

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

Современные технические средства передачи электроэнергии

Методические указания к практическим занятиям

Составитель: Колесник Г.П.

Владимир 2015

УДК.621.311
ББК 22.332

Рецензент:

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Приборостроение и информационно-измерительные технологии», Вла-
димирского государственного университета

В.С. Грибакин

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Владимирского государственного университета

Современные технические средства передачи электроэнергии (Элек-
тронный ресурс). Методические указания к практическим занятиям. / Со-
ставитель Г.П. Колесник. – Владимир, Владим. гос. ун-т. 2015. 46 с.

Содержат методические указания к практическим занятиям по расче-
ту переходных режимов электроэнергетических систем, в частности по
расчету статической устойчивости электрических систем по практиче-
ским 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 первого
курса магистратуры направления 140400.68 «Электроэнергетика и элек-
тротехника» всех форм обучения.

Табл.16. Ил. 19. Библиогр.: 8 назв.

УДК 621.311
ББК 22.332

ISBN

©Владимирский государственный
университет, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Расчет и анализ установившегося режима участка электрической сети.....	7
1.1. Расчет по данным, характеризующим начало участка.....	7
1.2. Расчет по данным, характеризующим конец участка.....	8
2. Расчет статической устойчивости электрических систем при нагрузке заданной постоянным сопротивлением.....	10
3. Расчет статической устойчивости электрических систем при нагрузке, заданной статическими характеристиками.....	13
<i>Пример 1.</i>	15
4. Расчет статической устойчивости нагрузки, заданной статическими характеристиками.....	22
5. Расчет действительного предела статической устойчивости системы, при нагрузке, заданной статическими характеристиками.....	25
<i>Пример 2.</i>	27
6. Расчет статической устойчивости нагрузки, заданной эквивалентным асинхронным двигателем.....	31
<i>Пример 3.</i>	33
7. Расчет динамических характеристик асинхронного двигателя.....	40
<i>Пример 4.</i>	42
Библиографический список.....	46

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных требований к проектируемым системам электропитания, оснащенных современными средствами передачи электроэнергии, остается минимизация потерь электроэнергии при её передаче потребителю при сохранении параметров режима. Однако, прежде всего необходимо оценить условия, в которых будут работать потребители и оборудование электрической сети. Это позволит установить допустимость анализируемого режима при передаче по сети данных мощностей при различного рода коммутациях и предусмотреть меры для обеспечения требуемого качества электроэнергии и устойчивой работе системы электропитания.

Работа электрической системы характеризуется значениями мощностей, вырабатываемых её генераторами и передаваемых потребителям. Количественный показатель работы электрической системы – это вырабатываемая мощность, но со стороны потребителя качество вырабатываемой энергии характеризуется значением напряжения и частотой. Работа электрической системы характеризуется также значениями напряжений в узловых точках сети и значениями токов, протекающих по её элементам. Состояние системы, определяемое указанными величинами, называется *режимом электрической системы*.

Параметры электрического режима зависят от плановых и аварийных изменений нагрузок, состава и конфигурации электрической сети. Задача расчета электрического режима сети состоит в определении параметров рабочего установившегося режима (состояние электрического равновесия: значения токов ветвей сети, напряжения в узловых точках и потери мощности), а также переходного режима при аварийных ситуациях с целью определения устойчивости 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).

Рабочие режимы электрической системы в общем случае несимметричные и несинусоидальные поэтому их анализ представляет собой весьма сложную задачу из-за большого количества элементов, образующих сети современных электрических систем и специфическими особенностями задания исходных данных. Исходными данными для расчета установившихся и переходных режимов служат: расчетная схема (схема электрических соединений), параметры сети электроэнергетической системы, данные о нагрузках (потребителях) и источниках электроэнергии (генераторах электростанций).

Нагрузки электрических сетей обычно задают значениями потребляемых ими активных и реактивных мощностей $\underline{S}_i = P_i + Q_i$ или токов и коэффициента мощности ($I_i, \cos \varphi$), которые могут приниматься постоянными, либо зависящими от напряжения в точке подключения нагрузки в сети $I_i = f(\dot{U}_i)$, $\underline{S}_i = f(\dot{U}_i)$.

Для генерирующих ветвей обычно задаются выдаваемые генераторами в сеть активные мощности ($P_i = \text{const}$) и модули напряжений в точках подключения ($U_i = \text{const}$). В ряде случаев, аналогично нагрузкам, источники питания могут быть заданы постоянными значениями активных и реактивных мощностей. Кроме того, один из источников питания (система или наиболее мощная электростанция), играющая роль балансирующего, задается комплексным значением напряжения $\dot{U}_6 = \text{const}$ (синусоидальный режим).

При решении задачи переходного процесса 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 схемах с несколькими источниками. Основные допущения при решении задач по определению токов и напряжений при электромагнитных переходных процессах следующие:

1). Отсутствие насыщения магнитных систем. При этом все схемы оказываются линейными.

2). Пренебрежение токами намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов. Единственным исключением из этого допущения является случай, когда трехстержневой трансформатор с соединением обмоток Y_0/Y_0 включен на напряжение нулевой последовательности.

3). Сохранение синусоидального режима и симметрии трехфазной системы (если не задано другое техническим заданием на расчет).

4). Пренебрежение емкостными проводимостями. Это справедливо при отсутствии продольной компенсации индуктивности цепи и если в схеме отсутствуют дальние линии передач с напряжением выше 220 кВ. При рассмотрении простых замыканий на землю это допущение совсем непригодно, так как в этом случае токи замыкаются именно через емкостные проводимости.

5). Приближенный учет нагрузок. В зависимости от стадии переходного процесса нагрузку приближено характеризуют некоторым постоянным сопротивлением, обычно чисто индуктивным.

6). Отсутствие активных сопротивлений (это в известной мере условно, поскольку активное сопротивление элементов системы учитывается неявно в эквивалентной постоянной времени).

7). Отсутствие качаний синхронных машин (это справедливо на начальной стадии переходного процесса в пределах 0,1 - 0,2 с).

Малые возмущения в системе 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 режима системы (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. Более детально аварийные и нормальные переходные процессы

можно классифицировать исходя из изменений основных параметров режима – изменений мощности и скорости.

1. Расчет и анализ установившегося режима участка электрической сети

1.1. Расчет по данным, характеризующим начало участка.

В случае необходимости передачи заданной мощности источника, при фиксированном напряжении на его шинах, в приемную систему или узел нагрузки по известным полной мощности в начале участка \underline{S}_1 и \dot{U}_1 определяют полную мощность и напряжение в конце участка \underline{S}_2 и \dot{U}_2 . При активно-индуктивном характере нагрузки значение полной мощности в начале участка будет

$$\underline{S}_1 = 3 \cdot \dot{U}_{\phi 1} \cdot \dot{I}_{\phi} = \sqrt{3} \cdot \dot{U}_1 \cdot \dot{I} = P_1 + jQ_1.$$

Тогда значение полной силы тока и его составляющих

$$\dot{I} = I_a - jI_p = \frac{\dot{S}_1}{\dot{U}_1 \cdot \sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{P_1 U_1' + Q_1 U_1''}{(U_1')^2 + (U_1'')^2} - j \frac{Q_1 U_1' - P_1 U_1''}{(U_1')^2 + (U_1'')^2} \right)$$

где U_1' и U_1'' продольная и поперечная составляющие входного напряжения.

Задачу определения падения и потери напряжения рассмотрим на конкретном примере для линии электропередачи напряжением 35 кВ, протяженностью 22 км, выполненной проводом АС 120/19 активное удельное сопротивление которого равно 0,27 Ом/км, индуктивное удельное сопротивление 0,39 Ом/км, при нагрузке в конце линии 5 МВт, коэффициент мощности 0,8.

