

**Министерство образования и науки РФ**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Владимирский государственный университет имени Александра  
Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»**  
**(ВлГУ)**

**Кафедра электротехники и электроэнергетики**

# **Анализ переходных режимов электроэнергетических систем**

Методические указания к практическим занятиям и рас-  
четно-графической работе по дисциплине «Переходные процессы  
в электроэнергетических системах»

Составитель: Колесник Г.П.

Владимир 2016

УДК.621.311  
ББК 22.332

Рецензент:

Кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Биотехнических и электронных систем и технологий»,  
Владимирского государственного университета  
*В.С. Грибакин*

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Владимирского государственного университета

**Анализ переходных режимов электроэнергетических систем**  
(Электронный ресурс). Методические указания к практическим занятиям  
и расчетно-графической работе. / Составитель Г.П. Колесник. – Владимир,  
Владим. гос. ун-т. 2016. 58 с.

Содержат методические указания к практическим занятиям по расчету переходных режимов электроэнергетических систем, домашним заданиям и расчетно-графической работе, в частности по расчету статической устойчивости электрических систем по практическим критериям при различных способах представления схем замещения элементов, входящих в расчетную схему системы электроснабжения.

Методические указания составлены в соответствии с Федеральным Государственным образовательным стандартом для студентов четвертого курса бакалавриата направления 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения.

Табл.16. Ил. 19. Библиогр.: 8 назв.

УДК 621.311  
ББК 22.332

ISBN

©Владимирский государственный  
университет, 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Методические указания к практическим занятиям по расчету переходных режимов электроэнергетических систем.....	8
1.1. Расчет статической устойчивости электрических систем при нагрузке заданной постоянным сопротивлением.....	8
1.2. Расчет статической устойчивости электрических систем при нагрузке, заданной статическими характеристиками.....	11
1.2.1. Примеры решения задач.....	13
<i>Пример 1.</i> ....	13
1.3. Расчет статической устойчивости нагрузки, заданной статическими характеристиками.....	24
<i>Пример 2.</i> .....	25
1.4. Расчет статической устойчивости нагрузки, заданной эквивалентным асинхронным двигателем.....	29
<i>Пример 3.</i> .....	31
1.5. Расчет динамических характеристик асинхронного двигателя.....	38
<i>Пример 4.</i> .....	40
2. Методические указания к выполнению расчетно-графической работы на тему «Расчет устойчивости системы электроснабжения по практическим критериям».....	43
2.1. Состав и исходные данные к расчетно-графической работе...43	
<i>Задание 1</i> .....	43
<i>Задание 2</i> .....	50
<i>Задание 3</i> .....	50
<i>Задание 4</i> .....	53
Приложение 1.....	57
Библиографический список.....	58

## ВВЕДЕНИЕ

В нормальном режиме работа электрической системы характеризуется значениями напряжений в узловых точках сети и значениями токов, протекающих по её элементам и параметрами всех элементов системы. Состояние электрической системы, определяемое указанными величинами, называется *режимом и параметрами электрической системы*.

Процесс изменения режима системы и связанное с этим изменение количества энергии можно рассматривать как ряд процессов, каждый из которых отражает изменение определённой группы параметров режима одновременно во времени и пространстве (распространение волн напряжения вдоль длинных линий, кабелей или обмоток машин и трансформаторов).

При решении задачи переходного процесса выделяют два этапа: *первый* – расчет токов и напряжений в аварийном режиме (для выбора оборудования); *второй* – проверка устойчивой работы электрической системы (осуществимость режима). При этом на каждом этапе расчета обычно вводят ряд допущений, поскольку расчет с учетом всех условий и факторов практически невыполним. Допущения зависят от характера и постановки самой задачи и касаются преимущественно возможности использования упрощенных представлений об изменении свободных токов в сложных электрических схемах с несколькими источниками и в основном учитываются на первом этапе расчета. На втором этапе расчета учитываются все энергетические характеристики, т. е. баланс энергии.

Малые возмущения в системе (возникают при рабочих переключениях оборудования и нагрузок) не должны служить причиной её неустойчивости, поэтому система должна быть устойчивой в малом (обладать *статической устойчивостью*). Под статической устойчивостью понимают способность системы самостоятельно восстанавливать исходный режим при малом его нарушении.

Аварийные переходные процессы возникают вследствие каких-либо резких аварийных изменений параметров системы с последующим изменением параметров режима (изменение схемы соединения системы, отключение агрегатов и линий электропередачи, несущих значительные нагрузки, при коротких замыканиях в элементах системы и последующим их отключении).

Большие возмущающие воздействия на систему, появляющиеся при аварийных переходных процессах, приводят к значительным изменениям параметров режима – большим возмущениям. Способность системы восстанавливать после больших возмущений исходное состояние или состояние, практически близкое к исходному, называют *динамической устойчивостью*.

Следствием больших возмущающих воздействий на систему являются электромеханические переходные процессы, которые протекают настолько медленно (по сравнению с частотой 50 Гц), что вместо мгновенных значений параметров режима можно рассматривать изменение их огибающих и нарушение устойчивости. Более детально аварийные и нормальные переходные процессы можно классифицировать исходя из изменений основных параметров режима – изменений мощности и скорости вращения роторов электрических машин.

Целью расчетно-графической работы (РГР) является:

- закрепление и расширение теоретических знаний в области переходных режимов электрических систем, приобретение практических навыков анализа устойчивой работы электрических систем при больших возмущениях (аварийные режимы);
- развитие навыков самостоятельной работы с технической и справочной литературой при решении конкретной технической задачи.

Для работы над РГР студент получает конкретное индивидуальное задание. Работа над РГР предполагает выполнение определенной последовательности расчетных этапов (табл. 1).

При возникновении вопросов по работе над РГР студенты могут проконсультироваться у преподавателя. Ход работы над РГР контролируется преподавателем в отведенные для этого учебные часы.

Таблица 1

№ этапа	Выполняемая работа	Результат
1.	Анализ технического задания	Полное представление о содержании заданий по разделам РГР
2.	Подбор и анализ литературы по теме РГР	Обзор литературы, обоснование варианта решения задачи
3.	Проведение необходимых расчетов по теме РГР, в том числе с применением ПЭВМ	Результаты расчетов
4.	Окончательное оформление РГР в соответствии с требованиями ГОСТ ЕСКД – Единой системы конструкторской документации	Пояснительная записка с расчетами и графиками

Пояснительная записка (ПЗ) расчетно-графической работы должна иметь следующую структуру:

- титульный лист (приложение 1);
- индивидуальное задание;
- оглавление;
- основную часть;
- заключение;
- список использованной литературы;
- приложение.

*Основная часть.* В этом разделе излагаются результаты работы согласно заданию и результаты каждого этапа работы.

*Заключение.* В заключении студентом формулируются главные выводы по проведенной работе, показывающие уровень решения поставленной задачи.

*Список использованной литературы.* В список литературы, с указанием библиографических данных, включается литература по усмотрению автора пояснительной записки. Если в работе сделаны ссылки на научную информацию, позволяющую принять конкретное решение, включение в список литературы первоисточника обязательно.

В приложения выносятся все дополнительные материалы: пояснительные рисунки, графики, расчетные таблицы и чертежи, выполненные либо карандашом, либо на компьютере.

Текст пояснительной записки печатается через полтора интервала 14 кеглем на листах формата А4. Заголовки таблиц, названия схем можно пе-

чатать через один интервал. Абзацный отступ равен пяти знакам. Заголовки разделов ПЗ отделяются от текста сверху и снизу тремя интервалами. Текст печатается строчными буквами. Заглавными (прописными) буквами печатаются аббревиатуры, а также названия глав, слова «Введение» и «Заключение». Знаки, символы, обозначения, а также математические формулы могут быть набраны на компьютере или вписаны от руки пастой черного цвета.

Напечатанный текст должен иметь поля следующих размеров:

- верхнее и нижнее – 25 мм;
- правое – 10 мм;
- левое – 25 мм.

Разрешается использование рукописного текста, выполненного аккуратно, без исправлений, разборчивым почерком.

В тексте необходимо соблюдать соподчиненность разделов ПЗ и пунктов. Нумерация разделов ПЗ выполняется арабскими цифрами, которые отделяются от названий точкой. Номер параграфа состоит из цифры, обозначающей номер, и цифры, обозначающей его порядковый номер в составе главы, отделенных друг от друга точкой. Каждая глава пояснительной записки начинается с новой страницы.

Страницы пояснительной записки нумеруются от титульного листа до последнего, цифра 1 на титульном листе не ставится. Нумерация страниц выполняется арабскими цифрами сверху посередине. Приложения нумеруются арабскими цифрами (без значка №) и имеют названия.

Ориентировочный объем пояснительной записки 15 – 25 страниц.

# 1. Методические указания к практическим занятиям по расчету переходных режимов электроэнергетических систем

## 1.1. Расчет статической устойчивости электрических систем при нагрузке заданной постоянным сопротивлением

Под устойчивостью понимают способность системы возвращаться в исходное состояние после отклонения параметров режима. Статическая устойчивость это устойчивость при малых возмущениях без учета фактора времени (рабочие коммутации в электрической системе). Проблема устойчивости существует не только применительно ко всей системе электрообеспечения, но и к отдельно взятой нагрузке, поскольку последняя, при определенных условиях, также может быть неустойчивой.

При расчете устойчивости электрических систем по практическим критериям (как правило, это скорость изменения параметров режима или параметров системы не обязательно с привязкой ко времени) нагрузку часто представляют упрощенно в виде постоянного комплексного сопротивления, что позволяет всегда сбалансировать мощность нагрузки с мощностью генераторов. Однако 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 оценивается по практическому критерию  $\frac{dP}{d\delta_{12}} > 0$ , где  $P$  - активная мощность передающей станции;  $\delta_{12}$  - угол сдвига между векторами электродвижущей силы (ЭДС) генератора передающей станции и генератора местной станции.

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

$$K_{з.Р} = \frac{P_{max} - P_0}{P_0} \cdot 100 \%$$

Где  $P_{max}$  - максимальная мощность передающей станции;

$P_0$  - мощность передающей станции в исходном режиме.



При оценке статической устойчивости системы исходят из постоянства ЭДС генераторов, как передающей станции, так и генераторов местной станции, входящих в узел нагрузки. В относительных единицах (о.е.), эти ЭДС определяются по формуле:

$$E_i = \sqrt{\left(U + \frac{Q_{Hi} \cdot X_{Ci}}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_{Hi} \cdot X_{Ci}}{U}\right)^2} \quad (1)$$

где  $U$  - напряжение узловой точки системы, к которой подключена нагрузка, в относительных единицах;

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

$X_{Ci}$  - результирующее сопротивление цепи от точки приложения ЭДС соответствующего генератора до шин нагрузки, о.е.

Для расчета угловой характеристики активной мощности передающей станции используют формулу [1]:

$$P_{*1} = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_1 \cdot E_2}{Z_{12}} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) \quad (2)$$

где  $Z_{11}$  и  $Z_{12}$  - собственное и взаимное сопротивление передающей станции, соответственно, о.е.;

$\alpha_{11}$  и  $\alpha_{12}$  - углы потерь собственного и взаимного сопротивлений, соответственно.

Максимум характеристики (2) дает значение действительного предела мощности передающей станции, который достигается при условии:

$$\delta_{12} = \alpha_{12} + \arccos \left[ \frac{E_1}{E_2} \cdot \frac{Z_{12}}{Z_{11}} \cos \alpha_{11} \right] \quad (3)$$

или  $\alpha_{11} = 90^\circ$ .

Из рассмотрения выражений (2) и (3) следует, что при представлении нагрузки неизменным комплексным сопротивлением, не обязательно учитывать характер изменения напряжения на ее шинах. Отметим, что в соответствии с выражением (2) влияние нагрузки на действительный пре-

дел передаваемой мощности проявляется через параметры собственного  $Z_{11}$  и взаимного  $Z_{12}$  сопротивлений.

В этом случае выражение угловой характеристики местной станции записывается аналогично, но в предположении, что при увеличении мощности передающей станции мощность местной станции уменьшается. Поэтому угол потерь взаимного сопротивления  $\alpha_{12}$  записывается со знаком «плюс».

$$P_{*2} = \frac{E_2^2}{Z_{22}} \sin \alpha_{22} - \frac{E_1 \cdot E_2}{Z_{12}} \sin(\delta_{12} + \alpha_{12}) \quad (2.a)$$

В соответствии с выражениями (2) максимум угловой характеристики передающей станции наступает при угле  $90^\circ - \alpha_{12}$ , минимум угловой характеристики местной станции наступает при угле  $90^\circ + \alpha_{12}$ . Таким образом, расхождение между максимумом угловой характеристики передающей станции и минимумом угловой характеристики местной станции составляет  $2\alpha_{12}$ . Отметим, в случае замены местной станции шинами бесконечно большой мощности предел мощности и предел устойчивости совпадут, поэтому в системе двух станций имеется возможность работы на пределе мощности без потери устойчивости при малых толчках нагрузки.

Для простейшей электропередачи, передающая сторона которой представлена генератором Г1 и трансформатором Т1, а приемная – местной станцией Г2, трансформатором Т2 и нагрузкой Н, схема которой показана на рис. 1.а, собственное и взаимное сопротивления простейшей Т-образной схемы замещения (рис. 1.б) определяется по формулам:

$$\underline{Z}_{11} = jX_{C1} + \frac{jX_{C2} \cdot \underline{Z}_H}{jX_{C2} + \underline{Z}_H}; \quad \underline{Z}_{12} = j(X_{C1} + X_{C2}) + \frac{jX_{C1} \cdot jX_{C2}}{\underline{Z}_H}. \quad (4)$$

где  $\underline{Z}_H$  - сопротивление нагрузки в относительных единицах (о.е.).

Полное комплексное сопротивление нагрузки, с учетом рекомендаций [1], при известных значениях напряжения  $U$ , полной мощности нагрузки  $S_{\text{нагр}}$  и  $\cos \varphi_{\text{нагр}}$  можно определить по формуле:

$$\underline{Z}_H = \frac{U^2}{S_{\text{нагр}}} (\cos \varphi_{\text{нагр}} + j \sin \varphi_{\text{нагр}}) \quad (5)$$

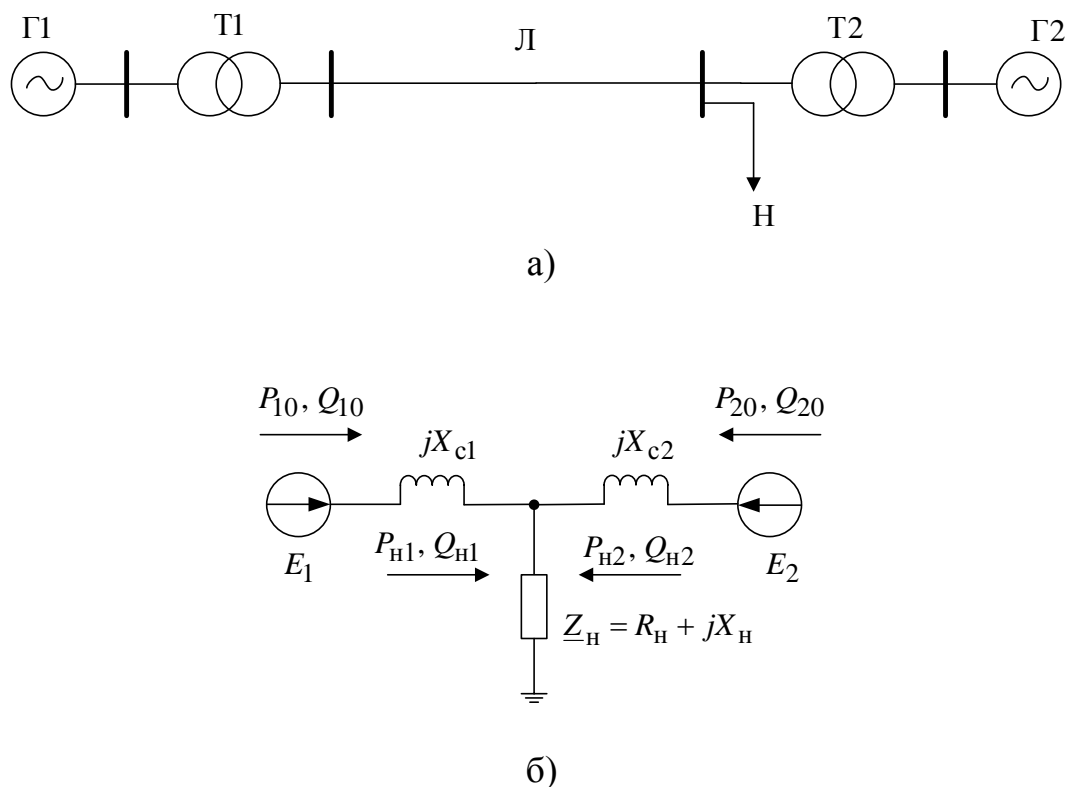


Рис.1. Исследуемая схема простейшей электропередачи: а) – принципиальная схема электропередачи; б) – Т-образная схема замещения в случае представления нагрузки постоянным сопротивлением.

