результатов видно, что система неустойчива при обоих видах к.з. и требует для сохранения динамической устойчивости генераторов станции более быстрого отключения аварийного участка.

## 2 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

### Контрольное задание

В бланк задания на контрольную работу (Приложение 1) входят 3 пункта задания.

*Требования, предъявляемые к оформлению контрольной работы*

Контрольная работа выполняется в форме расчетно-пояснительной записки по ГОСТ 7.32-2001 на листах А4 и графической части в виде схем электрических соединений, схем замещения и графиков.

**Без бланка задания, подписанного преподавателем, контрольная работа не принимается к рецензии.**

Контрольная работа должна сопровождаться схемами и графиками с обозначением на них всех необходимых величин. Все расчеты должны сопровождаться необходимыми формулами в буквенном виде с последующей подстановкой в них числовых значений. Вычисления следует производить с округлением результатов расчета не более, чем *до трех* значащих цифр.

К выполнению работы рекомендуется приступать лишь после изучения теории вопроса.

### ***Задание 1***

Для приведенной в бланке задания расчётной схемы электропередачи определить коэффициент запаса статической устойчивости генераторной станции 1:

- 1) по идеальному пределу мощности;
- 2) по действительному пределу мощности.

Для всех вариантов определить предел передаваемой мощности со стороны станции 1. Место подключения нагрузки в схеме электропередачи, характер ее представления указаны в бланке задания.

### ***Задание 2.1***

Для АД, используемого в качестве привода производственного механизма, рассчитать в соответствии с заданием его динамическую характеристику.

### ***Задание 2.2***

Выполнить расчет динамической устойчивости при трехфазном к.з. в начале линии при наличии АРВ заданного типа на генераторах и заданных постоянных инерции  $T_{j1}$  и  $T_{j2}$ .

### ***Контрольные вопросы для развернутых ответов (задание 3)***

- 1 Мероприятия, применяемые для повышения пропускной способности дальних электропередач.
- 2 Как влияет режим заземления нейтрали трансформаторов на запас устойчивости электрических систем?
- 3 Каково влияние продольной емкостной компенсации на устойчивость электрической системы?
- 4 Перечислите основные причины нарушения динамической устойчивости электрических систем. Дайте объяснение физических процессов, происходящих при нарушении динамической устойчивости.
- 5 В чем заключается сущность метода площадей? Какие допущения положены в его основу?
- 6 В чем заключается сущность метода последовательных интервалов? Какие допущения положены в его основу?
- 7 Как количественно определяется запас динамической устойчивости?
- 8 Как определяются угол и время отключения короткого замыкания?
- 9 Как производится учет АРВ в расчетах динамической устойчивости?
- 10 Основные технические средства повышения динамической устойчивости электрических систем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В.А. Веников.- М.: Высшая школа, 1985.– 576с.
2. Переходные процессы электрических систем в примерах и иллюстрациях / под ред. В.А. Веникова.- М.: Энергия, 1967.–332с.
3. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем /П.С. Жданов.- М.: Энергия, 1979.– 211с.
4. Голоднов Ю.М. Самозапуск электродвигателей /Ю.М. Голоднов и др. – М.: Энергия, 1985.–233с.
5. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах.– Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003.–283с.
6. Устойчивость электрических систем: Учебное пособие/Т.Я. Окуловская и др.– Екатеринбург: УГТУ(УПИ), 2004.–60с.
7. Шабат В.К. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах. – М.: Академия, 2013. –192 с.
8. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах: метод. Указания по курсовой работе для студентов укрупненной группы направления подготовки специалистов 140211–всех форм обучения / сост.: А.Э. Бобров, А.М. Дяков, В.Б. Зорин, Л.И. Пилюшенко. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 48 с.

Образец индивидуального задания

Курганский государственный университет  
Кафедра «Энергетика и технология металлов»

**Задания на контрольную работу по дисциплине: «Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах»**

студенту Иванову И.И. группы ТСЗ - 40613с

Направление: 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Тема работы: «Расчёт статической и динамической устойчивости»

**Задание 1.** Для приведенной схемы электропередачи (рис. 1) определить коэффициент запаса статической устойчивости генераторной станции 1 по идеальному и действительному пределам мощности.

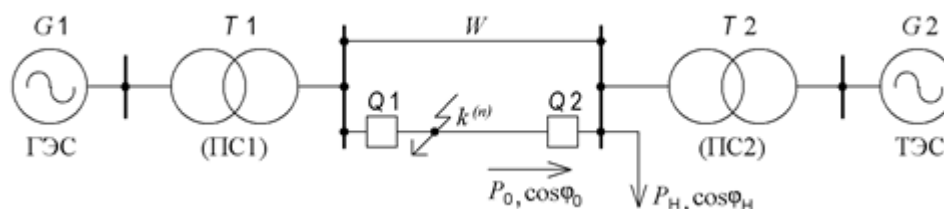


Рис. 1 Схема электропередачи к заданию 1

Обозначение	Технические данные оборудования и линий электропередачи
Г1	$P_{\text{ном}} = 12 \text{ МВт}; U_{\text{ном}} = 6 \text{ кВ}; \cos\varphi_{\text{ном}} = 0,85; x'_{d*} = 0,5 \text{ о.е.}; x_{d*} = 1,5 \text{ о.е.}$
Г2	$P_{\text{ном}} = 40 \text{ МВт}; U_{\text{ном}} = 10,5 \text{ кВ}; \cos\varphi_{\text{ном}} = 0,85; x'_{d*} = 0,2 \text{ о.е.}; x_{d*} = 2 \text{ о.е.}$
Т1	$S_{\text{ном}} = 16 \text{ МВ} \cdot \text{А}; u_k = 8 \text{ \%}; k = 6,3/115 \text{ кВ}$
Т2	$S_{\text{ном}} = 63 \text{ МВ} \cdot \text{А}; u_k = 10 \text{ \%}; k = 115/10,5 \text{ кВ}$
W	$L_1 = 50 \text{ км}$
Нг	$P_{\text{нг}} = 40 \text{ МВт}; \cos\varphi_{\text{н}} = 0,8$

Передаваемая мощность со стороны Г1:  $P_0 = P_{\text{н1}} = 12 \text{ МВт}; \cos\varphi_{\text{н}} = 0,85$

**Задание 2.** Для АД, используемого в качестве привода производственного механизма, рассчитать в соответствии с заданием динамическую характеристику.

АД:  $P_{\text{ном}} = 2 \text{ МВт}; M_{\text{мех}*} = 2 \text{ о.е.}; s_{\text{ном}} = 0,04; GD^2 = 1,7 \text{ т} \cdot \text{м}^2; n_0 = 500 \text{ об/мин.}$

Рабочий механизм:  $M_{\text{п.мех}*} = 0,1 \text{ о.е.}; \gamma = 0; GD^2_{\text{мех}} = 2 \text{ т} \cdot \text{м}^2; n_{0\text{мех}} = 250 \text{ об/мин.}$

Рассчитать время пуска  $t_{\text{пуск}}$ .

**Задание 3.** Теоретический вопрос.

Задание выдал \_\_\_\_\_ /В.И. Мошкин/