По данным примера значение реактивной мощности нагрузки

$$Q = P \cdot \operatorname{tg}(\cos^{-1} \varphi) = 5,0 \cdot 0,75 = 3,75.$$

Продольная и поперечная составляющие вектора падения напряжения:

$$\Delta U' = \frac{(PR_0 + QX_0)}{U} \cdot \ell = \frac{(5,0 \cdot 0,27 + 3,75 \cdot 0,39) \cdot 22}{35} = 1,77 \text{ кВ};$$

$$\delta U'' = \frac{(PX_0 - QR_0)}{U} \cdot \ell = \frac{(5,0 \cdot 0,39 + 3,75 \cdot 0,27) \cdot 22}{35} = 0,59 \text{ кВ}.$$

С учетом составляющих получим вектор напряжения

$$\Delta U = \Delta U' + j \delta U'' = 1,77 + j0,59 = 1,87 \text{ кВ} \quad \angle 18,4^\circ.$$

Влияние поперечной составляющей падения напряжения на потерю напряжения очень мало, так как

$$\delta U \approx \frac{(\delta U'')^2}{2U_{\text{ном}}} = \frac{0,59^2}{2 \cdot 35} \approx 0,005 \text{ кВ},$$

Поэтому потеря напряжения практически равна продольной составляющей падения напряжения $\Delta U \approx \Delta U' = 1,77 \text{ кВ}$, что в процентах составляет

$$\Delta U = \frac{1,77 \cdot 100\%}{35} = 5,05\%,$$

что вполне допустимо.

1.2. Расчет по данным, характеризующим конец участка

При заданной нагрузке потребителя необходимо определить напряжение \dot{U}_1 и мощность \underline{S}_1 источника питания в начале участка, при котором будет обеспечено требуемое напряжение \dot{U}_2 у потребителя и при каких затратах (потерях) мощности на передачу потребителю необходимой мощности это целесообразно. В этом случае полагаем известными и неизменными мощность и напряжение в конце участка \underline{S}_2 и \dot{U}_2 ; $\underline{S}_2 = \text{const}$ и $U_2 = \text{const}$.

Аналогично предыдущему случаю при активно-индуктивном характере нагрузки значение полной мощности в конце участка будет

$$\underline{S}_2 = 3 \cdot \dot{U}_{\phi 2} \cdot \dot{i}_{\phi} = \sqrt{3} \cdot \dot{U}_2 \cdot \dot{i} = P_2 + jQ_2.$$

Тогда значение полной силы тока и его составляющих

$$\dot{i} = I_a - jI_p = \frac{\dot{S}_2}{\dot{U}_2 \cdot \sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{P_2 U_2' + Q_2 U_2''}{(U_2')^2 + (U_2'')^2} - j \frac{Q_2 U_2' - P_2 U_2''}{(U_2')^2 + (U_2'')^2} \right)$$

где U_2' и U_2'' продольная и поперечная составляющие напряжения в конце передачи.

Пример расчета напряжения в начале кабельной линии длиной 500 м, выполненной кабелем АВВГ 4х95 при включении в конце линии симметричной трехфазной нагрузки мощностью 100 кВт на линейное напряжение $\dot{U}_2 = 380$ В при коэффициенте мощности $\cos \varphi_2 = 0,95$, $\operatorname{tg} \varphi_2 = 0,33$ приведен ниже.

По справочным данным для кабеля АВВГ 4х95 удельные активное и индуктивное сопротивления составляют $R_0 = 0,326 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$ и $X_0 = 0,0602 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$.

При заданной длине кабеля активное и индуктивное сопротивления будут

$$R = R_0 \cdot \ell = 0,326 \cdot 0,50 = 0,163 \text{ Ом},$$

$$X = X_0 \cdot \ell = 0,0602 \cdot 0,50 = 0,0301 \text{ Ом},$$

Потеря напряжения на линии

$$\Delta U = \frac{P_2(R + X \cdot \operatorname{tg} \varphi_2)}{U_2} = \frac{100(0,163 + 0,0301 \cdot 0,33) \cdot 10^3}{380} = 45,5 \text{ В}.$$

Требуемое напряжение в начале линии

$$U_1 = U_2 + \Delta U = 380 + 45,5 = 425,5 \text{ В}.$$

Таким образом, для выполнения поставленных требований по обеспечению на нагрузке потребителя напряжения 380 В напряжение в начале линии должно быть увеличено на:

$$\delta U = (U_1 - U_2) \cdot \frac{100\%}{U_2} = \frac{425,5 - 380}{380} 100\% = 12\%,$$

Что превышает на 2 % допустимое нормативными документами значение.

Далее следует проверить потерю напряжения при напряжении в начале линии равном 425,5 В.

2. Расчет статической устойчивости электрических систем при нагрузке заданной постоянным сопротивлением

В общем случае под устойчивостью понимают способность электроэнергетической системы возвращаться в исходное (или близкое к исходному с сохранением баланса энергии в системе) состояние после отклонения параметров режима. Статическая устойчивость это устойчивость при малых возмущениях без учета фактора времени. Проблема устойчивости существует не только применительно ко всей системе электроснабжения, но и к отдельно взятой нагрузке, поскольку последняя при определенных условиях также может быть неустойчивой.

При расчете устойчивости электрических систем по практическим критериям 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; δ_{12} - угол сдвига между векторами электродвижущей силы (Э.Д.С.) генератора передающей станции и генератора местной станции.

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

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

где P_{\max} - максимальная мощность передающей станции;

P_0 - мощность передающей станции в исходном режиме.

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

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

где U - напряжение узловой точки системы, к которой подключена нагрузка, в относительных единицах (о.е.);

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

X_{C_i} - результирующее сопротивление цепи от точки приложения Э.Д.С. соответствующего генератора до шин нагрузки, о.е.

Для расчета угловой характеристики активной мощности генератора 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.;

α_{11} и α_{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.

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 – полное комплексное сопротивление нагрузки в о.е.