## 1.2. Расчет статической устойчивости и электрических систем при нагрузке, заданной статическими характеристиками

Статические характеристики комплексной нагрузки представляют собой зависимости активной и реактивной мощности потребителей, входящих в состав нагрузки от напряжения на шинах нагрузки (рис. 2) в относительных единицах. При учете нагрузки статическими характеристиками расчет существенно усложняется, но качественная картина не изменится.

Для оценки статической устойчивости системы в случае нагрузки, заданной статическими характеристиками, целесообразно использовать

практический критерий  $\frac{dP}{dU} > -\infty$ .

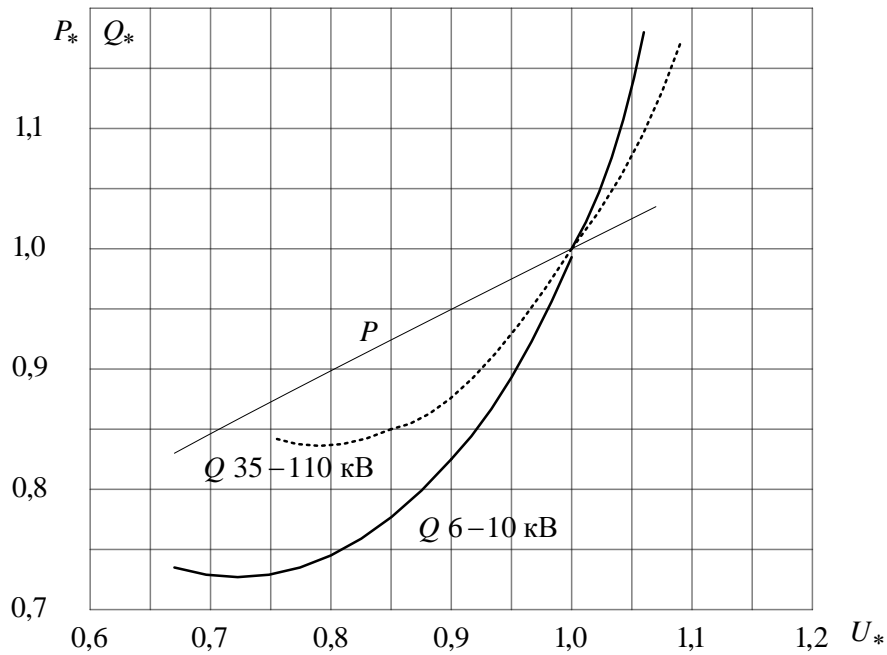


Рис. 2. Статические характеристики комплексной нагрузки.

В этом случае решается задача определения максимума зависимости  $P = f(U)$  при фиксированных значениях Э.Д.С. генераторов, и так как распределение мощностей от источников в нагрузку при изменении напряжения на ее шинах заранее неизвестно, то искомую зависимость находят расчетом по следующему алгоритму:

1. Задаются несколько уменьшенным значением мощностей  $P_{20}$  и  $Q_{20}$  относительно их значений в исходном режиме;
2. Рассчитывают потери  $\Delta Q_{C2}$  в реактивности  $X_{C2}$  и напряжение на шинах нагрузки по формулам:

$$\Delta Q_{C2} = \frac{X_{C2}(P_{20}^2 + Q_{20}^2)}{E_{20}^2}, \quad (6)$$

$$U = \sqrt{\left(E_{20} - \frac{Q_{20} \cdot X_{C2}}{E_{20}}\right)^2 + \left(\frac{P_{20} \cdot X_{C2}}{E_{20}}\right)^2}. \quad (7)$$

3. По статическим характеристикам рис. 2 определяют, с учетом значения  $U$ , в соответствии с выражением (7), активные и реактивные мощности в о.е.:  $P_{\text{нагр}}(U)$ ;  $Q_{\text{нагр}}(U)$ ;

$$P_{H1}(U) = P_{нагр}(U) - P_{20}; \quad Q_{H1}(U) = Q_{нагр}(U) - Q_{H2}. \quad (8)$$

4. По формуле (1) определяют значение ЭДС  $E_1$ .

5. Не меняя значения  $P_{20}$ , задаются новым значением  $Q_{20}$  и рассчитывают очередное значение  $E_1$  с целью получения зависимости  $E_1 = f(U)$ , общий вид которой показан на рис. 3. Отметим, что искомому решению соответствует точка 1 на характеристике с положительной производной.

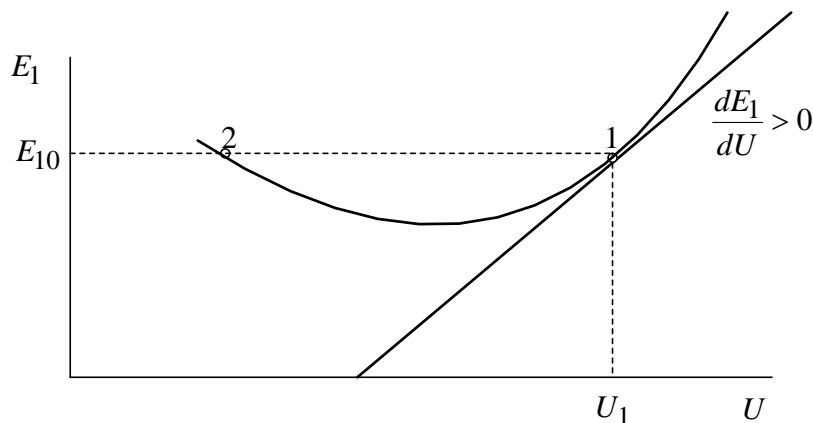


Рис. 3. График зависимости ЭДС генератора Г1 от напряжения на шинах нагрузки.

6. По значению напряжения  $U_1$  для точки 1 на рис. 3 определяют по графикам рис. 2 значение  $P_{нагр}(U)$  в о.е. и вторую точку зависимости  $P_{H1}(U)$ .

7. Задаваясь новым уменьшенным значением  $P_{20}$ , находят следующую точку характеристики  $P_{H1}(U)$  по вышеприведенному алгоритму.

Расчет ведут до тех пор, пока не будет найден  $P_{H1 \max}$ , являющийся действительным пределом мощности.

### 1.2.1. Примеры решения задач

**Пример 1.** Для электрической системы, схема которой приведена на рис. 4, при известных параметрах элементов системы и заданных параметрах исходного режима требуется определить:

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

Номинальные характеристики элементов простейшей электрической системы рис. 4 и заданные параметры исходного режима приведены в таблице 1.

Таблица 1

Передающая станция	Линия электропередачи	Приемная система
Генератор Г1 $P_H = 50 \text{ МВт};$ $X_d = 1,2; \dot{X}_d = 0,3; \cos \varphi = 0,8;$	Двухцепная ВЛ-110 кВ; $l = 104 \text{ км}$	Генератор Г2 $P_H = 130 \text{ МВт};$ $X_d = 1,5; \cos \varphi = 0,85;$
Трансформатор Т1 $S_H = 63 \text{ МВт}; U_k = 10,5 \%;$ Коэффициент трансформации $K_T = 110/13,8$		Трансформатор Т2 $S_H = 160 \text{ МВт}; U_k = 12 \%;$ Коэффициент трансформации $K_T = 115/10,5$
		Нагрузка Н $P_H = 150 \text{ МВт}; \cos \varphi = 0,8;$ $P_{H1} = 50 \text{ МВт}; \cos \varphi = 0,8;$

1. **Решение 1.** Расчет коэффициента запаса статической устойчивости по идеальному пределу мощности;

Известно [2], что при расчете коэффициента запаса  $K_{3,P}$  по идеальному пределу мощности принимают, что генератор Г1 отдает мощность в приемную систему несоизмеримо большей мощности. При этих условиях напряжение на шинах нагрузки неизменно по величине и фазе при любых режимах электропередачи, а схема замещения имеет вид, показанный на рис. 5.

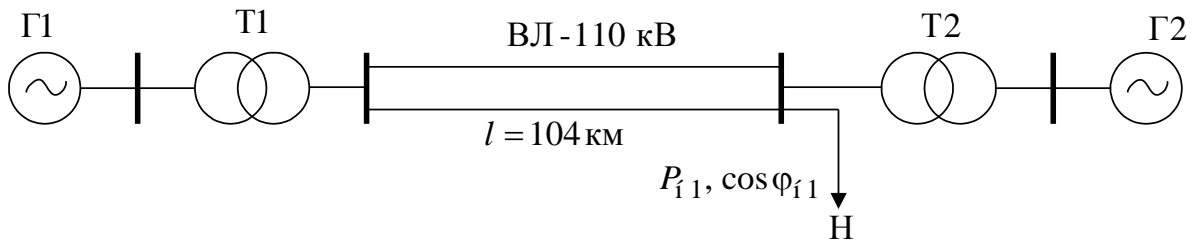


Рис. 4. Расчетная схема электрической системы примера 1.

2. **Решение 1.1.** Расчет коэффициента запаса статической устойчивости по идеальному пределу мощности;

Известно [2], что при расчете коэффициента запаса  $K_{з.р}$  по идеальному пределу мощности принимают, что генератор Г1 отдает мощность в приемную систему несоизмеримо большей мощности. При этих условиях напряжение на шинах нагрузки неизменно по величине и фазе при любых режимах электропередачи, а схема замещения имеет вид, показанный на рис. 5.

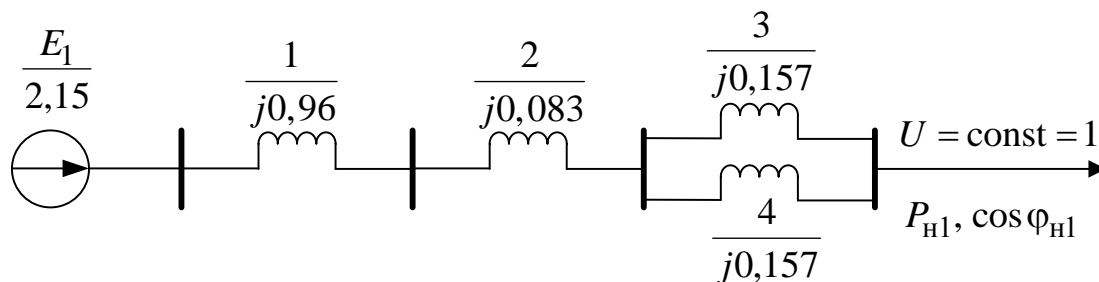


Рис. 5. Схема замещения электрической системы примера 1.

Параметры схемы замещения электрической системы и исходного режима определим в относительных единицах при базисных условиях:

$$S_6 = 50 \text{ МВ} \cdot \text{А}; \quad U_6 = 115 \text{ кВ}.$$

Расчетные реактивности элементов схемы замещения рис. 5:

$$X_1 = X_d \frac{S_6}{S_{H,\Gamma}} = 1,2 \frac{50 \cdot 0,8}{50} = 0,96, \quad \text{где } S_{H,\Gamma} = \frac{P_H}{\cos \varphi};$$

$$X_2 = \frac{U_{к\%}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{10,5 \cdot 50}{100 \cdot 63} = 0,083;$$

$$X_3 = X_4 = X_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{6 \text{ ст.тр}}^2} = 0,4 \cdot 104 \cdot \frac{50}{115^2} = 0,157,$$

где  $X_0 = 0,4 \text{ Ом} \cdot \text{км}$ .

$U_{6 \text{ ст.тр}} = 115 \text{ кВ}$  – базисное напряжение ступени трансформации;

$$U_* = \frac{U}{U_6} = \frac{115}{115} = 1; \quad P_{*H1} = \frac{P_{H1}}{S_6} = \frac{50}{50} = 1;$$

$$Q_{*H1} = P_{*H1} \cdot \text{tg}\varphi = 1 \cdot 0,75 = 0,75,$$

где  $\text{tg}\varphi = \text{tg arccos} 0,8 = 0,75$ .

Значение сопротивления электропередачи от передающей станции до шин нагрузки:

$$X_{C1} = X_1 + X_2 + \frac{X_3 \cdot X_4}{X_3 + X_4} = 0,96 + 0,083 + 0,5 \cdot 0,157 = 1,12.$$

Тогда значение ЭДС генераторов передающей станции согласно выражения (1) будет:

$$\begin{aligned} E_i &= \sqrt{\left(U + \frac{Q_{Hi} \cdot X_{Ci}}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_{Hi} \cdot X_{Ci}}{U}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(1 + \frac{0,75 \cdot 1,12}{1}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 1,12}{1}\right)^2} = 2,15. \end{aligned}$$

Максимум активной мощности  $P_{\text{max}}$ , выдаваемой генератором Г1, может быть назван идеальным пределом мощности рассматриваемой простейшей системы при  $\sin \delta = 1$ , определяется по формуле:



$$P_{\max} = \max \left| \frac{E_1 \cdot U}{X_{C1}} \sin \delta \right| = \max \left| \frac{2,15 \cdot 1}{1,12} \sin \delta \right| = 1,92.$$

С учетом значения  $P_{\max}$  коэффициент запаса статической устойчивости по идеальному пределу активной мощности найдем по выражению:

$$K_{з.р} = \frac{P_{\max} - P_0}{P_0} \cdot 100 \% = \frac{1,92 - 1}{1} \cdot 100 \% = 92\%.$$

**Решение 2.** Расчет коэффициента запаса статической устойчивости по действительному пределу мощности при представлении нагрузки неизменным комплексным сопротивлением и построение угловой характеристики активной мощности передающей станции.

Схема замещения электропередачи для расчета коэффициента запаса  $K_{з.р}$  по действительному пределу мощности показана на рис. 6 при нагрузке, заданной постоянным сопротивлением.

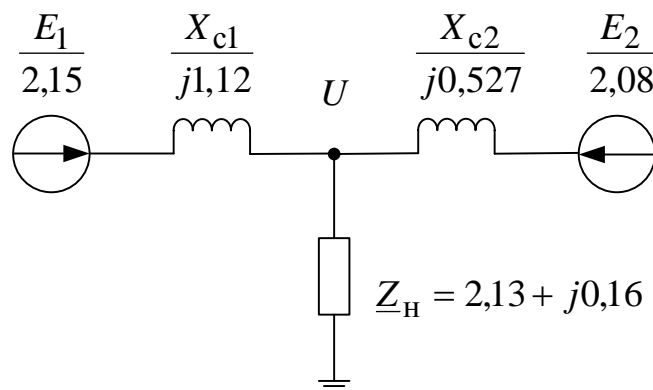


Рис. 6. Схема замещения электрической системы для расчета коэффициента запаса  $K_{з.р}$  по действительному пределу мощности.

Значение сопротивления электропередачи от местной станции (Г2, Т2) до шин нагрузки:

$$\underline{X}_{C2} = jX_5 + jX_6,$$

$$\text{где } X_5 = \frac{U_k \% \cdot S_6}{100 S_H} = \frac{12 \cdot 50}{100 \cdot 100} = 0,0375; \quad X_6 = X_d \frac{S_6 \cos \varphi}{P_H} = 1,5 \frac{50 \cdot 0,85}{130} = 0,49.$$

Тогда  $\underline{X}_{C2} = jX_5 + jX_6 = j0,0375 + j0,49 = j0,527$ .