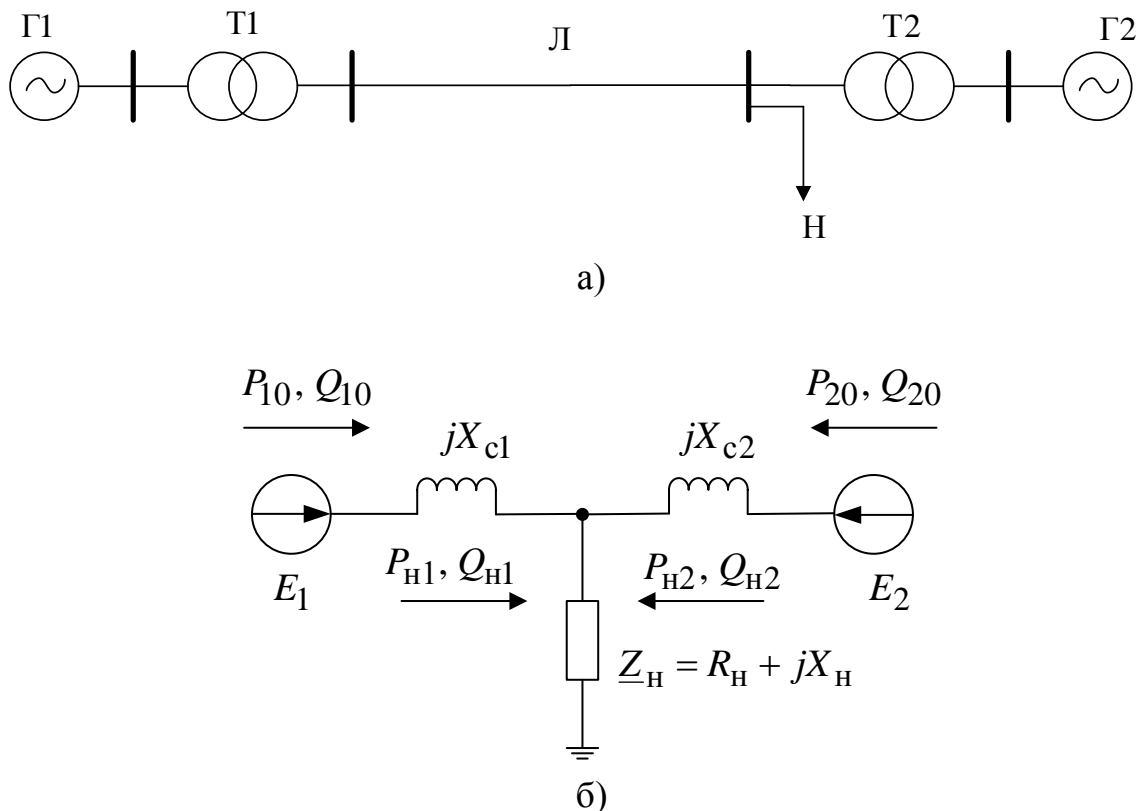


Рис.1. Исследуемая схема: а) – принципиальная схема электропередачи; б) – Т-образная схема замещения в случае представления нагрузки постоянным сопротивлением.

Полное комплексное сопротивление нагрузки, с учетом рекомендаций [1], при известных значениях напряжения U на шинах нагрузки, пол-

ной мощности нагрузки $S_{\text{нагр}}$ и коэффициента мощности $\cos \varphi_{\text{нагр}}$ можно определить по формуле:

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

3. Расчет статической устойчивости 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 (см. рис. 2).

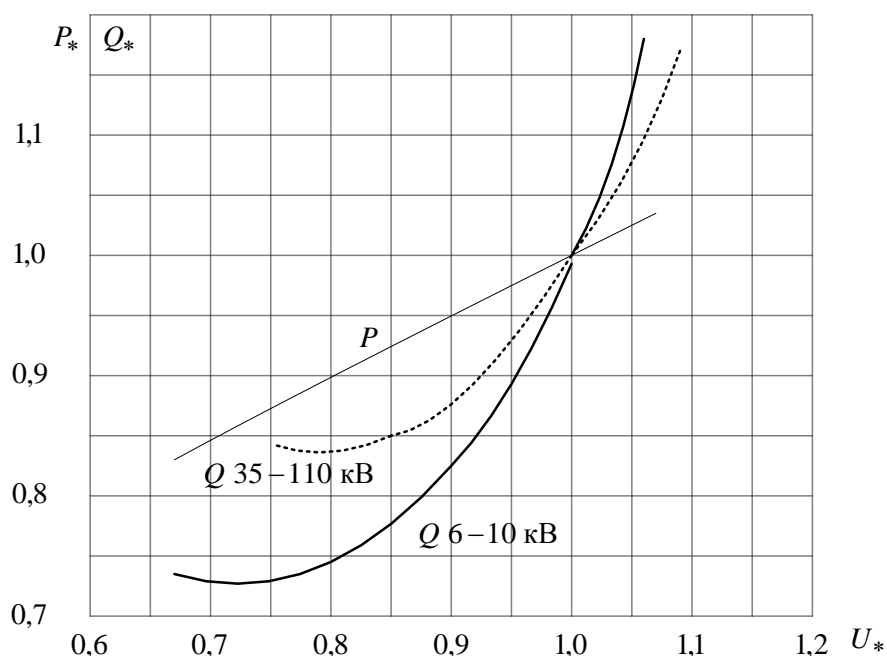


Рис. 2. Статические характеристики комплексной нагрузки.

Для оценки статической устойчивости электроэнергетической системы в случае нагрузки, заданной статическими характеристиками, целесообразно использовать практический критерий $\frac{dP}{dU} > -\infty$. 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 (1 – 2 %) значением мощностей: – активной P_{20} и – реактивной Q_{20} относительно их значений в исходном режиме;

2. Рассчитывают потери реактивной мощности ΔQ_{C2} в реактивности X_{C2} и напряжение U на шинах нагрузки по формулам:

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

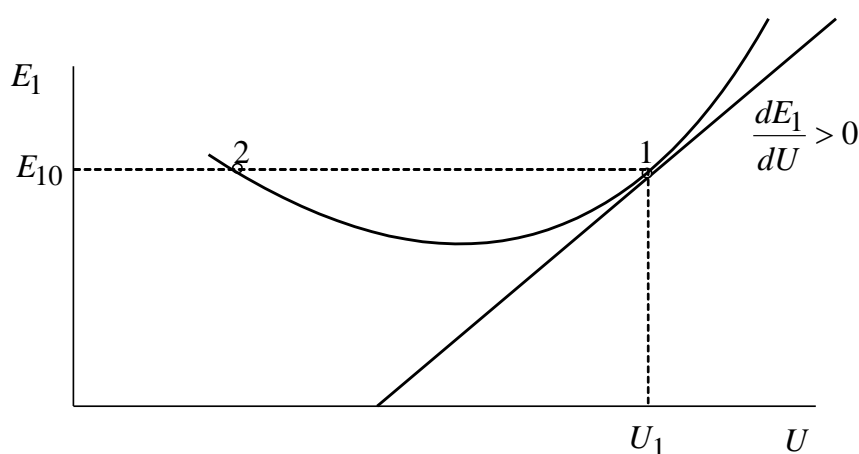
$$U = \sqrt{\left(E_{20} - \frac{Q_{20} \cdot X_{C2}}{E_{20}}\right)^2 + \left(\frac{P_{20} \cdot X_{C2}}{E_{20}}\right)^2}. \quad (7)$$

3. По статическим характеристикам рис. 2 определяют, с учетом значения напряжения на шинах нагрузки U , рассчитанному по (7), активные и реактивные мощности в о.е.: $P_{нагр}(U)$; $Q_{нагр}(U)$;

$$P_{Н1}(U) = P_{нагр}(U) - P_{20}; \quad Q_{Н1}(U) = Q_{нагр}(U) - Q_{Н2}. \quad (8)$$

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

5. Не меняя значения активной мощности P_{20} , задаются новым значением реактивной мощности 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.



характеристике с положительной производной.

Рис. 3. График зависимости Э.Д.С. генератора передающей станции Г1 от напряжения на шинах нагрузки.

6. По значению напряжения U_1 в относительных единицах для точки 1 графика на рис. 3 определяют по графикам статических характеристик рис. 2 значение активной мощности $P_{\text{нагр}}(U)$ в о.е. и вторую точку зависимости $P_{H1}(U)$.

7. Задаваясь новым уменьшенным значением активной мощности P_{20} , находят следующую точку характеристики $P_{H1}(U)$ по вышеприведенному алгоритму. Расчет ведут до тех пор, пока не будет найдено значение $P_{H1 \text{ max}}$, являющееся действительным пределом мощности генератора передающей станции.

Рассмотрим реализацию изложенного алгоритма при решении задачи примера 1.

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 электрической системы по идеальному пределу мощности ($K_{з.р}$);

2. Коэффициент запаса статической устойчивости по действительному пределу мощности, представив нагрузку неизменным комплексным сопротивлением, и построить угловую характеристику активной мощности генератора передающей станции ($P = f(\delta)$);

3. Коэффициент запаса статической устойчивости по действительному пределу мощности, представив нагрузку статическими характеристиками.

4. Провести анализ полученных результатов и сформулировать предложения по улучшению характеристик элементов электроэнергетической системы с целью повышения её устойчивости.

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

Решение 1. 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.