Полное комплексное сопротивление нагрузки определим с учетом выражения (5):

$$\begin{aligned} \underline{Z}_H &= \frac{U^2}{S_{*нагр}} (\cos \varphi_{нагр} + j \sin \varphi_{нагр}) = \\ &= \frac{U^2 \cos \varphi_{нагр} S_6}{P_H} (\cos \varphi_{нагр} + j \sin(\cos^{-1} 0,8)) = \\ &= \frac{1^2 \cdot 0,8 \cdot 50}{150} (0,8 + j \sin(\cos^{-1} 0,8)) = 0,213 + j0,16, \end{aligned}$$

где

$$S_{*нагр} = \frac{P_H}{S_6} \cos \varphi_{нагр} = \frac{150}{0,8 \cdot 50} = 3,75.$$

Мощность, поступающая от местной станции (генератор Г2) в нагрузку:

$$S_{*H2} = P_{*H} + jQ_{*H} - P_{*H1} - jQ_{*H1} = 3 + j2,25 - 1 - j0,75 = P_{H2} + jQ_{H2},$$

где

$$P_{*H} = \frac{P_H}{S_6} = \frac{150}{50} = 3, \quad Q_{*H} = P_{*H} \operatorname{tg} \varphi = 3 \cdot 0,75 = 2,25.$$

ЭДС генератора местной станции Г2 согласно (1) будет:

$$\begin{aligned} E_2 &= \sqrt{\left( U + \frac{Q_{H2} \cdot X_{C2}}{U} \right)^2 + \left( \frac{P_{H2} \cdot X_{C2}}{U} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left( 1 + \frac{1,5 \cdot 0,527}{1} \right)^2 + \left( \frac{2 \cdot 0,527}{1} \right)^2} = 2,075. \end{aligned}$$

Собственные и взаимные сопротивления согласно (4) будут:

$$\underline{Z}_{11} = jX_{C1} + \frac{jX_{C2} \cdot \underline{Z}_H}{jX_{C2} + \underline{Z}_H} = j1,12 + \frac{j0,527(0,213 + j0,16)}{j0,527 + 0,213 + j0,16} = 1,28e^{j84,9^\circ};$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{12} &= j(X_{C1} + X_{C2}) + \frac{jX_{C1} \cdot jX_{C2}}{\underline{Z}_H} = \\ &= j(1,12 + 0,527) + \frac{j^2 1,12 \cdot 0,527}{0,213 + j0,16} = 3,46e^{j120,74^\circ}. \end{aligned}$$

Фазные углы собственного и взаимного сопротивлений:

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

Углы потерь собственного и взаимного сопротивлений согласно [1]:

$$\alpha_{11} = 90^\circ - \varphi_{11} = 90^\circ - 84,9^\circ = 5,1^\circ;$$

$$\alpha_{12} = 90^\circ - \varphi_{12} = 90^\circ - 120,74^\circ = -30,74^\circ.$$

Угловая характеристика мощности генератора Г1 согласно (2):

$$\begin{aligned} P_{*1} &= \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_1 \cdot E_2}{Z_{12}} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) = \frac{2,15 \cdot 2,075}{3,46} \sin(\delta_{12} + 30,74^\circ) = \\ &= 0,32 + 1,29 \cdot \sin(\delta_{12} + 30,74^\circ). \end{aligned}$$

Значения активной мощности  $P_{*1}$ , вычисленные при различных значениях  $\delta_{12}$  приведены в табл. 2, а угловая характеристика мощности генератора Г1 в соответствии с этими данными показана на рис. 7.

Максимум угловой характеристики мощности в соответствии с выражением (2) дает значение действительного предела мощности:

$$P_{max} = 0,32 + 1,29 = 1,61.$$

Таблица 2

$\delta_{12}$	$-30,74^\circ$	$0^\circ$	$30^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$150^\circ$
$P_{*1}$	0,32	0,98	1,44	1,6	1,43	0,95	0,3

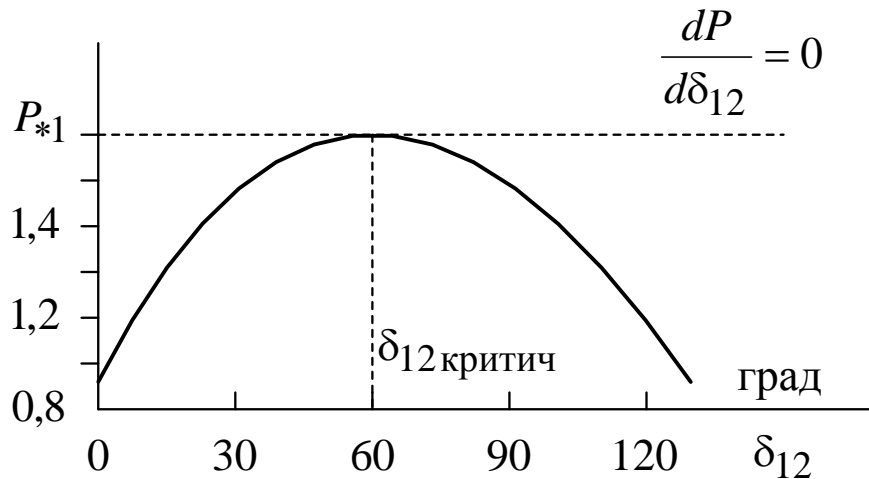


Рис. 7. Угловая характеристика мощности генератора Г1.

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

$$K_{з.р} = \frac{P_{max} - P_{н1}}{P_{н1}} \cdot 100 \% = \frac{1,61 - 1}{1} 100\% = 61\%.$$

Из сравнения значений коэффициентов запаса статической устойчивости по идеальному и действительному пределам мощности видно, что снижение напряжения на шинах нагрузки уменьшает запас статической устойчивости системы.

**Решение 3.** Расчет действительного предела статической устойчивости системы, при нагрузке, заданной статическими характеристиками.

Обычно расчет начинают с определения параметров исходного режима при  $U = 1$ ,  $P_{20} = P_{2н} = 2,0$  и потерь реактивной мощности в реактивности  $X_{с2}$ :

$$\Delta Q_{C2} = \frac{P_{H2}^2 + Q_{C2}^2}{U^2} X_{C2} = \frac{2^2 + 1,5^2}{1^2} 0,527 = 3,29.$$

Тогда

$$Q_{20} = Q_{H2} + Q_{C2} = 1,5 + 3,29 = 4,79.$$

Схема замещения рассматриваемой электропередачи для этого случая приведена на рис. 8.

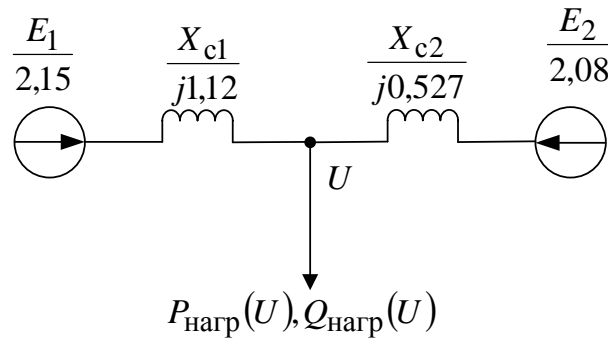


Рис. 8. Схема замещения электропередачи при нагрузке, заданной статическими характеристиками.

Дальнейшие расчеты проводят в соответствии с алгоритмом раздела 1.2.

Задаемся новыми несколько меньшими значениями  $P_{20} = 1,8$ ;  $Q_{20} = 4,7$  и по формулам (6) и (7) рассчитываем  $\Delta Q_{C2}$  и  $U$ :

$$\Delta Q_{C2} = \frac{X_{C2}(P_{20}^2 + Q_{20}^2)}{E_{20}^2} = \frac{0,527 \cdot (1,8^2 + 4,7^2)}{2,08^2} = 3,08;$$

$$U = \sqrt{\left(E_{20} - \frac{Q_{20} \cdot X_{C2}}{E_{20}}\right)^2 + \left(\frac{P_{20} \cdot X_{C2}}{E_{20}}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(2,08 - \frac{4,7 \cdot 0,527}{2,08}\right)^2 + \left(\frac{1,8 \cdot 0,527}{2,08}\right)^2} = 0,999.$$

По статическим характеристикам (графики рис. 2) для  $U = 0,999$  находим  $P_{\text{нагр}}(U) = 3$ ;  $Q_{\text{нагр}}(U) = 2,25$ . Отметим, что для конкретного примера цифре 1 на шкале мощности рис.2 соответствует цифра 3, так как в относительных единицах значение  $P_{*H} = 3$  при  $U_* = 1$ .

Из условия баланса мощностей в узле нагрузки имеем:

$$P_{H1} = P_{\text{нагр}}(U) - P_{H2} = 3 - 1,8 = 1,2;$$

$$Q_{H1} = Q_{\text{нагр}}(U) - (Q_{20} - \Delta Q_{C2}) = 2,25 - (4,7 - 3,08) = 0,63.$$

Тогда значение ЭДС генератора Г1:

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{\left(U + \frac{Q_{H1} \cdot X_{C1}}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_{H1} \cdot X_{C1}}{U}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(0,999 + \frac{0,63 \cdot 1,12}{0,999}\right)^2 + \left(\frac{1,2 \cdot 1,12}{0,999}\right)^2} = 2,18, \end{aligned}$$

Полученное значение ЭДС больше исходного значения  $E_{10} = 2,15$ .

Далее, сохраняя значение  $P_{20} = 1,8$ , задаемся несколько увеличенным значением  $Q_{20} = 4,8$  по сравнению с его значением в исходном режиме. После соответствующих расчетов получим значение  $E_1 = 2,1$ , что меньше исходного значения  $E_{10} = 2,15$ . При этом напряжение на шинах нагрузки  $U = 0,985$ , что соответствует устойчивой области (вблизи точки 1 на рис. 2), т.е. режим соответствует.

По графикам статических характеристик нагрузки (рис. 2) определяем значения мощностей  $P_{\text{нагр}}(U) = 2,97$  при вычисленном значении напряжения  $U = 0,985$  и  $P_{H1} = P_{\text{нагр}}(U) - P_{20} = 2,97 - 1,8 = 1,17$ . При этом, полученное значение  $P_{\text{нагр}}(U)$  будет второй точкой искомой характеристики  $P_{H1} = f(U)$ .

Выполняя аналогичные расчеты для новых значений  $P_{20}$  и  $Q_{20}$  получим следующие точки искомой характеристики. Результаты расчета приведены в табл. 3. Режим осуществим если исходное значение Э.Д.С находится внутри диапазона получаемых значений при приращении мощностей. В последних двух случаях (см. табл. 3) режим не существует, так как

оба значения ЭДС генератора передающей станции  $E_1$  больше исходного значения  $E_{10} = 2,15$ .

Таблица 3

№ эта- па рас- чета	$\frac{P_{20}}{Q_{20}}$	$\frac{\Delta Q_{C2}}{Q_{H2}}$	$U$	$\frac{P_{\text{нагр}}(U)}{Q_{\text{нагр}}(U)}$	$\frac{P_{H1}}{Q_{H1}}$	$E_1$	$U$	$\frac{P_{\text{нагр}}(U)}{P_{H1}}$
1	$\frac{2,0}{4,79}$	$\frac{3,29}{1,5}$	1	$\frac{3,0}{2,25}$	$\frac{1}{0,75}$	<b>2,15</b>	1	$\frac{3,0}{1}$
2	$\frac{1,8}{4,7}$	$\frac{3,08}{1,62}$	0,999	$\frac{3,0}{2,25}$	$\frac{1,2}{0,63}$	2,18	} 0,985	$\frac{2,97}{1,17}$
	$\frac{1,8}{4,8}$	$\frac{3,2}{1,6}$	0,977	$\frac{2,94}{2,18}$	$\frac{1,14}{0,58}$	2,1		
3	$\frac{1,6}{4,5}$	$\frac{2,78}{1,72}$	1,02	$\frac{3,0}{2,25}$	$\frac{1,4}{0,53}$	2,22	} 0,975	$\frac{2,95}{1,35}$
	$\frac{1,6}{5}$	$\frac{3,36}{1,64}$	0,909	$\frac{2,84}{1,98}$	$\frac{1,24}{0,34}$	2,03		
4	$\frac{1,4}{4,6}$	$\frac{2,82}{1,78}$	0,98	$\frac{2,56}{2,18}$	$\frac{1,56}{0,4}$	2,23	} 0,9	$\frac{2,81}{1,41}$
	$\frac{1,4}{5}$	$\frac{3,28}{1,72}$	0,889	$\frac{2,8}{1,97}$	$\frac{1,5}{0,25}$	2,13		
5	$\frac{1,3}{4,5}$	$\frac{2,67}{1,83}$	0,996	$\frac{2,98}{2,23}$	$\frac{1,68}{0,4}$	2,38	} решения не существует (значения обеих Э.Д.С. больше ис- ходного равного 2,15)	
	$\frac{1,3}{5}$	$\frac{3,25}{1,75}$	0,877	$\frac{2,8}{1,97}$	$\frac{1,5}{0,22}$	2,22		
6	$\frac{1,35}{4,5}$	$\frac{2,69}{1,81}$	1,0	$\frac{3,0}{2,25}$	$\frac{1,65}{0,44}$	2,37	} решения не существует (значения обеих Э.Д.С. больше ис- ходного равного 2,15)	
	$\frac{1,35}{5}$	$\frac{3,27}{1,73}$	0,882	$\frac{2,79}{1,79}$	$\frac{1,44}{0,24}$	2,18		

По определению действительный предел статической устойчивости системы в случае нагрузки, заданной статическими характеристиками, определяется максимальным значением мощности  $P_{H1}$  передаваемой от генератора Г1 передающей станции нагрузке при условии постоянства его ЭДС. Этому условию соответствует расчет этапа №4 из табл. 3. Тогда,

принимая  $P_{H1\max} \cong 1,41$ , получим расчетное значение коэффициента запаса:

$$K_{з.Р} = \frac{P_{H1\max} - P_{H1}}{P_{H1}} \cdot 100\% = \frac{1,41 - 1}{1} 100\% = 41\%.$$

Анализ результатов расчета всех трех задач примера 1 позволяет сделать вывод о том, что учет нагрузки по статическим характеристикам дает значение действительного предела статической устойчивости, наиболее близкого к истинному.

### 1.3. Расчет статической устойчивости нагрузки, заданной статическими характеристиками.

В этом случае для оценки статической устойчивости комплексной нагрузки целесообразно использовать практические критерии

$$\frac{dE_{\text{Э}}}{dU} > 0 \quad \text{и} \quad \frac{dQ_{\text{Э}}}{dE_{\text{Э}}} > -\infty.$$

При использовании критерия  $\frac{dE_{\text{Э}}}{dU} > 0$  целесообразно построить графики зависимости  $E_{\text{Э}} = f(U)$ , задаваясь рядом значений напряжения  $U$ , для каждого из которых по статическим характеристикам нагрузки (рис. 2) определяют соответствующие значения  $P_*$  и  $Q_*$  в относительных единицах и вычисляют значение  $E_{\text{Э}}$  по формуле:

$$E_{\text{Э}} = \sqrt{\left(U + \frac{Q_{H_{\text{Э}} \cdot X_{C1}}}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_{H_{\text{Э}} \cdot X_{C1}}}{U}\right)^2}. \quad (9)$$

Коэффициент запаса статической устойчивости нагрузки в исходном режиме можно определить по выражению:

$$K_{з.U} = \frac{U_0 - U_{к.р}}{U_0} 100\% \quad (10)$$

где  $U_0$  – напряжение на шинах нагрузки в исходном режиме, о.е.;

$U_{к.р}$  – значение напряжения, при котором нагрузка теряет устойчивость (*критическое напряжение*), о.е.



Практически допустимые пределы изменения напряжения устанавливаются непосредственно из графика  $E_{\Sigma} = f(U)$ .

При составлении схемы замещения генератора без автоматической регулировки возбуждения (АРВ), для расчета статической устойчивости нагрузки, вводят в нее синхронную Э.Д.С.  $E$  за синхронной реактивностью, генераторы с АРВ пропорционального действия моделируют переходной Э.Д.С.  $\dot{E}$  за переходной реактивностью, генераторы с АРВ сильного действия – напряжением на шинах генератора  $U_{\Gamma}$  за сверхпереходной реактивностью.