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 $P_H = 150 \text{ МВт}; \cos \varphi = 0,8;$ $P_{H1} = 50 \text{ МВт}; \cos \varphi = 0,8;$

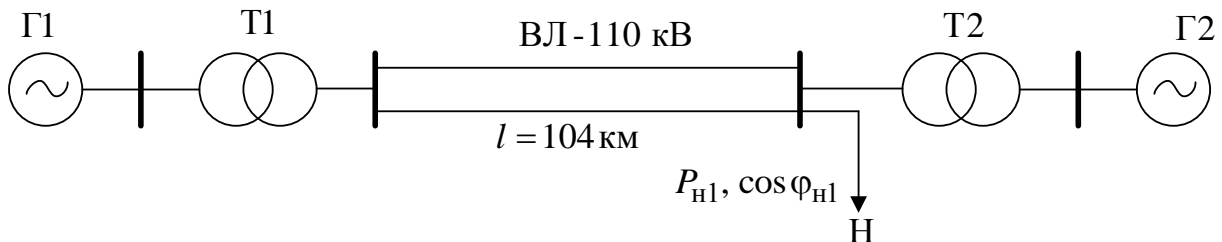


Рис. 4. Расчетная схема электрической системы примера 1.

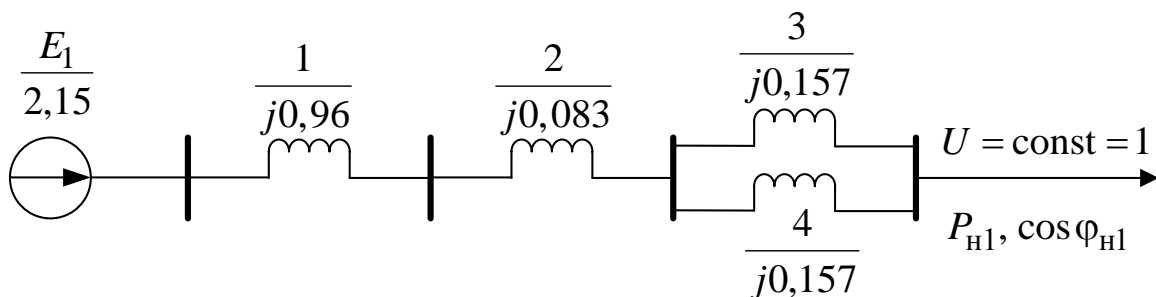


Рис. 5. Схема замещения электрической системы примера 1.

Параметры схемы замещения электрической системы и исходного режима определим в относительных единицах при базисных условиях: базисная мощность (без указания типа генератора и значения его тока возбуждения выбирается произвольно) $S_6 = 50 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; базисное напряжение ступени подключения нагрузки $U_6 = 115 \text{ кВ}$.

Расчетные реактивности элементов схемы замещения рис. 5 определим по формулам приближенного приведения:

- Реактивное сопротивление генератора Г1:

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

- Реактивное сопротивление трансформатора Т1:

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

- Реактивное сопротивление линии электропередачи:

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

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

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

Значение напряжения на шинах нагрузки и реактивной мощности нагрузки в относительных единицах при базисных условиях:

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

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

где $\text{tg}(\cos^{-1} 0,8) = 0,75$.

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 Э.Д.С генераторов передающей станции согласно выражению (1) будет:

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{\left(U + \frac{Q_{H1} \cdot X_{C1}}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_{H1} \cdot X_{C1}}{U}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(1 + \frac{0,75 \cdot 1,12}{1}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 1,12}{1}\right)^2} = 2,15. \end{aligned}$$

Максимум активной мощности P_{\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 электрической системы по идеальному пределу активной мощности найдем по выражению:

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

Для расчета коэффициента запаса статической устойчивости по действительному пределу мощности, при нагрузке заданной неизменным комплексным сопротивлением составляем однолинейную схему замещения электропередачи, которая с нумерацией элементов и их расчетными значениями показана на рис. 6.

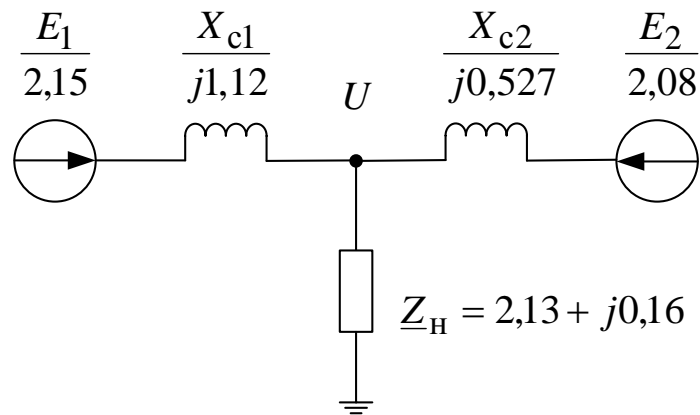


Рис. 6. Схема замещения электрической системы для расчета коэффициента запаса $K_{3,P}$ по действительному пределу мощности.

Значение сопротивления электропередачи от местной станции (Г2, Т2) до шин нагрузки в соответствии с рис. 5 определится суммой реактивных сопротивлений X_5 трансформатора Т2 и X_6 генератора Г2:

$$X_{C2} = X_5 + X_6,$$

где
$$X_5 = \frac{U_k\% \cdot S_6}{100 S_H} = \frac{12 \cdot 50}{100 \cdot 100} = 0,0375$$

$$X_6 = X_d \frac{S_6 \cos \varphi}{P_H} = 1,5 \frac{50 \cdot 0,85}{130} = 0,049$$

Тогда $X_{C2} = X_5 + X_6 = 0,0375 + 0,49 = 0,527.$

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

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

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

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

$$\begin{aligned} S_{*H2} &= P_{*H} + jQ_{*H} - P_{*H1} - jQ_{*H1} = 3 + j2,25 - 1 - j0,75 = 2 - j1,5 = \\ &= P_{H2} + jQ_{H2}, \end{aligned}$$

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

Следовательно, значение мощностей, поступающих от местной станции в нагрузку в о.е. – активной $P_{H2} = P_{20} = 2,0$, реактивной – $Q_{H2} = Q_{20} = 1,5$.

Э.Д.С 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:

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

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):

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

$$= 0,32 + 1,29 \cdot \sin(\delta_{12} + 30,74^\circ).$$

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

Таблица 2

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

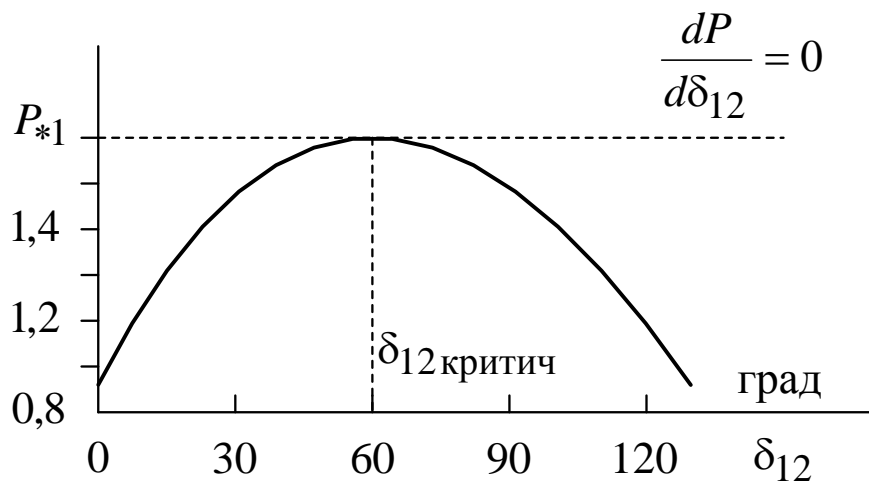


Рис. 7. Угловая характеристика мощности генератора передающей станции Г1.