Отметим, что оба рассматриваемые критерия в принципе равноценны. Однако критерий  $\frac{dE_{\Sigma}}{dU} > 0$  более целесообразно связывать с «лавиной снижения напряжения», обуславливающий нарушения статической устойчивости симметричных схем при снижении напряжения на шинах нагрузки. Вторым критерий  $\frac{dQ_{\Sigma}}{dE_{\Sigma}} > -\infty$  используют в случае установления связи между напряжением на шинах нагрузки и балансом реактивной мощности.

Эквивалентная реактивная мощность  $Q_{\Sigma}$ , выдаваемая эквивалентной станцией с учетом потерь реактивной мощности в сети  $\Delta Q$ , определяется по формуле:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{нагр}} + \Delta Q = Q_{\text{нагр}} + (P_{\text{нагр}}^2 + Q_{\text{нагр}}^2) X_{c1} / U^2. \quad (11)$$

Запас устойчивости узла нагрузки по эквивалентной Э.Д.С.  $E_{\Sigma}$  может быть определен по соотношению:

$$K_{3.E} = \frac{E_0 - E_{\text{кр}}}{E_0} 100\%, \quad (12)$$

где  $E_0$  – Э.Д.С. генераторов эквивалентной станции в исходном режиме, о.е.;

$E_{\text{кр}}$  – критическая Э.Д.С., при которой нагрузка теряет устойчивость, о.е.

**ПРИМЕР 2.** Задана схема электропередачи (см. рис. 9) исходный режим и параметры элементов которой повторяют данные примера 1. Приемная система представлена системой неограниченной мощности и нагрузкой заданной статическими характеристиками.

- Параметры нагрузки Н:  $P_{\text{нагр}} = 50$  МВт;  $\cos\varphi = 0,8$ .

Проверить устойчивость нагрузки, построив зависимости  $E_{\Sigma} = f(U)$  и  $Q_{\Sigma} = f(E_{\Sigma})$  после отключения выключателя В при условии:

- 1) на генераторе отсутствует АРВ;
- 2) на генераторе установлено АРВ пропорционального действия.

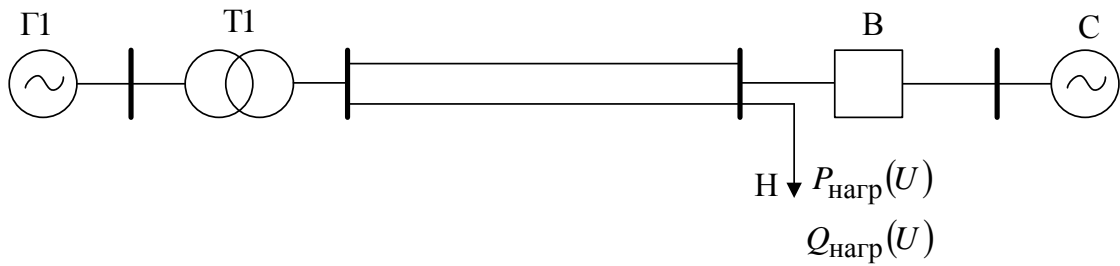


Рис. 9. Схема электропередачи примера 2.

**Решение 2.1:**

- 1) На генераторе отсутствует АРВ.

Принимая базисные условия примера 1 получим схему замещения исходного режима для этого случая

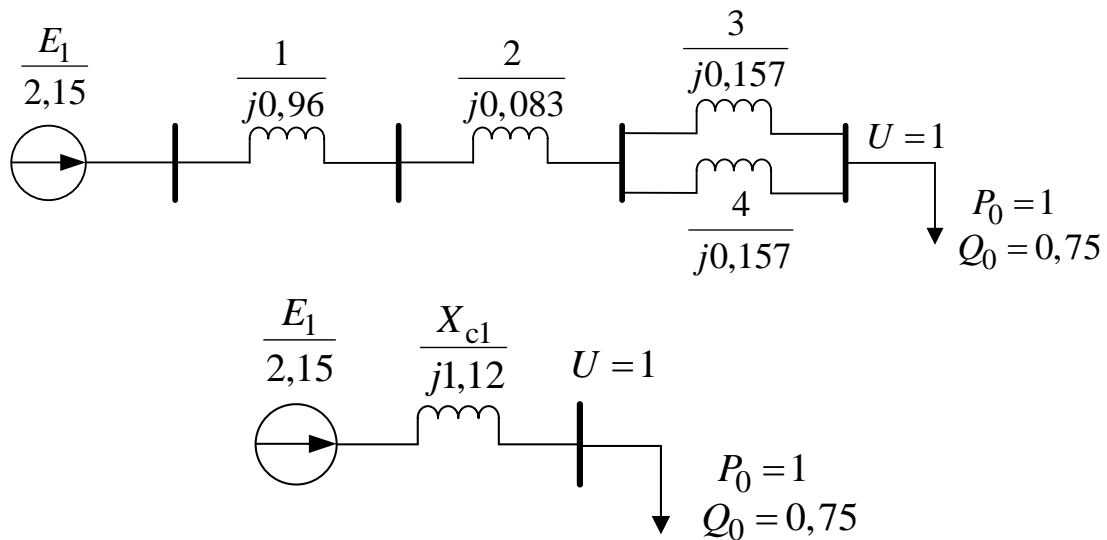


Рис. 10. Схемы замещения исходного режима: а) - полная; б) - преобразованная.

Из условий примера 1 выбираем параметры исходного режима  $U = 1$ ;  $E_3 = E_1 = 2,15$ . Далее, задаваясь другими значениями напряжения на нагрузке, определим для каждого из них по статическим характеристикам нагрузки (рис. 2) соответствующие значения активной и реактивной мощности нагрузки. Например, при  $U = 0,95$  получим  $P_{*нагр.э} = P_0 \cdot 0,96 = 0,96$ ;

$Q_{*нагр.э} = Q_0 \cdot 0,93 = 0,6975$ . При этом значение эквивалентной ЭДС  $E_э$  генератора передающей станции согласно (9) равно:

$$E_э = \sqrt{\left(U + \frac{Q_{нагр.э} \cdot X_{C1}}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_{нагр.э} \cdot X_{C1}}{U}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(0,95 + \frac{0,6975 \cdot 1,12}{0,95}\right)^2 + \left(\frac{0,96 \cdot 1,12}{0,95}\right)^2} = 2,10286.$$

Эквивалентная реактивная мощность генератора передающей станции Г1 в исходном режиме рассчитывается по формуле (11).

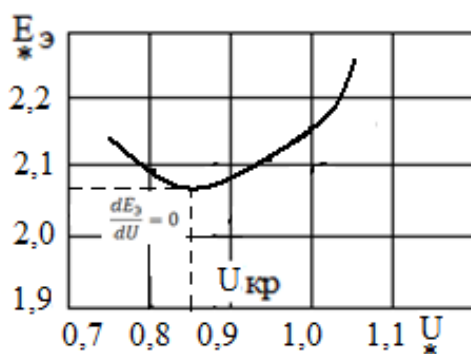
$$Q_э = Q_{нагр} + \Delta Q = Q_{нагр} + (P_{нагр}^2 + Q_{нагр}^2) X_{C1} / U^2 =$$

$$= 0,75 + \frac{1^2 + 0,75^2}{1^2} \cdot 1,12 = 2,5.$$

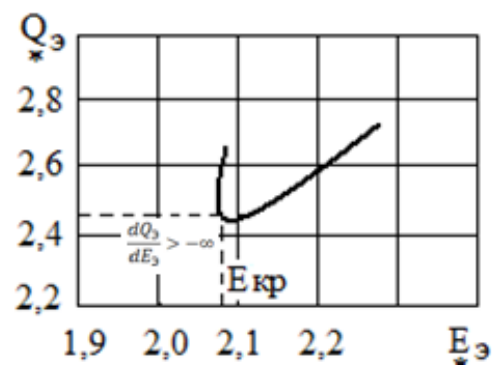
Значения эквивалентных ЭДС  $E_э$  и реактивной мощности  $Q_э$  при других значениях напряжения приведены в табл. 4, а графики зависимостей  $E_э = f(U)$  и  $Q_э = f(E_э)$  показаны на рис. 11.

Таблица 4

$U$	1,05	1,0	0,95	0,90	0,85	0,8	0,75
$E_э$	2,24	2,15	2,108	2,085	2,08	2,098	2,13
$Q$	2,576	2,5	2,47	2,49	2,59	2,73	2,96



а)



б)

Рис. 11. Графики зависимости: а) –  $E_э = f(U)$ , б) –  $Q_э = f(E_э)$  примера 2.

По результатам расчета определим коэффициенты запаса статической устойчивости нагрузки в соответствии с формулами (1-) и (12):

$$K_{з.U} = \frac{U_0 - U_{к.р}}{U_0} 100\% = \frac{1 - 0,85}{1} 100\% = 15\%;$$

$$K_{з.E} = \frac{E_0 - E_{к.р}}{E_0} 100\% = \frac{2,15 - 2,08}{2,15} 100\% = 3,25\%.$$

**Решение 2.2.** На генераторе установлено АРВ пропорционально действия.

В отличие от предыдущего случая суммарное сопротивление электропередачи  $\dot{X}_C$  определяется с учетом переходной реактивности генератора  $\dot{X}_d$ , т.е.

$$\dot{X}_C = \dot{X}_d \frac{S_6 \cos \varphi}{P_H} + X_2 + \frac{X_3 \cdot X_4}{X_3 + X_4} = 0,3 \frac{50 \cdot 0,8}{50} + 0,083 + 0,5 \cdot 0,157 = 0,4.$$

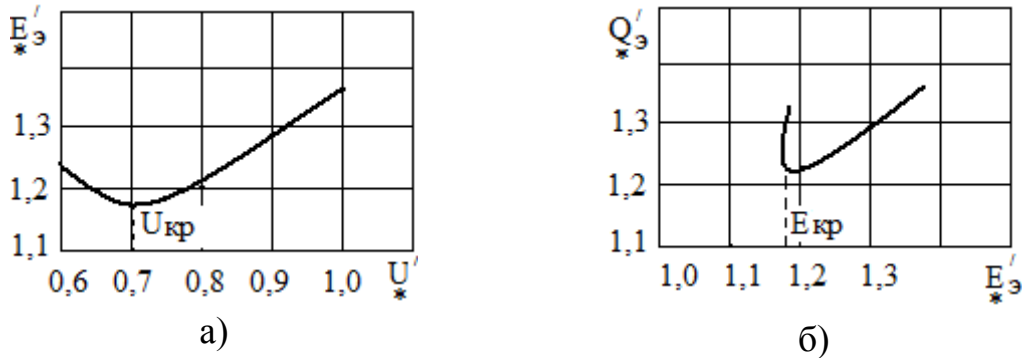
Расчет значений  $\dot{E}_Э$  и  $\dot{Q}_Э$  при различных величинах напряжения на шинах нагрузки аналогичны предыдущему расчету. Результаты расчета представлены в табл. 5, а зависимости  $\dot{E}_Э = f(U)$  и  $\dot{Q}_Э = f(E_Э)$  на рис. 12.

$$\begin{aligned} \dot{E}_Э &= \sqrt{\left( U + \frac{Q_{\text{нагрэ}} \cdot \dot{X}_C}{U} \right)^2 + \left( \frac{P_{\text{нагрэ}} \cdot \dot{X}_C}{U} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left( 0,9 + \frac{0,6975 \cdot 0,4}{0,9} \right)^2 + \left( \frac{0,96 \cdot 0,4}{0,9} \right)^2} = 1,283. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_Э &= Q_{\text{нагр}} + \Delta Q = Q_{\text{нагр}} + (P_{\text{нагр}}^2 + Q_{\text{нагр}}^2) \dot{X}_C / U^2 = \\ &= 0,75 + \frac{1^2 + 0,75^2}{1^2} \cdot 0,4 = 1,375. \end{aligned}$$

Таблица 5

$U$	1,00	0,90	0,80	0,75	0,70	0,65
$E_{\text{Э}}$	1,36	1,283	1,2006	1,18	1,174	1,23
$Q_{\text{Э}}$	1,375	1,251	1,232	1,231	1,257	1,326

Рис. 12. Графики зависимости: а) –  $E'_{\text{Э}} = f(U)$ , б) –  $Q'_{\text{Э}} = f(E'_{\text{Э}})$  примера 2.

Коэффициенты запаса статической устойчивости нагрузки будут

$$K_{3,U} = \frac{U_0 - U_{\text{кр}}}{U_0} 100\% = \frac{1 - 0,7}{1} 100\% = 30\%;$$

$$K_{3,E} = \frac{E_0 - E_{\text{кр}}}{E_0} 100\% = \frac{1,36 - 1,182}{1,36} 100\% = 13\%.$$

#### 1.4. Расчет статической устойчивости нагрузки, заданной эквивалентным асинхронным двигателем.

Асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором и кратностью максимального момента от 1,6 до 2,5 составляют от 50 до 80% промышленной нагрузки. Поэтому при питании их от шин источника, даже значительные снижения напряжения на шинах источника не могут привести к нарушению устойчивости двигателей. Единственной переменной в данном случае является изменение угловой скорости двигателей нагрузки. В этом случае проверка устойчивости асинхронной нагрузки выполняется по критерию  $\frac{dP}{ds} = 0$ .

Из формулы для расчета активной мощности  $P$ , потребляемой двигателем из сети несоизмеримо большой мощности, и имеющей вид:

$$P = \frac{U_2 \cdot \dot{R}_2 \cdot s}{(\dot{R}_2)^2 + (X_{\delta} \cdot s)^2} \quad (13)$$

получим (из условия  $\frac{dP}{ds} = 0$ ) выражения для максимума активной мощности  $P_{\max}$  и критического скольжения  $s_{\text{кр}}$ , соответствующему этому максимуму:

$$P_{\max} = 0,5 \cdot U^2 \cdot X_{\sigma}; \quad s_{\text{кр}} = \frac{\dot{R}_2}{X_{\sigma}}. \quad (14)$$

Формулы расчета коэффициента запаса статистической устойчивости, эквивалентного асинхронного двигателя по активной мощности и скольжения имеют вид:

$$K_{3,P} = \frac{(P_{\max} - P_0)}{P_0} 100\%; \quad K_{3,s} = \frac{(s_{\text{кр}} - s_0)}{s_0} 100\%. \quad (15)$$

Условия нарушения статической устойчивости, эквивалентного асинхронного двигателя, питающегося от источника соизмеримой мощности, оцениваются по критериям:

$$\frac{dE_{\Sigma}}{dU} > 0 \quad \text{и} \quad \frac{dQ_{\Sigma}}{dE_{\Sigma}} > -\infty. \quad (16)$$

В этом случае в качестве независимой переменной статического режима работы двигателей берется значение Э.Д.С. генератора, питающего через внешнее сопротивление сети группу асинхронных двигателей соизмеримой суммарной мощности. Зависимой переменной от режима работы двигателей при этом будет напряжение на шинах двигателя.

Нарушение устойчивости асинхронной нагрузки связано с прогрессирующим снижением напряжения в узле нагрузки системы и переходом статической характеристике  $Q_{\text{нагр}}(U)$  из области положительного эффекта нагрузки ( $\frac{dQ_{\text{нагр}}}{dU} > 0$ ) в область отрицательно регулирующего эффекта (см. рис. 2).

При выборе критерия для исследования устойчивости исходим из его сложности в конкретном случае. Для асинхронной нагрузки более простым называется критерий  $\frac{dQ_{\Sigma}}{dE_{\Sigma}} > -\infty$ .

Для получения зависимости  $Q_{\Sigma} = f(E_{\Sigma})$  предварительно задаются рядом значений напряжений в узле нагрузки, для каждого из которых рассчитывают соответствующие скольжения эквипотенциального двигателя.

Для Г-образной схемы замещения АД реактивная мощность, потребляемая двигателем, состоит из мощностей намагничивания  $Q_{\mu}$  и мощности скольжения  $Q_s$  т.е.:

$$Q_{\text{дв}} = Q_{\mu} + Q_s = \frac{U^2}{X_{\mu}} + \frac{P \cdot s}{s_{\text{кр}}} \quad (17)$$

Исходную зависимость  $Q_{\Sigma} = f(E_{\Sigma})$  получают предварительно определив  $Q_{\Sigma}$  для каждого значения напряжения по формуле (11) и рассчитав по выражению (9) эквипотенциальную ЭДС  $E_{\Sigma}$ .

Методика расчета зависимости реактивной мощности от Э.Д.С.  $Q_{\Sigma} = f(E_{\Sigma})$  иллюстрируется примером 3.

**Пример 3.** Задана схема электрической системы, нагрузка которой представлена в виде одного эквивалентного асинхронного двигателя (см. рис. 13). Параметры схемы и нагрузки:

1. Исходный режим и параметры элементов схема, без цепи нагрузки повторяет данные примера 1;
2. Параметры нагрузки: трансформатор ТЗ –  $S_{\text{H}} = 63 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ;  $U_{\text{к}} = 12\%$ ;  
- коэффициент трансформации  $K_{\text{T}} = \frac{110}{6,3}$   $K_{\text{T}} = \frac{110}{63}$  ;

асинхронный двигатель АД:

$$P_{\text{H}} = 50 \text{ МВт}; \cos \varphi = 0,8; X_{\sigma} = 0,25; R_2' = 0,0375; X_{\mu} = 2,25.$$

**Требуется:**

- 1) При включенном выключателе **В**:
  - а) рассчитать критическое напряжение на шинах подстанции, при котором произойдет опрокидывание эквивалентного двигателя;
  - б) Определить запас устойчивости по мощности и скольжению.
- 2) При выключенном выключателе **В**:

а) Определить, будет ли устойчиво работать двигатель после разделения системы (проверка по критерию  $\frac{dQ_3}{dE_3} > -\infty$ ).

При выполнении всех расчетов считать, что механическая нагрузка  $P_H$  на валу двигателя неизменна и не зависит от скольжения.

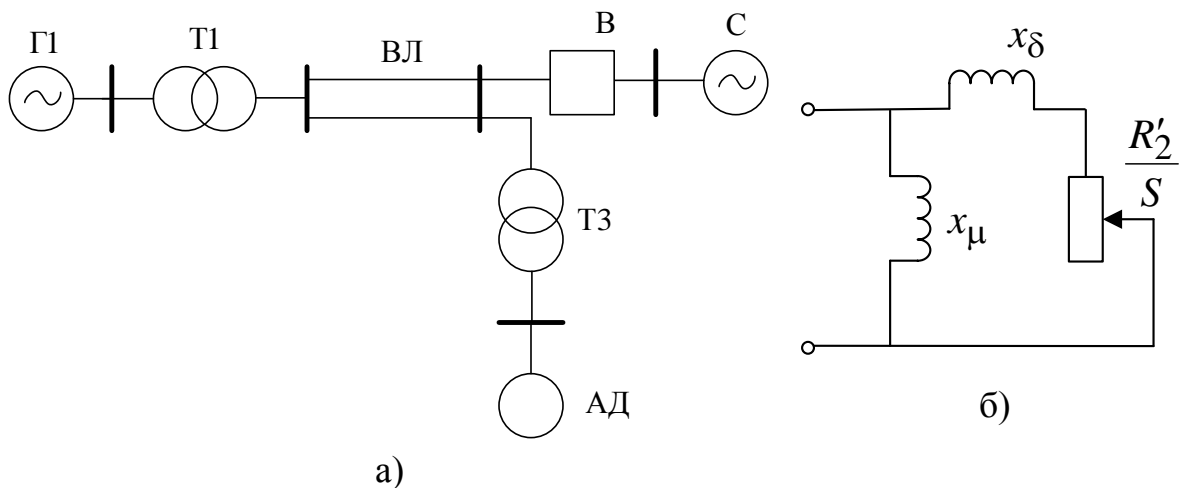


Рис. 13. Исследуемая система примера 2: а) - исходная система; б) - схема замещения.

**Решение:**

**1) Выключатель В включен.**

При решении данной задачи обычно оперируют с упрощенной схемой замещения узла нагрузки (рис. 14, б), которая отличается от исходной (рис. 14, а) тем, что реактивность  $X_\mu$  цепи намагничивания АД перенесена в точку системы, где напряжение не зависит от режима работы эквивалентного асинхронного двигателя, т.е. на шины подстанции.

С учетом принятых в примере 1 базисных условий ( $S_6 = 50 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ) рассчитаем параметры схемы замещения узла нагрузки.

$$X_\sigma = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{12,6 \cdot 50}{100 \cdot 63} = 0,1;$$

$$X_3 = X_\sigma \frac{S_6}{S_H} = 0,25 \frac{S_6 \cos \varphi}{P_H} = 0,25 \frac{50 \cdot 0,8}{50} = 0,2;$$



$$R_{20} = \dot{R}_2 \frac{S_6}{S_H} = \dot{R}_2 \frac{S_6 \cos \varphi}{P_H} = 0,0375 \frac{50 \cdot 0,8}{50} = 0,03;$$

$$X_H = X_\mu \frac{S_6}{S_H} = X_\mu \frac{S_6 \cos \varphi}{P_H} = 2,25 \frac{50 \cdot 0,8}{50} = 1,8.$$

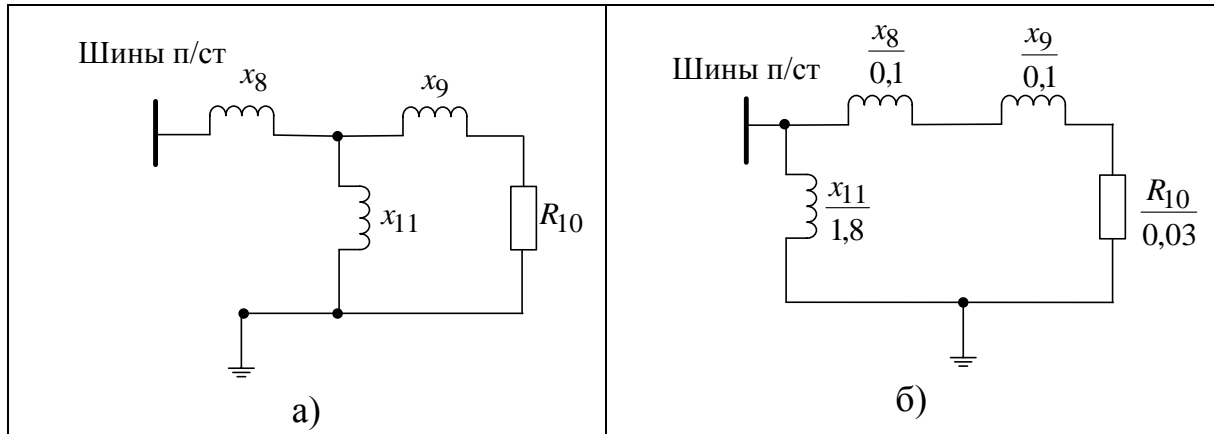


Рис. 14. Схема замещения узла нагрузки: а) - исходная; б) - упрощенная.

Суммарное сопротивление двигателя  $X_\sigma$  и внешнего сопротивления до точки системы, где принимается неизменным напряжение:

$$X_{\Sigma} = X_8 + X_9 = 0,1 + 0,2 = 0,3.$$

Критическое напряжение, при котором опрокидывающий момент равен рабочей нагрузке, определяется по формуле:

$$U_{кр} = \sqrt{2 \cdot P_0 \cdot K_3 \cdot X_{\Sigma}} = \sqrt{2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,3} = 0,775,$$

где  $K_3$  - есть коэффициент загрузки (в данном случае принимаем равным единице);  $P_0$  - мощность асинхронного двигателя в исходном режиме.

Коэффициент запаса статистической устойчивости по напряжению согласно (31) будет:

$$K_{3,U} = \frac{U_0 - U_{кр}}{U_0} 100\% = \frac{1 - 0,775}{1} 100\% = 22,5 \%;$$

Критическое скольжение двигателя определяется в соответствии с (14), с учетом, что для упрощенной схемы замещения вместо  $X_\sigma$  подставляем  $X_\Sigma$ .

$$s_{кр} = \frac{R_{20}}{X_\Sigma} = \frac{0,03}{0,3} = 0,1.$$

Для определения коэффициента запаса по скольжению установим область изменения скольжения, соответствующую рабочему режиму двигателя. С этой целью уравнение (13) запишем относительно скольжения:

$$s^2 - \frac{U^2 \cdot R_2}{P \cdot X_\sigma^2} \cdot s + \frac{R_2}{X_\sigma^2} = 0 \quad \text{или} \quad s^2 - \frac{1^2 \cdot 0,03}{1 \cdot 0,3^2} \cdot s + \frac{0,03}{0,3^2} = 0$$

Корни этого уравнения  $s_1 = 0,03$  и  $s_2 = 0,9298$ . Первый из корней  $s_1$  соответствует рабочему режиму двигателя, а второй  $s_2$  - соответствует неустойчивой области, характеристики  $P = f(s)$ .

Коэффициент запаса по скольжению в устойчивой области характеристики  $P = f(s)$  согласно (15) будет:

$$K_{3.s} = \frac{(s_{кр} - s_0)}{s_0} 100\% = \frac{0,1 - 0,033}{0,033} 100\% = 203\%.$$

Расчетное значение максимальной активной мощности при номинальном режиме (при  $U = 1$ ) в соответствии с (14) будет (при замене  $X_\sigma$  на  $X_\Sigma$ ):

$$P_{max} = 0,5 \cdot U^2 \cdot X_\sigma = \frac{0,5 \cdot 2^2}{0,3} = 1,67.$$

Тогда коэффициента запаса по активной мощности согласно (15):

$$K_{3.P} = \frac{(P_{max} - P_0)}{P_0} 100\% = \frac{1,67 - 1}{1} 100\% = 67\%.$$

Для расчета мощности при других значениях напряжения на шинах узла нагрузки и тех же скольжениях используют формулу:

$$P_{U(s)} = P_{0(s)} \cdot U^2,$$

где  $P_{U(s)}$  - значение активной мощности при напряжении  $U$  и скольжении  $s$ ;

$P_{0(s)}$  - значение активной мощности при напряжении  $U = 1$  и скольжении  $s$ .

Результаты вычисления приведены в табл. 6 и отображены графически (рис. 15.)

Таблица 6

$s$	$P$ при $U = 1$	$P$ при $U_{кр} = 0,775$
0	0	0
0,033	1,0	0,6
0,1	1,67	1,0
0,29	1,0	0,6

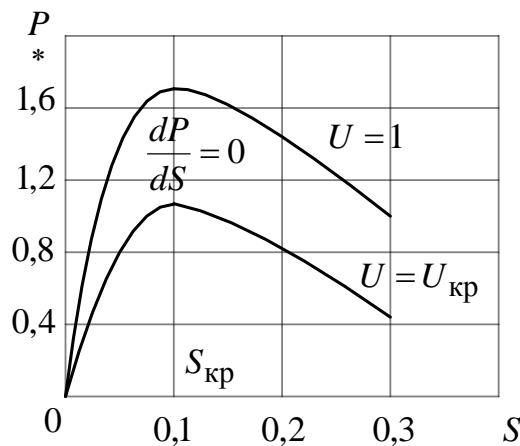


Рис. 15. Графики зависимости  $P = f(s)$ .

Точки перегиба характеристики  $P = f(s)$  при критическом скольжении  $s_{кр}$  соответствует нулевому значению производной  $\frac{dP}{ds} = 0$ .

## 2. Выключатель В выключен.

При отключении от электрической системы локальной сети электропитания с местной станцией напряжение на шинах узла нагрузки становится зависимым от режима работы эквивалентного двигателя, т.е. стано-

вится функцией его скольжения. Отметим, что в исходном режиме при выключении выключателя **В** напряжение на шинах узла нагрузки остается неизменным.

Схема замещения рассматриваемой передачи показана на рис. 16.

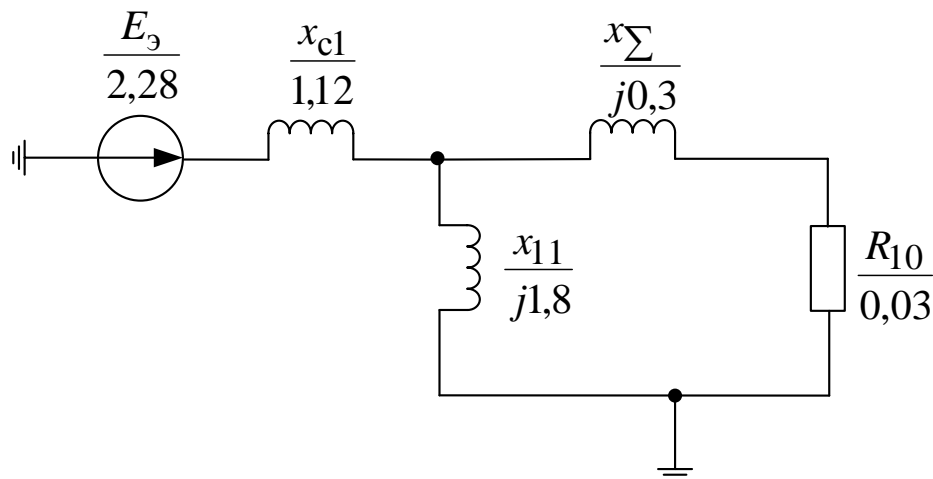


Рис. 16. Схема замещения исходного режима при выключении выключателя В.

Параметры элементов схемы замещения на рис. 16 берутся из предыдущих расчетов.

В исходном режиме при  $U = 1$  и  $s_1 = 0,033$  реактивная мощность  $Q_{\text{э}}$  потребляемая двигателем из сети согласно (17) будет:

$$Q_{\text{дв}} = Q_{\mu} + Q_{\mu} = \frac{U^2}{X_{\mu}} + \frac{P \cdot s}{s_{\text{кр}}} = \frac{1^2}{1,8} + \frac{1 \cdot 0,033}{0,1} = 0,885.$$

Тогда эквивалентная Э.Д.С.  $E_{\text{э}}$  согласно (9) будет:

$$\begin{aligned} E_{\text{э}} &= \sqrt{\left(U + \frac{Q_{\text{дв}} \cdot X_{c1}}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_{\text{дв}} \cdot X_{c1}}{U}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(1 + \frac{0,885 \cdot 1,12}{1}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 1,12}{1}\right)^2} = 2,28. \end{aligned}$$

Реактивная мощность, выдаваемая эквивалентной станцией с учетом потерь реактивной мощности в сети определяется согласно (11):

$$Q_{\text{Э}} = Q_{\text{нагр}} + \Delta Q = Q_{\text{нагр}} + (P_{\text{нагр}}^2 + Q_{\text{нагр}}^2)^{X_{C1}} / U^2 =$$

$$= 0,885 + \frac{1^2 + 0,885^2}{1^2} \cdot 1,12 = 2,88.$$

Далее, задаваясь другими значениями напряжения на шинах подстанции в интервале  $1,1 \geq U \geq U_{\text{кр}}$ , при условии постоянства активной мощности ( $P_{\text{дв}} = 1$ ), определим соответствующие  $E_{\text{Э}}$  и  $Q_{\text{двЭ}}$ , результаты расчета которых представлены в табл. 7 и отображены графически на рис. 17.

Таблица 7

$U$ Параметр	1,10	1,05	1,00	0,90	0,80	0,775
$s_1$	0,027	0,0297	0,033	0,045	0,07	0,1
$Q_{\text{двЭ}}$	0,94	0,909	0,885	0,9	1,055	1,33
$E_{\text{Э}}$	2,29	2,283	2,28	2,37	2,67	3,06
$Q_{\text{Э}}$	2,68	2,76	2,88	3,4	4,75	6,51

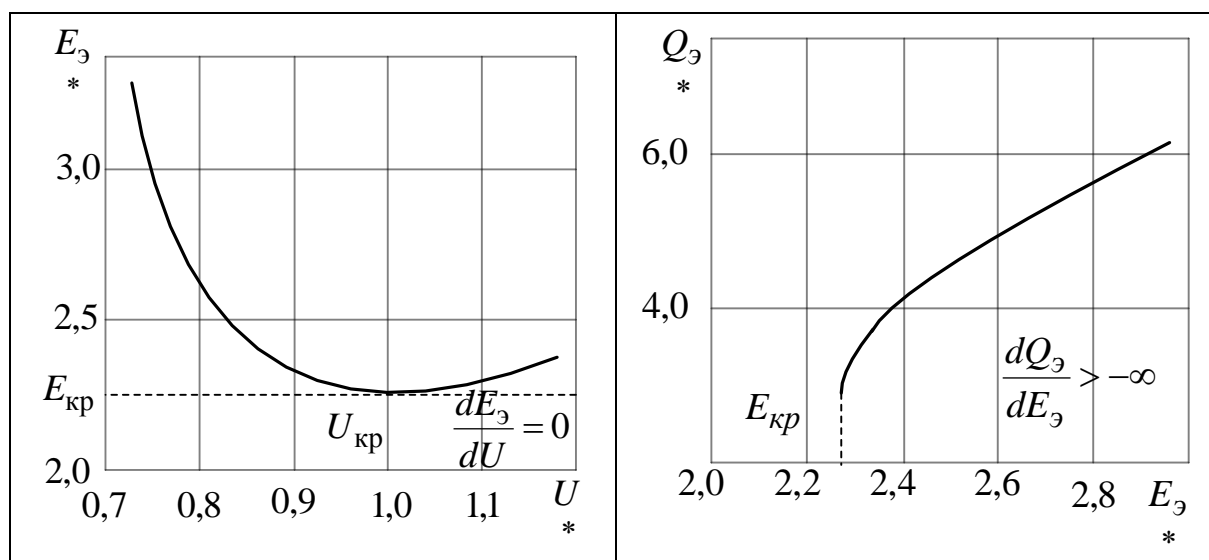


Рис.17. Графики для определения параметров критического режима:  
а) - критического напряжения; б) - критической Э.Д.С.