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

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

Коэффициент запаса статической устойчивости системы при нагрузке заданной постоянным сопротивлением 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 при нагрузке заданной постоянным сопротивлением по идеальному и действительному пределам мощности видно, что снижение напряжения на шинах нагрузки уменьшает запас статической устойчивости системы.

4. Расчет действительного предела статической устойчивости системы, при нагрузке, заданной статическими характеристиками.

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

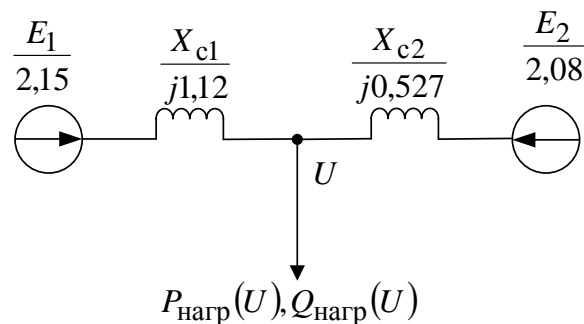


Рис. 8. Схема замещения электропередачи при нагрузке, заданной статическими характеристиками.

Определим параметры исходного режима при напряжении на шинах нагрузки $U = 1$ и значении мощностей, поступающих от местной станции в нагрузку в о.е. – активной $P_{Н2} = P_{20} = 2,0$, реактивной – $Q_{Н2} = Q_{20} = 1,5$, а также потери реактивной мощности в реактивности X_{C2} :

$$\Delta Q_{C2} = \frac{P_{Н2}^2 + Q_{C2}^2}{U^2} X_{C2} = \frac{2^2 + 1,5^2}{1^2} 0,527 = 3,29.$$

$$\text{Тогда } Q_{20} = Q_{Н2} + Q_{C2} = 1,5 + 3,29 = 4,79.$$

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 значения ΔQ_{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 (см. 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 $P_{*H} = 3$ 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 Э.Д.С генератора передающей станции Г1:

$$E_1 = \sqrt{\left(U + \frac{Q_{H1} \cdot X_{C1}}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_{H1} \cdot X_{C1}}{U}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(0,999 + \frac{0,63 \cdot 1,12}{0,999}\right)^2 + \left(\frac{1,2 \cdot 1,12}{0,999}\right)^2} = 2,18,$$

Полученное значение Э.Д.С больше исходного значения $E_{10} = 2,15$.

Далее, сохраняя значение активной мощности $P_{20} = 1,8$, задаемся несколько увеличенным значением реактивной мощности $Q_{20} = 4,8$ 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 области устойчивой работы (вблизи точки 1 на рис. 2), т.е. режим существует.

По статической характеристике нагрузки (рис. 2) определяем значения $P_{\text{нагр}}(U) = 2,97$ при $U = 0,985$ и $P_{Н1} = P_{\text{нагр}}(U) - P_{20} = 2,97 - 1,8 = 1,17$. При этом, полученное значение $P_{\text{нагр}}(U)$ будет второй точкой искомой характеристики $P_{Н1}(U)$.

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 E_1 больше исходного значения $E_{10} = 2,15$.

Таблица 3

№ этапа расчета	$\frac{P_{20}}{Q_{20}}$	$\frac{Q_{C2}}{Q_{H2}}$	U	$\frac{P_{\text{нагр}}(U)}{Q_{\text{нагр}}(U)}$	$\frac{P_{Н1}}{Q_{Н1}}$	E_1	U	$\frac{P_{\text{нагр}}(U)}{P_{Н1}}$
1	$\frac{2,0}{4,79}$	$\frac{3,29}{1,5}$	1	$\frac{3,0}{2,25}$	$\frac{1}{0,75}$	2,15	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 исходного равного 2,15)
	$\frac{1,3}{5}$	$\frac{3,25}{1,75}$		0,877	$\frac{2,8}{1,97}$		
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 исходного равного 2,15)
	$\frac{1,35}{5}$	$\frac{3,27}{1,73}$		0,882	$\frac{2,79}{1,79}$		

По определению действительный предел статической устойчивости системы в случае нагрузки, заданной статическими характеристиками, определяется максимальным значением мощности передаваемой от генератора Г1 нагрузке при условии постоянства его Э.Д.С. Этому условию соответствует расчет этапа № 4 из табл. 3. Тогда, принимая $P_{Н1\max} \cong 1,41$, получим расчетное значение коэффициента запаса:

$$K_{з.р} = \frac{P_{Н1\max} - P_{Н1}}{P_{Н1}} \cdot 100\% = \frac{1,41 - 1}{1} 100\% = 41\%.$$

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.

5. Расчет статической устойчивости нагрузки, заданной статическими характеристиками.

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

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

При использовании критерия $\frac{dE_{\Sigma}}{dU} > 0$ целесообразно построить графики зависимости $E_{\Sigma} = f(U)$, задаваясь рядом значений напряжения на

шинах нагрузки U , для каждого из которых по статическим характеристикам нагрузки (рис. 2) определяют соответствующие значения мощностей P_* и Q_* в относительных единицах и вычисляют значение E_{Σ} по формуле:

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

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 $U_{Г}$ за сверхпереходной реактивностью.

Отметим, что оба рассматриваемые критерия в принципе равноценны. Однако критерий $\frac{dE_{\Sigma}}{dU} > 0$ более целесообразно связывать с «лавинной снижением 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_{Σ} , выдаваемая эквивалентной станцией с учетом потерь реактивной мощности в сети ΔQ , 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. генератора E_{Σ} 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. – это значение Э.Д.С. эквивалентного генератора, при котором 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.

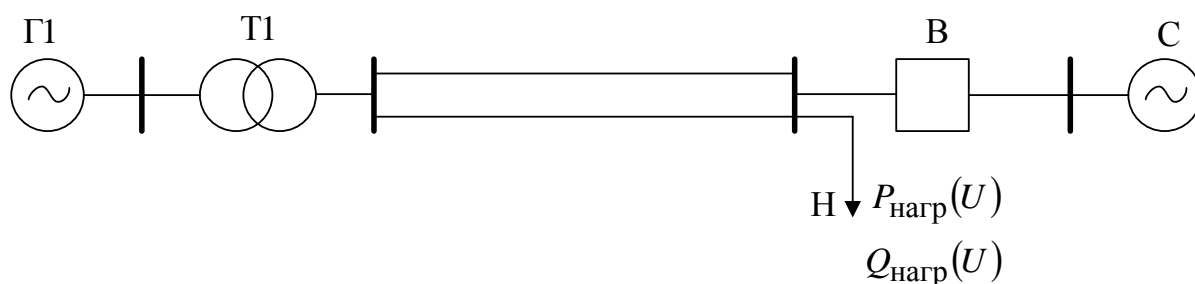


Рис. 9. Расчетная схема электропередачи примера 2.

Решение :

1) На генераторе отсутствует АРВ.

При расчете параметров элементов схемы замещения расчетной схемы на рис. 9 принимаем базисные условия примера 1. Схема замещения электропередачи исходного режима с указанными значениями параметров элементов показана на рис. 10.

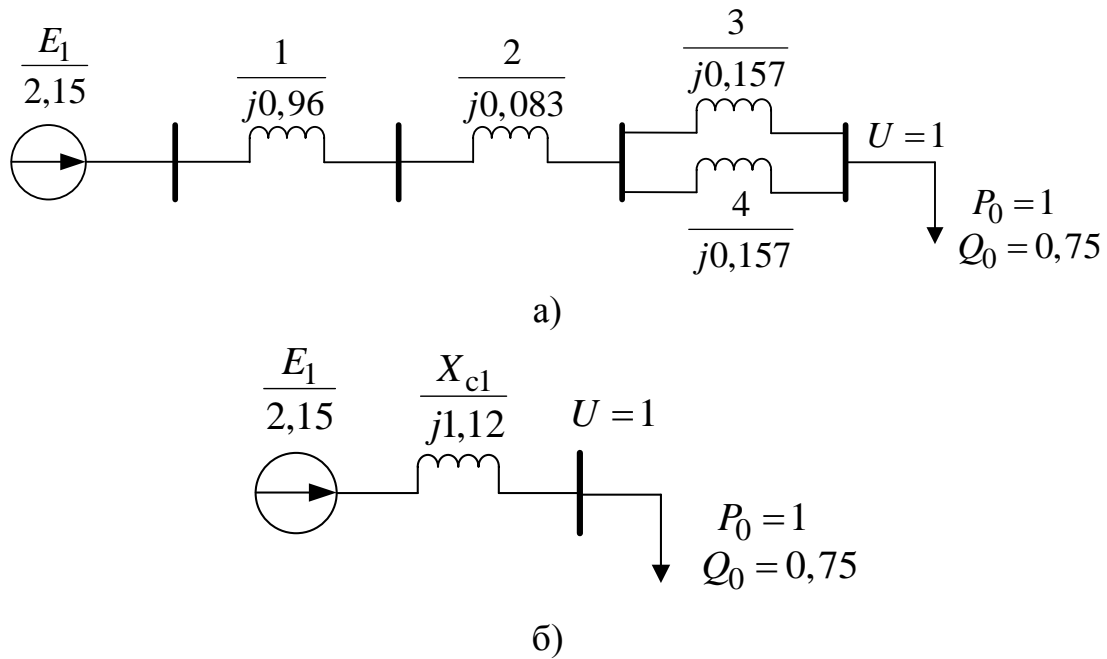


Рис. 10. Схемы замещения электропередачи исходного режима: а) - полная; б) - преобразованная.

Параметры исходного режима выбираем из примера 1 $U = 1$; $E_{\text{Э}} = E_1 = 2,15$. 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 $P_{*\text{нагр.Э}} = P_0 \cdot 0,96 = 1 \cdot 0,96 = 0,96$; $Q_{*\text{нагр.Э}} = Q_0 \cdot 0,93 = 0,75 \cdot 0,93 = 0,6975$. При этом значение эквивалентной Э.Д.С. $E_{\text{Э}}$ генератора передающей станции согласно (9) равно:

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

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

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

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

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

Значения эквивалентных Э.Д.С. E_{Σ} и реактивной мощности Q_{Σ} при других значениях напряжения приведены в табл. 4, а графики зависимостей $E_{\Sigma} = f(U)$ и $Q_{\Sigma} = f(E_{\Sigma})$ показаны на рис. 11.

Таблица 4

U	1,05	1,0	0,95	0,90	0,85	0,8	0,75
E_{Σ}	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

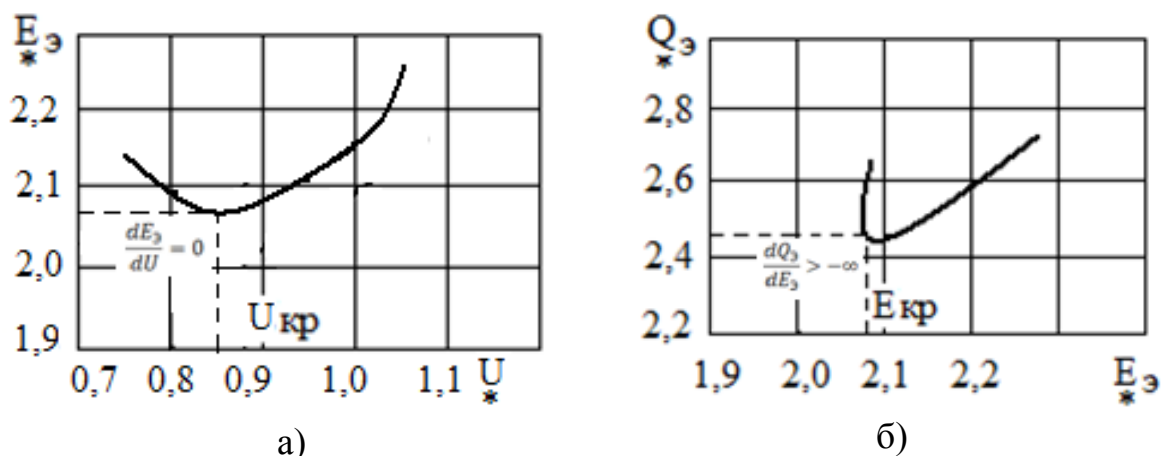


Рис. 11. Графики зависимостей: а) – $E_{\Sigma} = f(U)$, б) – $Q_{\Sigma} = f(E_{\Sigma})$ примера 2 при отсутствии АРВ.

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

$$K_{3,U} = \frac{U_0 - U_{\text{к.р}}}{U_0} 100\% = \frac{1 - 0,85}{1} 100\% = 15\%;$$

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

2) На генераторе установлено АРВ пропорционально действия.

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

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

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

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

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

Таблица 5

U	1,00	0,90	0,80	0,75	0,70	0,65
E_Δ	1,36	1,283	1,2006	1,18	1,174	1,23
Q_Δ	1,375	1,251	1,232	1,231	1,257	1,326

Расчетные значения коэффициентов запаса статической устойчивости нагрузки по напряжению и Э.Д.С. приведены ниже.

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

$$K_{з.Е} = \frac{E_0 - E_{к.р}}{E_0} 100\% = \frac{1,36 - 1,182}{1,36} 100\% = 13\%.$$

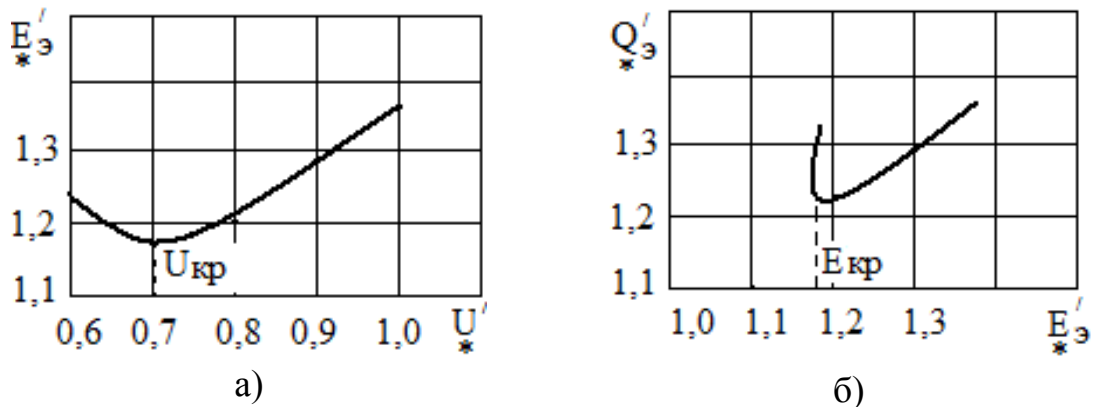


Рис. 12. Графики зависимости: а) – $E'_з = f(U)$, б) – $Q'_з = f(E'_з)$ примера 2 при наличии АРВ пропорционально действия.