Из рассмотрения графиков рис. 17 можно сделать вывод, что при разделении системы (отключения выключателя В) эквивалентный двигатель будет работать неустойчиво уже при номинальном напряжении на его шинах, так как  $U_{кр} = 1$ . Следовательно, запаса устойчивости по напряжению в этом случае нет.

### 1.5. Расчет динамических характеристик асинхронного двигателя.

При анализе переходных процессов в узлах нагрузки практический интерес представляют временные зависимости характеристики асинхронного двигателя, динамические характеристики в различных режимах его работы: *пуск; отключение от шин питания; работа при сниженном напряжении на его зажимах.*

Динамические характеристики АД можно определить путем численного интегрирования уравнения движения ротора двигателя:

$$\Delta M = M_{\text{Э}} - M_{\text{МХ}} = -T_j \frac{ds}{dt}, \quad (18)$$

где  $\Delta M$  - избыточный момент, о.е.

$M_{\text{Э}}$  - электромагнитный момент двигателя, о.е.

$M_{\text{МХ}}$  - статический момент сопротивления производственного механизма, о.е.

$T_j$  — механическая постоянная времени агрегата: двигатель - производственный механизм, с;

Выражение электромагнитного момента  $M_{\text{Э}}$  можно получить из формулы Клосса:

$$M_{\text{Э}} = \frac{2 \cdot M_{\text{max}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}} \cdot \left( \frac{U}{U_{\text{H}}} \right)^2, \quad (19)$$

где  $M_{\text{max}}$  - кратность максимально момента двигателя, о.е.;

$s_{\text{кр}}$  - критическое скольжение, которое можно определить по паспортным данным асинхронного двигателя через номинальное скольжение и кратность максимального момента из соотношения:

$$s_{кр} = s_H \cdot \left( \frac{M_{max}}{M_H} + \sqrt{\left( \frac{M_{max}}{M_H} \right)^2 - 1} \right), \quad (20)$$

Для большинства производственных механизмов значение статический момент сопротивления  $M_{MX}$  можно рассчитать по формуле:

$$M_{MX} = M_{п.МХ} + (K_3 - M_{п.МХ}) \left( \frac{1-s}{1-s_H} \right)^\gamma, \quad (21)$$

где  $M_{п.МХ}$  - момент трения механизма о.е.;

$K_3$  - коэффициент загрузки двигателя о.е.;

$\gamma$  – показатель, характеризующий зависимость  $M_{MX} = f(s)$ .

Механическую постоянную времени  $T_j$  обычно определяют по формуле:

$$T_j = \frac{n_0^2 \cdot (GD^2 + GD_{прив МХ}^2)}{364 \cdot P_H} \quad (22)$$

где  $GD^2$  - маховой момент ротора двигателя, т·м<sup>2</sup>;

$GD_{прив МХ}^2$  - приведённый к валу двигателя маховой момент механизма, т·м<sup>2</sup>;

$n_0^2$  - синхронная частота вращения магнитного поля статора, мин<sup>-1</sup> (об/мин).

Значение приведенного к валу двигателя махового момента определяют по формуле:

$$GD_{прив МХ}^2 = GD_{МХ}^2 \cdot \left( \frac{n_{0 МХ}}{n_0} \right)^2 \quad (23)$$

где  $n_{0 МХ}$  - синхронная частота вращения вала механизма, мин<sup>-1</sup>.

Заменяя производную  $\frac{ds}{dt}$  в выражении (18) на конечное приращение  $\frac{\Delta s}{\Delta t}$  и разбивая зависимость  $\Delta M = f(s)$  на конечное число интервалов по скольжению, можно определить среднее значение избыточного момента  $\Delta M_{iср}$  в каждом интервале  $\Delta s_i$ :

$$\Delta M_{icp} = -T_j \frac{\Delta s}{t_i} \quad (24)$$

С учетом произведённой замены время переходного процесса  $t_{пп}$  (при пуске, посадке напряжения, выбеге и др.) имеет вид:

$$t_{пп} = -T_j \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\Delta s_i}{\Delta M_{icp}} \quad (25)$$

Относительная погрешность определения значения  $t_{пп}$  тем меньше, чем больше число интервалов  $n$  по скольжению. Значение  $\Delta M_{icp}$  можно также определить для каждого интервала по характеристике  $\Delta M_{\text{э}} = f(s)$  и  $\Delta M_{\text{мх}} = f(s)$ .

**Пример 4.** Для асинхронного двигателя заданы следующие параметры:

$$s_H = 0,025; \quad P_H = 1 \text{ МВт}; \quad M_{max} = 2; \quad GD^2 = 1 \text{ т} \cdot \text{м}^2; \quad K_3 = 0,9;$$

$$n_0 = 600 \text{ мин}^{-1}; \quad M_{п\text{мх}} = 0,15; \quad GD_{\text{мх}}^2 = 4 \text{ т} \cdot \text{м}^2; \quad n_{0\text{мх}} = 200 \text{ мин}^{-1};$$

$$M_H = 1; \quad U_{ост} = 0,5.$$

*Требуется:* рассчитать время пуска при номинальном напряжении на его зажимах; определить допустимую продолжительность посадки напряжения  $U_{ост}$  и при полном исчезновении напряжения; рассчитать время выбега двигателя в рассматриваемых случаях.

**Решение:**

Определяя значение критического скольжения  $s_{кр}$  согласно (20) и подставляя его в (19) получим зависимость  $M_{\text{э}} = f(s)$  при номинальном напряжении на его зажимах.

$$s_{кр} = s_H \cdot \left( \frac{M_{max}}{M_H} + \sqrt{\left( \frac{M_{max}}{M_H} \right)^2 - 1} \right) = 0,025 \cdot \left( \frac{2}{1} + \sqrt{\left( \frac{2}{1} \right)^2 - 1} \right) = 0,093;$$

тогда



$$M_{\text{Э}} = \frac{2 \cdot M_{\text{max}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}} \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{H}}}\right)^2 = \frac{2 \cdot 2}{\frac{s}{0,093} + \frac{0,093}{s}} \cdot \left(\frac{U}{1}\right)^2 = \frac{0,372 \cdot s \cdot U^2}{s^2 + 0,008649}$$

При посадке напряжения на шинах асинхронной машины от  $U_{\text{H}}$  до  $0,5 U_{\text{H}} = U_{\text{ост}}$  двигатель будет тормозиться, так как его электромагнитный момент становится меньше момента сопротивления механизма. Время допустимой посадки напряжения неограниченно с точки зрения устойчивости двигателя, так как при номинальном напряжении  $U_{\text{H}}$  на зажимах двигателя его электромагнитный момент превышает момент сопротивления при любом скольжении. Аналогичный вывод можно сделать при посадке и практически полном исчезновении напряжения на зажимах двигателя. Однако, при полном отключении двигателя выбег двигателя происходит более интенсивно по сравнению с предыдущим случаем, так как электромагнитный момент  $M_{\text{Э}} = 0$ .

Результаты расчетов для случая посадки напряжения (параметры со штрихом) и отключения питания (параметры с двумя штрихами) приведены в таблице 8 и представлены графически на рис. 18.

По формуле (21) рассчитываем статическую характеристику момента сопротивления производственного механизма  $M_{\text{MX}} = f(s)$ :

$$\begin{aligned} M_{\text{MX}} &= M_{\text{п.мх}} + (K_3 - M_{\text{п.мх}}) \left(\frac{1-s}{1-s_{\text{H}}}\right)^{\gamma} \\ &= 0,15 + (0,9 - 0,15) \cdot \left(\frac{1-s}{1-0,025}\right)^2 = 0,15 + 0,7895(1-s)^2. \end{aligned}$$

Так как двигатель работает при коэффициенте загрузки  $K_3 = 0,9$ , то его рабочее скольжение больше номинального. В этом случае при номинальном напряжении на шинах двигателя ( $U_{\text{H}} = 1$ ) его рабочее скольжение определяют из равенства:

$$K_3 = M_{\text{Э}} \quad \text{или} \quad 0,9 = \frac{0,372 \cdot s}{s^2 + 0,008649}$$

или  $s^2 - 0,413333 \cdot s + 0,008649 = 0,$

откуда значение корней уравнения  $s_1 = 0,0221$ ;  $s_2 = 0,39122$ .

Значение первого корня меньше критического скольжения, поэтому принимаем его значение равным рабочему скольжению  $s_{\text{раб}} = 0,0221$ .

Разбивая интервал рабочего скольжения (от 1 до 0,0221) на элементарные участки  $\Delta s_i$  и, определяя значения приращения момента  $\Delta M_i$  по характеристике  $M = f(s)$  находим, предварительно рассчитав в соответствии с (24) среднее значение приращения момента  $\Delta M_{i\text{ ср}}$ , время достижения соответствующего скольжения, используя формулу (25). Результаты расчетов  $M$ ;  $M_{\text{МХ}}$ ;  $\Delta M$  и времени пуска  $t_{\text{пуск}}$  приведены в таблице 9 и представлены графически на рис. 18.

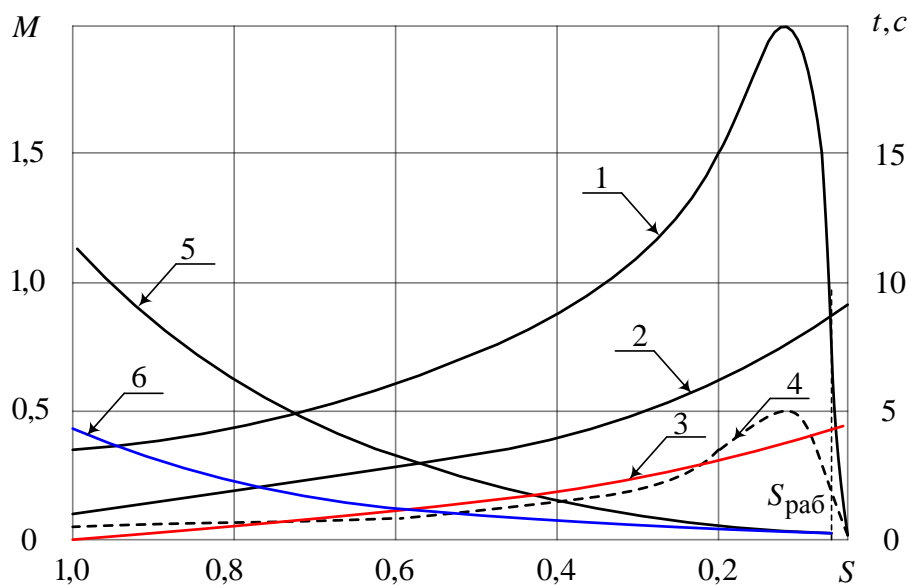


Рис. 18. Динамические характеристики АД примера 4: 1 –  $M_3 = f(s)$  при номинальном напряжении на шинах двигателя; 2 –  $M_{\text{МХ}} = f(s)$ ; 3 –  $t_{\text{пуск}} = f(s)$ ; 4 –  $M_3 = f(s)$  при посадке напряжения на зажимах; 5 –  $t_{\text{выб}} = f(s)$  при посадке напряжения на зажимах; 6 –  $t_{\text{выб}} = f(s)$  при полном отключении питания.

Таблица 9:

Скольжение \ Параметр	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,022	0
$M_3, \text{ о.е}$	0,37	0,46	0,61	0,88	1,53	0,9	0
$M_{\text{МХ}}, \text{ о.е}$	0,15	0,182	0,276	0,434	0,655	0,9	0,939

Продолжение таблицы 9

$\Delta M$ , о.е	0,22	0,278	0,334	0,446	0,875	0	-
$\Delta M_{i.c.p}$ , о.е	-	0,249	0,304	0,388	0,66	0,438	-
$t_{\text{пуск}}$ , с	0	1,147	2,09	2,83	3,26	3,84	-
$M'_3$ , о.е	0,092	0,115	0,151	0,22	0,382	0,25	0
$M''_3$ , о.е	- 0,058	- 0,07	- 0,125	- 0,214	- 0,273	0,65	-
$\Delta M_{i.c.p}$ , о.е	- 0,062	- 0,096	- 0,169	- 0,243	- 0,461	-	-
$t_{\text{выб}}$ , с	11,0	6,4	3,42	1,73	0,552	-	-
$M''_3$ , о.е	- 0,15	- 0,182	- 0,276	- 0,434	- 0,655	- 0,9	-
$\Delta M_{i.c.p}$ , о.е	- 0,166	- 0,229	- 0,355	- 0,54	- 0,777	-	-
$t_{\text{выб}}$ , с	4,67	2,95	1,7	0,89	0,364	-	-

## 2. Методические указания к выполнению расчетно-графической работы на тему “Расчет устойчивости системы электро-снабжения по практическим критериям”

### 2.1. Состав и исходные данные к расчетно-графической работе.

В объем расчетно-графической работы входят четыре расчетных задания. Студент выполняет тот вариант заданий, порядковый номер которого совпадает с номером, под которым фамилия студента записана в групповом журнале и с первой буквой его фамилии. Номер контрольного вопроса должен совпадать с номером варианта задания. Для успешного решения задач, входящих в состав РГР, рекомендуется использовать методические разработки предыдущего раздела по тематике соответствующей задачи.

#### **ЗАДАНИЕ 1.**

Для приведенной на рис. 19 схемы электропередачи определить коэффициент запаса статической устойчивости системы:

- а) по идеальному пределу мощности;
- б) по действительному пределу мощности.

Для всех вариантов определить также предел передаваемой мощности со стороны станции с генераторами Г1. Место подключения нагрузки в схеме электропередачи, характер ее представления (неизменным комплексным сопротивлением или статическими характеристиками) определяется вариантом задания в соответствии с табл. 10 и табл. 11

Таблица 10

Выбор места подключения нагрузки

Первая буква фамилии	А-В	Г-Ж	З-К	Л-М	Н-О	П-С	Т-Ф	Х-Я
Место подключения нагрузки на схеме рис. 10	1	2	3	4	1	2	3	4
Нагрузка представлена	$Z_{\text{нагр}}$	$P_{\text{нагр}}(U)$ $Q_{\text{нагр}}(U)$	$Z_{\text{нагр}}$	$P_{\text{нагр}}(U)$ $Q_{\text{нагр}}(U)$	$P_{\text{нагр}}(U)$ $Q_{\text{нагр}}(U)$	$Z_{\text{нагр}}$	$P_{\text{нагр}}(U)$ $Q_{\text{нагр}}(U)$	$Z_{\text{нагр}}$

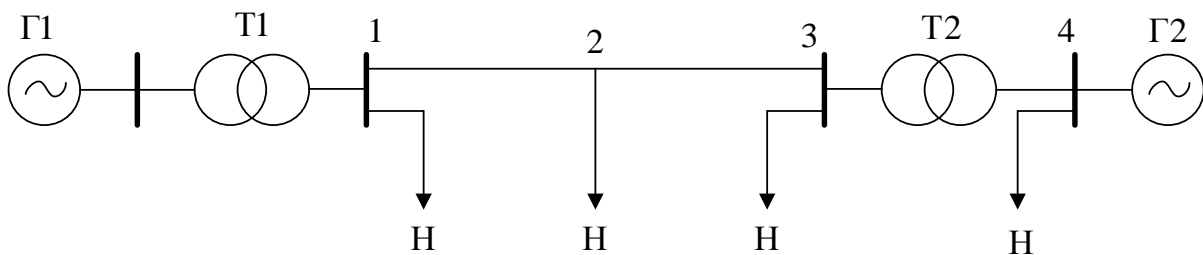


Рис. 19. Схема электропередачи к заданию 1.