6. 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 энергии, 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:

$$P = \frac{U_2 \cdot R_2 \cdot s}{(R_2)^2 + (X_{\delta} \cdot s)^2}, \quad (13)$$

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

$$P_{\max} = 0,5 \cdot U^2 \cdot X_{\sigma}; \quad s_{\text{кр}} = \frac{R_2}{X_{\sigma}}. \quad (14)$$

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:

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

В рассматриваемом 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 характеристики $Q_{\text{нагр}}(U)$ 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 $\frac{dQ_{\text{Э}}}{dE_{\text{Э}}} > -\infty$.

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

Для Г-образной схемы замещения АД реактивная мощность, потребляемая двигателем, состоит из мощностей намагничивания Q_μ 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_Σ для каждого значения напряжения по формуле (11) и рассчитав по выражению (9) эквивалентную ЭДС E_Σ .

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, параметры элементов и схема без цепи нагрузки повторяют данные примера 1;
2. Параметры нагрузки: трансформатор ТЗ – $S_H = 63 \text{ МВ} \cdot \text{А}$;
 $U_k = 12\%$; - коэффициент трансформации $K_T = \frac{110}{6,3}$;
3. Параметры асинхронного двигателя АД:
 $P_H = 50 \text{ МВт}$; $\cos \varphi = 0,8$; $X_\sigma = 0,25$; $R_2 = 0,0375$; $X_\mu = 2,25$.

Требуется:

1) При включенном выключателе В:

а) рассчитать критическое напряжение на шинах подстанции, при котором произойдет опрокидывание (замедление вращения ротора до полной остановки) 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 $\frac{dQ_\Sigma}{dE_\Sigma} > -\infty$).

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

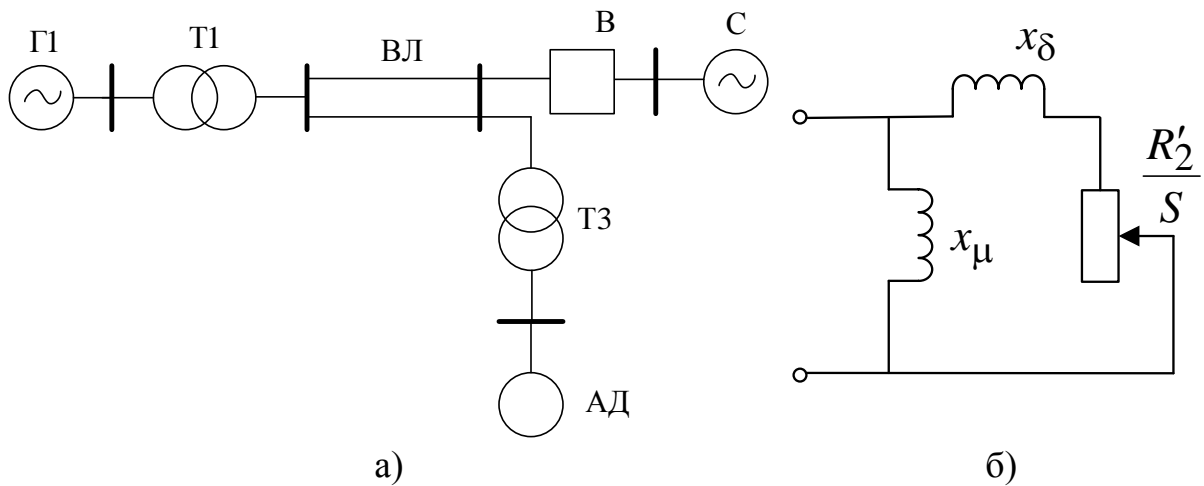


Рис. 13. Исследуемая система: а) - исходная система; б) - схема замещения.

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_{μ} цепи намагничивания АД перенесена в точку системы, где напряжение не зависит от режима работы эквивалентного асинхронного двигателя, т.е. на шины подстанции.

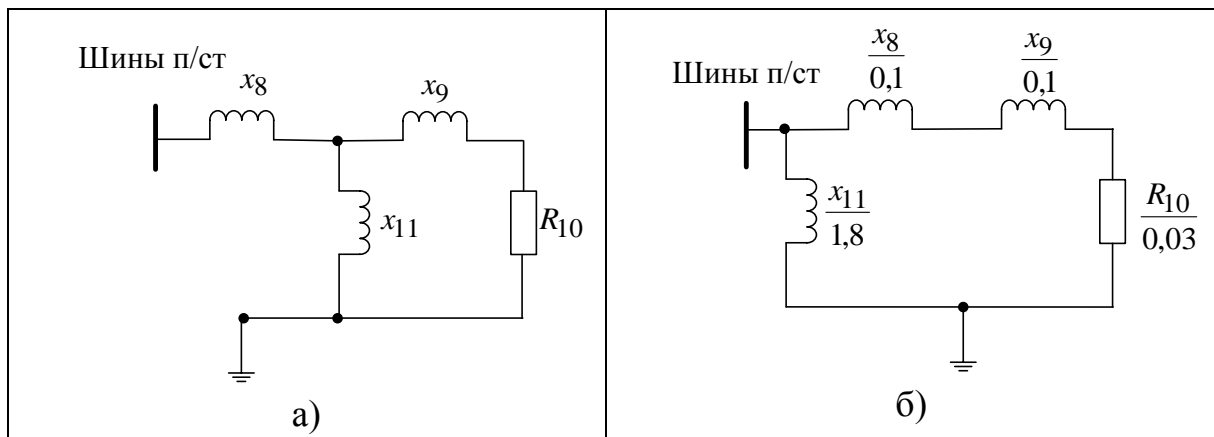


Рис. 14. Схема замещения узла нагрузки: а) - исходная; б) - упрощенная.

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

$$X_{\sigma} = \frac{U_{к} \cdot S_{\sigma}}{100 \cdot S_{H}} = \frac{12,6 \cdot 50}{100 \cdot 63} = 0,1;$$

$$X_{\vartheta} = X_{\sigma} \frac{S_{\sigma}}{S_{H}} = 0,25 \frac{S_{\sigma} \cos \varphi}{P_{H}} = 0,25 \frac{50 \cdot 0,8}{50} = 0,2;$$

$$R_{20} = \dot{R}_2 \frac{S_{\sigma}}{S_{H}} = \dot{R}_2 \frac{S_{\sigma} \cos \varphi}{P_{H}} = 0,0375 \frac{50 \cdot 0,8}{50} = 0,03;$$

$$X_{H} = X_{\mu} \frac{S_{\sigma}}{S_{H}} = X_{\mu} \frac{S_{\sigma} \cos \varphi}{P_{H}} = 2,25 \frac{50 \cdot 0,8}{50} = 1,8.$$

Суммарное сопротивление двигателя X_{σ} и внешнего сопротивления до точки системы, где принимается неизменным напряжение:

$$X_{\Sigma} = X_{\sigma} + X_{\vartheta} = 0,1 + 0,2 = 0,3.$$

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_{σ} подставляем X_{Σ} .

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

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:

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

Расчетное значение максимальной активной мощности при номинальном режиме (при $U = 1$) в соответствии с (14) будет (при замене X_σ на X_Σ):

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

Тогда коэффициент запаса по активной мощности согласно (15):

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

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 на 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

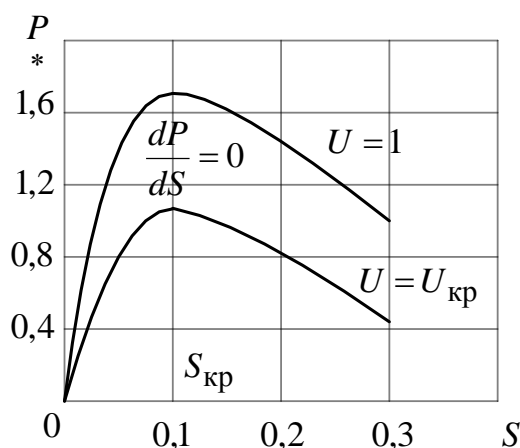


Рис. 15. Графики зависимости $P = f(s)$.

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. становится 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.

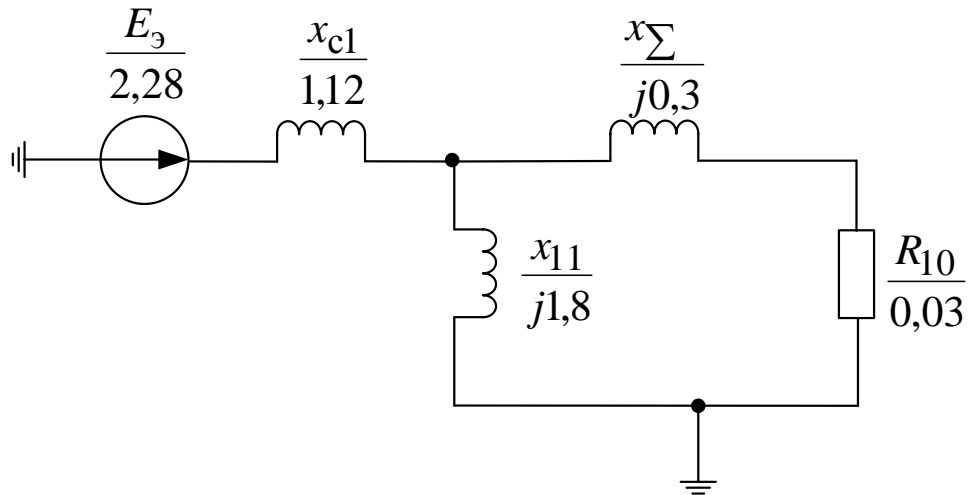


Рис. 16. Схема замещения исходного режима при выключении выключателя В.

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

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

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

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 $Q_{\text{дв.Э}}$, 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
$Q_{\text{дв.Э}}$	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

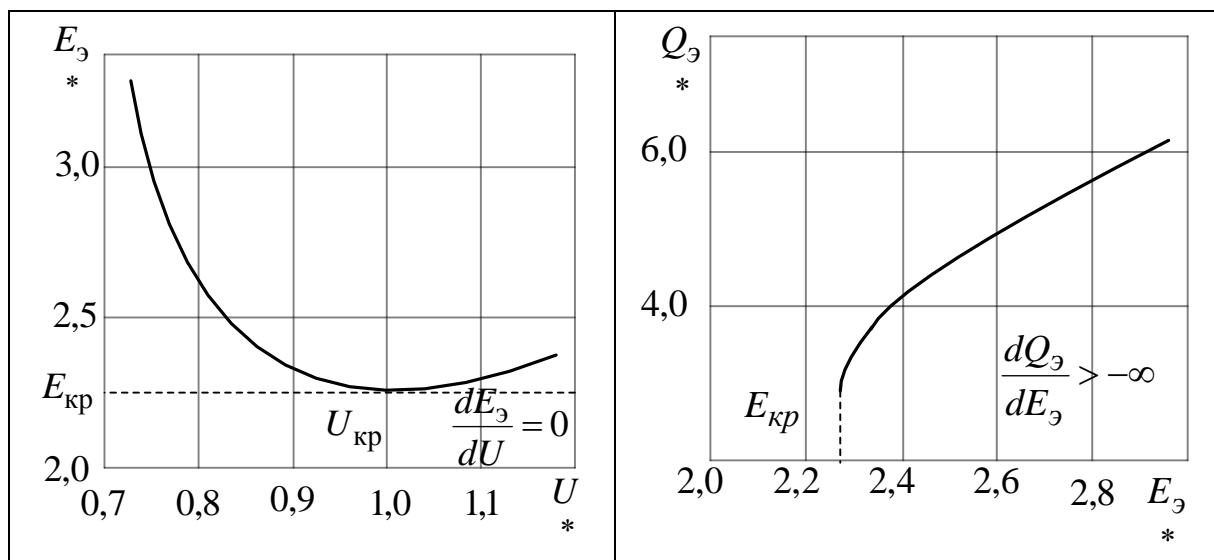


Рис.17. Графики для определения параметров критического режима:
а) - критического напряжения; б) - критической Э.Д.С.

Из рассмотрения графиков рис. 17 можно сделать вывод, что при разделении системы (отключения выключателя В) эквивалентный двига-

тель будет работать неустойчиво уже при номинальном напряжении на его шинах, так как $U_{кр} = 1$. Следовательно, запаса устойчивости по напряжению в этом случае нет.

7. 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 ΔM - 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_{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.;

γ – 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·м²;

$GD_{прив\ МХ}^2$ - приведённый к валу двигателя маховой момент механизма, т·м²;

n_0^2 - синхронная частота вращения магнитного поля статора, мин⁻¹
 (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⁻¹.

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 ΔM_{icp} в каждом интервале Δs_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 ΔM_{icp} можно также определить для каждого интервала по характеристике $\Delta M_{\Delta} = f(s)$ и $\Delta M_{MX} = f(s)$.

Пример 4. Для асинхронного двигателя заданы следующие параметры:

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

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

$$M_H = 1; \quad U_{ост} = 0,5.$$

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 $M_{\Delta} = f(s)$ 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

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

При посадке напряжения на шинах асинхронной машины от U_{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_{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 $M_{\text{MX}} = f(s)$:

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

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:

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

После преобразования получим:

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

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 Δs_i и, определяя значения приращения момента ΔM_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 ; $M_{\text{МХ}}$; ΔM и времени пуска $t_{\text{пуск}}$ приведены в таблице 9 и представлены графически на рис. 18.

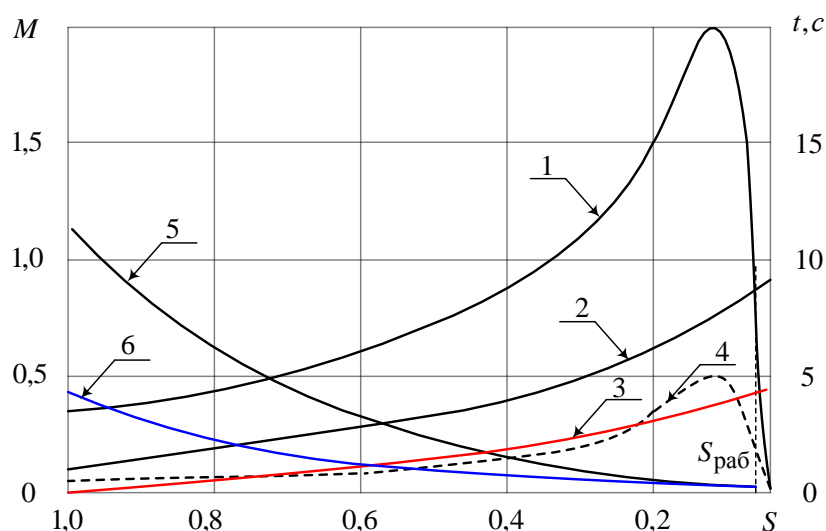


Рис. 18. Динамические характеристики АД примера 4: 1 – $M_{\text{э}} = f(s)$ при номинальном напряжении на шинах двигателя; 2 – $M_{\text{МХ}} = f(s)$; 3 – $t_{\text{пуск}} = f(s)$; 4 – $M_{\text{э}} = f(s)$ при посадке напряжения на зажимах; 5 – $t_{\text{выб}} = f(s)$ при посадке напряжения на зажимах;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

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

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. Крюčkова. – 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.

7. Жданов, П.С. «Вопросы устойчивости электрических систем». / П.С. Жданов. – М: Энергия, 1979. - 520с.