Таблица 11

## Варианты выбора параметров элементов электропередачи

	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Генератор Г1</b>										
$P_H$ , МВт	0,2	0,6	0,85	1,2	2,0	5,0	8,0	65	15	17
$\cos \varphi_H$	0,81	0,85	0,85	0,81	0,8	0,81	0,83	0,81	0,81	0,8
$X'_d$ , о.е.	0,25	0,31	0,35	0,4	0,45	0,4	0,13	0,1	0,14	0,14
$X_d$ , о.е.	1,0	0,91	1,1	1,1	1,4	1,2	1,2	1,4	1,5	1,9
Кол-во, шт.	5	4	5	7	6	10	8	4	4	6
<b>Трансформатор Т1</b>										
$S_H$ , МВА	0,25	0,63	1,0	1,6	2,5	6,3	10	80	10	10
$U_K$ , %	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
$K_T$	$35\%_{0,4}$	$35\%_{0,4}$	$35\%_{0,4}$	$35\%_{6,3}$	$35\%_{6,3}$	$115\%_{6,3}$	$115\%_{10,5}$	$242\%_{10,5}$	$115\%_{6,6}$	$115\%_{6,6}$
Кол-во, шт.	5	8	5	7	6	10	8	4	8	12
<b>Генератор Г2</b>										
$P_H$ , МВт	1,3	1,0	3,0	7,0	15	40	70	900	145	200
$\cos \varphi_H$	0,8	0,83	0,83	0,83	0,81	0,87	0,85	0,84	0,81	0,82
$X_d$ , о.е.	1,8	1,6	2,2	2,0	2,0	2,5	2,3	2,5	2,3	2,15
Кол-во, шт.	4	13	16	14	2	2	1	1	1	1
<b>Трансформатор Т2</b>										
$S_H$ , МВА	1,6	1,6	6,3	20	16	40	80	250	80	200
$U_K$ , %	6,5	6,5	7,5	8,0	8,0	10,5	10,5	10,5	10,5	11
$K_T$	$35\%_{0,69}$	$35\%_{0,69}$	$35\%_{6,3}$	$38,5\%_{6,3}$	$38,5\%_{6,3}$	$115\%_{6,3}$	$115\%_{10,5}$	$242\%_{10,5}$	$115\%_{10,5}$	$121\%_{10,5}$
Кол-во, шт.	4	13	8	5	2	2	1	4	2	1
<b>Линия – ВЛ</b>										
$l$ , км	30	26	22	14	20	150	102	240	130	25
<b>Нагрузка – Н</b>										
$P_H$ , МВт	3,0	10	20	14	25	96	80	560	170	280
$\cos \varphi$	0,83	0,88	0,87	0,84	0,9	0,83	0,8	0,85	0,8	0,8
<b>Передаваемая мощность</b>										
$P_H$ , МВт	0,85	2,0	4,0	8,0	10	48	60	260	60	100
$\cos \varphi$	0,87	0,91	0,83	1,0	0,85	0,84	0,88	0,88	0,87	0,9

Продолжение таблицы 11

	Варианты									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<u>Генератор Г1</u>										
$P_H$ , МВт	1,2	1,6	1,85	1,2	2,0	5,0	8,0	65	15	17
$\cos \varphi_H$	0,83	0,84	0,85	0,83	0,82	0,81	0,83	0,81	0,81	0,82
$X'_d$ , о.е.	0,25	0,31	0,35	0,4	0,45	0,4	0,13	0,1	0,14	0,14
$X_d$ , о.е.	1,0	0,91	1,1	1,1	1,4	1,2	1,2	1,4	1,5	1,9
Кол-во, шт.	6	5	5	8	7	11	9	5	5	7
<u>Трансформа- тор Т1</u>										
$S_H$ , МВА	1,6	2,0	2,0	1,6	2,5	6,3	10	80	16	20
$U_K$ , %	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
$K_T$	$^{35}/_{0,4}$	$^{35}/_{0,4}$	$^{35}/_{0,4}$	$^{35}/_{6,3}$	$^{35}/_{6,3}$	$^{115}/_{6,3}$	$^{115}/_{10,5}$	$^{242}/_{10,5}$	$^{115}/_{6,6}$	$^{115}/_{6,6}$
Кол-во, шт.	6	5	5	8	7	11	9	5	5	7
<u>Генератор Г2</u>										
$P_H$ , МВт	1,3	1,0	5,0	7,0	15	40	70	90	145	200
$\cos \varphi_H$	0,8	0,83	0,83	0,83	0,81	0,87	0,85	0,84	0,81	0,82
$X_d$ , о.е.	1,8	1,6	2,2	2,0	2,0	2,5	2,3	2,5	2,3	2,15
Кол-во, шт.	4	13	10	9	2	2	1	1	1	1
<u>Трансформа- тор Т2</u>										
$S_H$ , МВА	1,6	1,6	6,3	10	16	40	80	125	80	250
$U_K$ , %	6,5	6,5	7,5	8,0	8,0	10,5	10,5	10,5	10,5	11
$K_T$	$^{35}/_{0,69}$	$^{35}/_{0,69}$	$^{35}/_{6,3}$	$^{38,5}/_{6,3}$	$^{38,5}/_{6,3}$	$^{115}/_{6,3}$	$^{115}/_{10,5}$	$^{242}/_{10,5}$	$^{115}/_{10,5}$	$^{12}/_{10,5}$
Кол-во, шт.	4	13	10	9	2	2	1	1	2	1
<u>Линия – ВЛ</u>										
$l$ , км	30	26	22	14	20	150	102	140	130	50
<u>Нагрузка – Н</u>										
$P_H$ , МВт	3,0	10	20	14	25	96	80	560	170	280
$\cos \varphi$	0,83	0,88	0,87	0,84	0,9	0,83	0,8	0,85	0,8	0,8
<u>Передаваемая мощность</u>										
$P_H$ , МВт	0,85	2,0	4,0	8,0	10	48	60	260	60	100
$\cos \varphi$	0,87	0,91	0,83	1,0	0,85	0,84	0,88	0,88	0,87	0,9

Продолжение таблицы 11

	Варианты									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
<u>Генератор Г1</u>										
$P_H$ , МВт	0,24	0,65	0,85	1,4	2,5	5,0	8,0	65	15	18,5
$\cos \varphi_H$	0,81	0,85	0,85	0,81	0,8	0,81	0,83	0,81	0,81	0,8
$X'_d$ , о.е.	0,25	0,31	0,35	0,4	0,45	0,4	0,13	0,1	0,14	0,14
$X_d$ , о.е.	1,0	0,91	1,1	1,1	1,4	1,2	1,2	1,4	1,5	1,9
Кол-во, шт.	5	4	5	7	6	10	8	4	4	6
<u>Трансформа- тор Т1</u>										
$S_H$ , МВА	0,25	0,63	1,0	1,6	2,5	6,3	10	80	10	10
$U_K$ , %	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
$K_T$	$35/_{0,4}$	$35/_{0,4}$	$35/_{0,4}$	$35/_{6,3}$	$35/_{6,3}$	$115/_{6,3}$	$115/_{10,5}$	$242/_{10,5}$	$115/_{6,6}$	$115/_{6,6}$
Кол-во, шт.	5	8	5	7	6	10	8	4	8	12
<u>Генератор Г2</u>										
$P_H$ , МВт	1,3	1,0	3,0	7,0	15	40	70	90	145	200
$\cos \varphi_H$	0,8	0,83	0,83	0,83	0,81	0,87	0,85	0,84	0,81	0,82
$X_d$ , о.е.	1,8	1,6	2,2	2,0	2,0	2,5	2,3	2,5	2,3	2,15
Кол-во, шт.	4	8	16	10	2	2	1	2	1	2
<u>Трансформа- тор Т2</u>										
$S_H$ , МВА	1,6	1,6	6,3	20	16	40	80	100	80	200
$U_K$ , %	6,5	6,5	7,5	8,0	8,0	10,5	10,5	10,5	10,5	11
$K_T$	$35/_{0,69}$	$35/_{0,69}$	$35/_{6,3}$	$38,5/_{6,3}$	$38,5/_{6,3}$	$115/_{6,3}$	$115/_{10,5}$	$242/_{10,5}$	$115/_{10,5}$	$12/_{10,5}$
Кол-во, шт.	4	8	8	5	2	2	1	2	2	2
<u>Линия – ВЛ</u>										
$l$ , км	30	26	22	14	20	50	102	40	30	25
<u>Нагрузка – Н</u>										
$P_H$ , МВт	3,0	10	20	14	25	96	80	560	170	280
$\cos \varphi$	0,83	0,88	0,87	0,84	0,9	0,83	0,8	0,85	0,8	0,8
<u>Передаваемая мощность</u>										
$P_H$ , МВт	0,85	2,0	4,0	8,0	10	48	60	260	60	100
$\cos \varphi$	0,87	0,91	0,83	1,0	0,85	0,84	0,88	0,88	0,87	0,9

Продолжение таблицы 11

	Варианты									
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
<b>Генератор Г1</b>										
$P_H$ , МВт	0,28	0,66	1,0	1,3	2,4	5,5	8,5	65	16	18
$\cos \varphi_H$	0,81	0,85	0,85	0,81	0,82	0,81	0,83	0,81	0,81	0,81
$X_d$ , о.е.	0,25	0,31	0,35	0,4	0,45	0,4	0,13	0,1	0,14	0,14
$X_d$ , о.е.	1,0	0,91	1,1	1,1	1,4	1,2	1,2	1,4	1,5	1,9
Кол-во, шт.	5	4	5	7	6	10	8	4	4	6
<b>Трансформатор Т1</b>										
$S_H$ , МВА	0,4	0,4	1,0	1,6	2,5	6,3	10	80	10	10
$U_K$ , %	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
$K_T$	$^{35}/_{0,4}$	$^{35}/_{0,4}$	$^{35}/_{0,4}$	$^{35}/_{6,3}$	$^{35}/_{6,3}$	$^{115}/_{6,3}$	$^{115}/_{10,5}$	$^{242}/_{10,5}$	$^{115}/_{6,6}$	$^{115}/_{6,6}$
Кол-во, шт.	5	8	5	7	6	10	8	4	8	12
<b>Генератор Г2</b>										
$P_H$ , МВт	1,3	1,5	3,0	7,2	15,5	43	70	300	145	200
$\cos \varphi_H$	0,8	0,83	0,83	0,83	0,81	0,87	0,85	0,84	0,81	0,82
$X_d$ , о.е.	1,8	1,6	2,2	2,0	2,0	2,5	2,3	2,5	2,3	2,15
Кол-во, шт.	4	9	16	10	2	2	1	1	1	1
<b>Трансформатор Т2</b>										
$S_H$ , МВА	1,6	1,6	6,3	20	16	43	80	400	80	250
$U_K$ , %	6,5	6,5	7,5	8,0	8,0	10,5	10,5	10,5	10,5	11
$K_T$	$^{35}/_{0,69}$	$^{35}/_{0,69}$	$^{35}/_{6,3}$	$^{38,5}/_{6,3}$	$^{38,5}/_{6,3}$	$^{115}/_{6,3}$	$^{115}/_{10,5}$	$^{242}/_{10,5}$	$^{115}/_{10,5}$	$^{12}/_{10,5}$
Кол-во, шт.	4	9	8	5	2	2	1	1	2	1
<b>Линия – ВЛ</b>										
$l$ , км	30	26	22	14	20	50	42	40	30	25
<b>Нагрузка – Н</b>										
$P_H$ , МВт	3,0	10	20	14	25	96	80	560	170	280
$\cos \varphi$	0,83	0,88	0,87	0,84	0,9	0,83	0,8	0,85	0,8	0,8
<b>Передаваемая мощность</b>										
$P_H$ , МВт	0,85	2,0	4,0	8,0	10	48	60	260	60	100
$\cos \varphi$	0,87	0,91	0,83	1,0	0,85	0,84	0,88	0,88	0,87	0,9



Продолжение таблицы 11

	Варианты									
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
<u>Генератор Г1</u>										
$P_H$ , МВт	0,3	0,8	1,0	1,5	2,8	5,5	7,5	65	20	30
$\cos \varphi_H$	0,81	0,85	0,85	0,81	0,82	0,81	0,83	0,85	0,86	0,86
$X'_d$ , о.е.	0,25	0,31	0,35	0,4	0,45	0,4	0,13	0,1	0,14	0,14
$X_d$ , о.е.	1,0	0,91	1,1	1,1	1,4	1,2	1,2	1,4	1,5	1,9
Кол-во, шт.	5	4	5	7	6	10	8	4	4	6
<u>Трансформа- тор Т1</u>										
$S_H$ , МВА	0,4	0,4	1,0	1,6	3,0	6,3	10	80	10	40
$U_K$ , %	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
$K_T$	$^{35}/_{0,4}$	$^{35}/_{0,4}$	$^{35}/_{0,4}$	$^{35}/_{6,3}$	$^{35}/_{6,3}$	$^{115}/_{6,3}$	$^{115}/_{10,5}$	$^{242}/_{10,5}$	$^{115}/_{6,6}$	$^{115}/_{6,6}$
Кол-во, шт.	5	8	5	7	6	10	8	4	8	6
<u>Генератор Г2</u>										
$P_H$ , МВт	1,3	1,5	3,0	7,2	15,5	43	70	300	145	200
$\cos \varphi_H$	0,8	0,83	0,83	0,83	0,81	0,87	0,85	0,84	0,81	0,82
$X_d$ , о.е.	1,8	1,6	2,2	2,0	2,0	2,5	2,3	2,5	2,3	2,15
Кол-во, шт.	4	9	16	10	2	2	1	1	1	1
<u>Трансформа- тор Т2</u>										
$S_H$ , МВА	1,6	1,6	6,3	20	16	43	80	400	80	250
$U_K$ , %	6,5	6,5	7,5	8,0	8,0	10,5	10,5	10,5	10,5	11
$K_T$	$^{35}/_{0,69}$	$^{35}/_{0,69}$	$^{35}/_{6,3}$	$^{38,5}/_{6,3}$	$^{38,5}/_{6,3}$	$^{115}/_{6,3}$	$^{115}/_{10,5}$	$^{242}/_{10,5}$	$^{115}/_{10,5}$	$^{12}/_{10,5}$
Кол-во, шт.	4	9	8	5	2	2	1	1	2	1
<u>Линия – ВЛ</u>										
$l$ , км	10	16	22	14	20	50	42	40	30	25
<u>Нагрузка – Н</u>										
$P_H$ , МВт	5,0	10	20	14	25	96	80	560	170	180
$\cos \varphi$	0,83	0,88	0,87	0,84	0,9	0,83	0,8	0,85	0,8	0,8
<u>Передаваемая мощность</u>										
$P_H$ , МВт	1,85	2,0	4,0	8,0	10	48	60	260	60	100
$\cos \varphi$	0,87	0,91	0,83	1,0	0,85	0,84	0,88	0,88	0,87	0,9

## Задание 2

Для электропередачи, преобразованной в соответствии со схемой задания 1 (см. рис. 19), оставлены без изменения элементы передающей станции; приемная система представлена нагрузкой и системой неограниченной мощности; нагрузка задана статическими характеристиками) проверить статическую устойчивость нагрузки по практическим критериям  $\frac{dE_3}{dU} > 0$  и  $\frac{dQ_3}{dE_3} > -\infty$ .

Варианты задания 2 по параметрам элементов электропередачи соответствуют вариантам задания 1 и дополняются типом системы автоматической регулировки возбуждения генератора (АРВ) из табл. 12.

Выбор типа АРВ генератора

Таблица 12

Первая буква фамилии	А-В	Г-Ж	З-К	Л-М	Н-О	П-С	Т-Ф	Х-Я
Рассматриваемый случай	АРВ пропорционального действия	АРВ сильного действия	АРВ отсутствует	АРВ пропорционального действия	АРВ сильного действия	АРВ отсутствует	АРВ пропорционального действия	АРВ сильного действия

## Задание 3

Для электропередачи, преобразованной в соответствии со схемой задания 1 (см. рис. 19), (оставлены без изменения элементы передающей станции; система принята неограниченной мощности, нагрузка представлена в виде эквивалентного асинхронного двигателя, присоединенного к шинам вторичного напряжения подстанции) определить в соответствии с вариантом задания (см. табл. 13, 14):

а) критическое напряжение на шинах подстанции, при котором произойдет «опрокидывание» эквивалентного двигателя; определить запас устойчивости по мощности и скольжению. **Выключатель В включен;**

б) определить будет ли устойчиво работать эквивалентный двигатель после разделения или объединения системы, проверив по критерию  $\frac{dQ_3}{dE_3} > -\infty$ .

В расчетах принять, что механическая нагрузка двигателя не зависит от скольжения. Вариант задания выбирать аналогично заданию 2 с учетом данных табл. 13 и табл.14.

Таблица 13

Выбор состояния выключателя В для пункта б) задания

Первая буква фамилии	А-В	Г-Ж	З-К	Л-М	Н-О	П-С	Т-Ф	Х-Я
Состояние выключателя В	Вкл.	Откл.	Вкл.	Откл.	Вкл.	Откл.	Вкл.	Откл.

Таблица 14

Параметры элементов узла нагрузки

	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<u>Трансформатор ТЗ</u> $S_H$ , МВА	1,0	4,0	6,3	10	16	60	80	360	80	125
$U_K$ , %	6,5	6,5	8	10,5	10,5	10,5	11	12	10,5	11
$K_T$	35/0,4	35/6,3	35/0,4	35/6,3	35/6,3	115/105	115/105	230/6,3	110/10,5	115/6,3
<u>АД</u> $P_H$ , МВт	0,85	2,0	4,0	8,0	10	48	60	260	60	100
$\cos \varphi$	0,87	0,91	0,83	0,9	0,85	0,87	0,88	0,88	0,87	0,9
$X_\sigma$ , о.е.	0,3	0,3	0,28	0,28	0,27	0,27	0,25	0,26	0,24	0,25
$X_\mu$ , о.е.	4,1	4,1	4	3,9	3,8	3,9	3,3	3,0	3,5	3,8
$R_2$ , о.е.	0,06	0,03	0,05	0,04	0,03	0,04	0,05	0,06	0,04	0,03

Продолжение таблицы 14

	Варианты									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<u>Трансформатор ТЗ</u> $S_H$ , МВА	1,6	4,0	6,3	10	16	60	80	360	80	150
$U_K$ , %	6,5	6,5	8	10,5	10,5	10,5	11	12	10,5	11
$K_T$	35/0,4	35/6,3	35/0,4	35/6,3	35/6,3	115/105	115/105	230/6,3	110/10,5	115/6,3
<u>АД</u> $P_H$ , МВт	1,00	3,0	5,0	8,0	10	48	60	290	70	120
$\cos \varphi$	0,87	0,91	0,83	0,9	0,85	0,87	0,88	0,88	0,87	0,9
$X_\sigma$ , о.е.	0,3	0,3	0,28	0,28	0,27	0,27	0,25	0,26	0,24	0,25
$X_\mu$ , о.е.	4,1	4,1	4	3,9	3,8	3,9	3,3	3,0	3,5	3,8
$R_2$ , о.е.	0,06	0,03	0,05	0,04	0,03	0,04	0,05	0,06	0,04	0,03

Продолжение таблицы 14

	Варианты									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
<u>Трансформатор ТЗ</u>										
$S_H$ , МВА	1,2	4,2	6,3	10	16	60	80	300	63	120
$U_K$ , %	6,5	6,5	8	10,5	10,5	10,5	11	12	10,5	11
$K_T$	35/0,4	35/6,3	35/0,4	35/6,3	35/6,3	115/105	115/105	230/6,3	110/10,5	115/6,3
<u>АД</u>										
$P_H$ , МВт	1,0	3,0	5,0	7,0	14	55	70	280	60	90
$\cos \varphi$	0,87	0,91	0,83	0,9	0,85	0,87	0,88	0,88	0,87	0,9
$X_\sigma$ , о.е.	0,3	0,3	0,28	0,28	0,27	0,27	0,25	0,26	0,24	0,25
$X_\mu$ , о.е.	4,1	4,1	4	3,9	3,8	3,9	3,3	3,0	3,5	3,8
$R_2$ , о.е.	0,06	0,03	0,05	0,04	0,03	0,04	0,05	0,06	0,04	0,03

Продолжение таблицы 14

	Варианты									
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
<u>Трансформатор ТЗ</u>										
$S_H$ , МВА	2,0	3,0	6,3	12	12	50	70	260	80	150
$U_K$ , %	6,5	6,5	8	10,5	10,5	10,5	11	12	10,5	11
$K_T$	35/0,4	35/6,3	35/0,4	35/6,3	35/6,3	115/105	115/105	230/6,3	110/10,5	115/6,3
<u>АД</u>										
$P_H$ , МВт	1,85	2,0	4,5	8,0	10	48	60	250	70	130
$\cos \varphi$	0,87	0,91	0,83	0,9	0,85	0,87	0,88	0,88	0,87	0,9
$X_\sigma$ , о.е.	0,3	0,3	0,28	0,28	0,27	0,27	0,25	0,26	0,24	0,25
$X_\mu$ , о.е.	4,1	4,1	4	3,9	3,8	3,9	3,3	3,0	3,5	3,8
$R_2$ , о.е.	0,06	0,03	0,05	0,04	0,03	0,04	0,05	0,06	0,04	0,03

Продолжение таблицы 14

	Варианты									
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
<u>Трансформатор ТЗ</u>										
$S_H$ , МВА	4,0	2,6	6,3	12	14	60	80	260	80	200
$U_K$ , %	6,5	6,5	8	10,5	10,5	10,5	11	12	10,5	11
$K_T$	35/0,4	35/6,3	35/0,4	35/6,3	35/6,3	115/105	115/105	230/6,3	110/10,5	115/6,3

<u>АД</u>										
$P_H$ , МВт	3,8	2,0	4,8	10,0	10	55	75	245	75	170
$\cos \varphi$	0,87	0,91	0,83	0,9	0,85	0,87	0,88	0,88	0,87	0,9
$X_\sigma$ , о.е.	0,3	0,3	0,28	0,28	0,27	0,27	0,25	0,26	0,24	0,25
$X_\mu$ , о.е.	4,1	4,1	4	3,9	3,8	3,9	3,3	3,0	3,5	3,8
$R_2$ , о.е.	0,06	0,03	0,05	0,04	0,03	0,04	0,05	0,06	0,04	0,03

### Задание 4

Для асинхронного двигателя, используемого в качестве привода производственного механизма, рассчитать в соответствии с заданием динамические характеристики (пуск, отключение от шин питания, работа при пониженном напряжении на его шинах). Варианты задания приведены в табл. 15 и табл. 16.

Таблица 15

Первая буква фамилии	А-В	Г-Ж	З-К	Л-М	Н-О	П-С	Т-Ф	Х-Я
Рассчитать зависимость	Время пуска $t_{\text{пуск}}$	Время выбега $t_{\text{выб}}$ при остаточном напряжении $U_{\text{ост}}$	Время выбега $t_{\text{выб}}$ при остаточном напряжении $U_{\text{ост}} = 0$	Время пуска $t_{\text{пуск}}$	Время выбега $t_{\text{выб}}$ при остаточном напряжении $U_{\text{ост}}$	Время выбега $t_{\text{выб}}$ при остаточном напряжении $U_{\text{ост}}$	Время пуска $t_{\text{пуск}}$	Время выбега $t_{\text{выб}}$ при остаточном напряжении $U_{\text{ост}}$

Таблица 16

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<u>Двигатель</u>										
$P_H$ , МВт	10	5,5	6	2	1,0	3	4	6	5	8
$m_{max}$ о.е.	2,0	1,9	2,5	2,2	2,0	2,4	2,1	1,8	2,3	2,5
$S_H$ %	3	2	2,5	4	4	3	5	5	2	3,5
$GD^2$ , Г·м <sup>2</sup>	1,4	2,0	1,0	0,8	0,7	1,7	2,9	4,0	5,2	3,0
$K_3$	1,0	0,7	0,9	0,6	0,7	0,8	1,0	0,7	0,6	0,9
$n_0$ , об/мин	750	750	3000	600	500	600	250	300	1000	500
<u>Механизм</u>										
$m_{n.max}$ , о.е.	0,1	0,3	0,4	0,15	0,1	0,2	0,1	0,3	0,25	0,15
$\gamma$	0	1	2	3	0	1	2	3	1	2
$GD^2$ , Г·м <sup>2</sup>	10	5,2	3,0	2,1	1,7	12	20	15	12	11
$n_0$ , об/мин	200	150	1000	300	250	100	60	200	200	150
<u>Напряжение</u>										
$U_{ост}$ , о.е.	0,7	0,5	0,8	0,75	0,7	0,4	0,3	0,2	0,6	0,35

Продолжение таблицы 16

Параметры	Варианты									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<u>Двигатель</u>										
$P_H$ , МВт	12	6,5	7	7	2,0	3	4	5	6	8
$m_{max}$ о.е.	2,0	1,9	2,5	2,2	2,0	2,4	2,1	1,8	2,3	2,5
$S_H$ %	3	2	2,5	4	4	3	5	5	2	3,5
$GD^2$ , Г·м <sup>2</sup>	1,4	2,0	1,0	0,8	0,7	1,7	2,9	4,0	5,2	3,0
$K_3$	1,0	0,8	0,9	0,65	0,75	0,85	1,0	0,75	0,65	0,95
$n_0$ , об/мин	750	750	3000	600	500	600	250	300	1000	500
<u>Механизм</u>										
$m_{n.max}$ , о.е.	0,15	0,35	0,45	0,15	0,15	0,25	0,15	0,35	0,25	0,15
$\gamma$	0	1	2	3	0	1	2	3	1	2
$GD^2$ , Г·м <sup>2</sup>	10	5,2	3,0	2,1	1,7	12	20	15	12	11
$n_0$ , об/мин	200	150	1000	300	250	100	60	200	200	150
<u>Напряжение</u>										
$U_{ост}$ , о.е.	0,6	0,58	0,68	0,75	0,7	0,49	0,39	0,29	0,67	0,35

Продолжение таблицы 16

Параметры	Варианты									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
<u>Двигатель</u>										
$P_H$ , МВт	8	5,5	6,5	2,5	1,5	3,5	4,5	6,5	5,5	9
$m_{max}$ о.е.	2,0	1,9	2,5	2,2	2,0	2,4	2,1	1,8	2,3	2,5
$S_H$ %	3	2	2,5	4	4	3	5	5	2	3,5
$GD^2$ , Г·м <sup>2</sup>	1,4	2,0	1,0	0,8	0,7	1,7	2,9	4,0	5,2	3,0
$K_3$	1,0	0,75	0,95	0,65	0,75	0,85	1,0	0,75	0,65	0,95
$n_0$ , об/мин	750	750	3000	600	500	600	250	300	1000	500
<u>Механизм</u>										
$m_{n.max}$ , о.е.	0,1	0,3	0,4	0,15	0,1	0,2	0,1	0,3	0,25	0,15
$\gamma$	0	1	2	3	0	1	2	3	1	2
$GD^2$ , Г·м <sup>2</sup>	10	5,2	3,0	2,1	1,7	12	20	15	12	11
$n_0$ , об/мин	200	150	1000	300	250	100	60	200	200	150
<u>Напряжение</u>										
$U_{ост}$ , о.е.	0,6	0,56	0,86	0,75	0,76	0,48	0,38	0,29	0,69	0,39

Продолжение таблицы 16

Параметры	Варианты									
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
<u>Двигатель</u>										
$P_H$ , МВт	9	6,5	6	3	2,0	3	4,5	6,5	5,5	8,5
$m_{max}$ о.е.	2,0	1,9	2,5	2,2	2,0	2,4	2,1	1,8	2,3	2,5
$S_H$ %	3	2	2,5	4	4	3	5	5	2	3,5
$GD^2$ , Г·м <sup>2</sup>	1,4	2,0	1,0	0,8	0,7	1,7	2,9	4,0	5,2	3,0
$K_3$	1,0	0,7	0,9	0,6	0,7	0,8	1,0	0,7	0,6	0,9
$n_0$ , об/мин	750	750	3000	600	500	600	250	300	1000	500
<u>Механизм</u>										
$m_{n.max}$ , о.е.	0,1	0,3	0,4	0,15	0,1	0,2	0,1	0,3	0,25	0,15
$\gamma$	0	1	2	3	0	1	2	3	1	2
$GD^2$ , Г·м <sup>2</sup>	10	5,2	3,0	2,1	1,7	12	20	15	12	11
$n_0$ , об/мин	200	150	1000	300	250	100	60	200	200	150
<u>Напряжение</u>										
$U_{ост}$ , о.е.	0,6	0,5	0,6	0,70	0,7	0,4	0,3	0,2	0,6	0,35

Продолжение таблицы 16

Параметры	Варианты									
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
<u>Двигатель</u>										
$P_H$ , МВт	7	5,5	7	2,8	2,0	4	5	7	6	7
$m_{max}$ о.е.	2,0	1,9	2,5	2,2	2,0	2,4	2,1	1,8	2,3	2,5
$S_H$ %	3	2	2,5	4	4	3	5	5	2	3,5
$GD^2$ , Г·М <sup>2</sup>	1,4	2,0	1,0	0,8	0,7	1,7	2,9	4,0	5,2	3,0
$K_3$	1,0	0,7	0,9	0,6	0,7	0,8	1,0	0,7	0,6	0,9
$n_0$ , об/мин	750	750	3000	600	500	600	250	300	1000	500
<u>Механизм</u>										
$m_{n.max}$ , о.е.	0,1	0,3	0,4	0,15	0,1	0,2	0,1	0,3	0,25	0,15
$\gamma$	0	1	2	3	0	1	2	3	1	2
$GD^2$ , Г·М <sup>2</sup>	10	5,2	3,0	2,1	1,7	12	20	15	12	11
$n_0$ , об/мин	200	150	1000	300	250	100	60	200	200	150
<u>Напряжение</u>										
$U_{ост}$ , о.е.	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,4	0,5	0,6	0,6



**Министерство образования и науки РФ**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«Владимирский государственный университет имени Александра  
Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»**  
**(ВлГУ)**

**Кафедра электротехники и электроэнергетики**

**Расчетно-графическая работа**  
по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических  
системах» на тему:  
«Расчет устойчивости системы электроснабжения по практическим  
критериям»

Выполнил: ст. гр. ЗЭЭ \_\_\_\_\_

Ф.И.О. \_\_\_\_\_

Принял: Колесник Г.П.

Владимир 2016

## Библиографический список:

1. Колесник, Г. П. Переходные электромагнитные процессы в электроэнергетических системах: учеб. пособие / Г.П. Колесник. – Владимир, Владим. гос. ун-т. Издательство ВлГУ. 2004. – 128 с.
2. Колесник, Г. П. Переходные электромеханические процессы в электроэнергетических системах : учеб. пособие / Г.П. Колесник. – Владимир, Владим. гос. ун-т. Издательство ВлГУ. 2008. – 116 с.
3. Расчет токов при коротких замыканиях и устойчивости систем электроснабжения по практическим критериям. Методические указания к практическим занятиям / Г.П. Колесник. Владимир, Владим. гос. ун-т. Издательство ВлГУ. 2005. 86 с.
4. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебник для вузов. / С.А. Ульянов. – М.: Энергия. 1970. – 470 с.
5. Переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник для вузов / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пираторов; под ред. И.П. Крючкова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008 – 416 с. : ил.
6. Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. Изд. 2-е. Учебник для энергетич. спец. вузов. / В.А. Веников. – М.: «Высшая школа», 1970. 472 с. : ил.
7. «Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях»; Учебн. пособие для вузов. / Под ред. Веникова В.А. – М.: Энергоиздат, 1983.- 504с.
8. Жданов, П.С. «Вопросы устойчивости электрических систем». / П.С. Жданов. – М: Энергия, 1979. - 520с.