

**Лекция №10. Переходные процессы в узлах нагрузки.**  
**Устойчивость асинхронного двигателя.**

**Цель: изучить переходные процессы в узлах нагрузки и устойчивость асинхронного двигателя.**

Список литературы обязательный:

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. - М.: Высш. школа, 1985.- 482с.
2. Гамазин С.И., Семичевский П.И. Переходные процессы с электродвигательной нагрузкой. – М.: МЭИ, 1985.- 270с.

Список литературы дополнительный:

3. Электрические системы. Управление переходными режимами электрических систем./ Под ред. В.А.Веникова. – М.: Высш. школа, 1982. - 247с.
4. Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях./ Под ред. В.А.Веникова. – М.: Энергоатомиздат, 1983. 480с.

**План лекции:**

- 1. Виды и особенности переходных процессов в узлах нагрузки при малых возмущениях.**
- 2. Влияние регуляторов возбуждения, установленных на генераторах.**
- 3. Контрольные вопросы и задачи.**

Часть электроэнергетической системы, непосредственно осуществляющая снабжение электрической энергией потребителей, называется системой электроснабжения. Она содержит питающие и распределительные сети, трансформаторы, компенсирующие устройства (конденсаторы, синхронные компенсаторы) и устройства, в которых электрическая энергия используется в производственных или бытовых целях. Эти устройства обычно называются приемниками электрической энергии, нагрузками, потребителями. Места подключения отдельных систем электроснабжения к высоковольтным сетям электрических систем называются узлами нагрузок.

При нормальной работе систем электроснабжения и во время различных пусков и остановок оборудования происходят нормальные переходные процессы. Отключения отдельных элементов, короткие замыкания в них приводят к аварийным переходным процессам. Установившиеся режимы и переходные процессы в системах электроснабжения должны удовлетворять тем общим требованиям, которые сформулированы применительно к электрической системе в целом.

Переходные процессы в системах электроснабжения можно различать по виду у возмущений (малое, большое, длительное и т. д.), так же как это делалось для системы в целом.

В нормальном режиме системы при малых его возмущениях возникает необходимость проверки статической устойчивости синхронных двигателей, синхронных компенсаторов и больших групп асинхронных двигателей, которые, имея мощность, соизмеримую с мощностью питающих их генераторов, могут оказаться неустойчивыми, причем эта неустойчивость проявляется в виде специфического явления, называемого лавиной напряжения. Пуски двигателей, резкие колебания момента на их валу и т. д. приводят к изменениям значения и фазы напряжения в узлах нагрузки. Отклонения величин не должны превышать допустимых пределов. Влияние резких изменений режима двигателей обычно заметно проявляется в распределительных сетях в виде колебаний напряжения. Более медленные изменения режима двигателей, связанные с технологическими процессами, в которых двигатели участвуют, преимущественно отражаются на уровнях напряжения в питающих сетях (на отклонении напряжения). Такие нарушения режима, как короткие замыкания в элементах питательных сетей, отключения и повторные включения синхронных двигателей, самозапуск асинхронных двигателей после перерывов питания, самовозбуждение и самораскачивание двигателей при работе на емкостное сопротивление и т.д., могут существенно сказываться на режиме всей системы электроснабжения, поэтому переходные процессы в ее элементах рассматриваются не только с точки зрения обеспечения их надежности и устойчивости, но и с точки зрения обеспечения надежности всей системы электроснабжения.

#### **Виды и особенности переходных процессов в узлах нагрузки при малых возмущениях.**

При малых возмущениях в системах электроснабжения возникает необходимость проверки устойчивости синхронных генераторов и двигателей. При рассмотрении устойчивости узлов нагрузки приходится

учитывать те существенные особенности неустойчивости групп асинхронных двигателей, которые приводят к явлению, называемому лавиной напряжения.

**Лавина напряжения (статическая устойчивость нагрузки, опрокидывание двигателей).**

Асинхронные двигатели имеют большие запасы устойчивости и поэтому обеспечение статической устойчивости отдельных двигателей, входящих в нагрузку, не вызывает затруднений. Если запас устойчивости характеризовать отношением максимального вращающего момента к рабочему, то коэффициент запаса составит 1,5—1,7. Следовательно, даже значительные снижения напряжения на шинах двигателей не могут привести к нарушению их устойчивости. Однако это относится к единичному двигателю или группе двигателей, питаемых от шин напряжения, значение которого не зависит от режима двигателя. Если двигатель или группа двигателей питается от генератора или группы генераторов, замененных эквивалентным генератором соизмеримой мощности, то напряжение на шинах двигателя зависит от режима двигателя (от его скольжения). Условия нарушения устойчивости (опрокидывания) двигателя получаются при этом существенно иными. Рассмотрим схему системы, рис. 11.1, а, где сопротивление генератора  $x_g$ , сети  $x_c$  и двигателя  $x_s$  соизмеримы по величине. Представим схему замещения так, как показано на рисунке. Затем приближенно упростим ее переносом  $x_c$  к точке приложения э.д.с.  $E$ . Очевидно, что напряжение на шинах двигателя будет падать с ростом скольжения и соответственно ростом тока.

Вычислять вращающий момент удобнее не по измеряющемуся напряжению  $U = \varphi(s)$ , а по неизменному значению э.д.с.  $E$ . Максимальный вращающий момент в этом случае будет

$$M_{mE} = \frac{E^2}{2(x_g + x_c + x_s)}.$$

Величина  $M_m$ , определенная при  $E = \text{const}$ , будет значительно меньше, чем определенная при  $U = \text{const}$ :

$$M_{mU} = \frac{U^2}{2x_s} > M_{mE}.$$

Записанное выше выражение для  $M_{mE}$  получено как приближенной, соответственно грубому преобразованию из одной схемы в другую. Однако это обстоятельство не меняет общих качественных закономерностей.

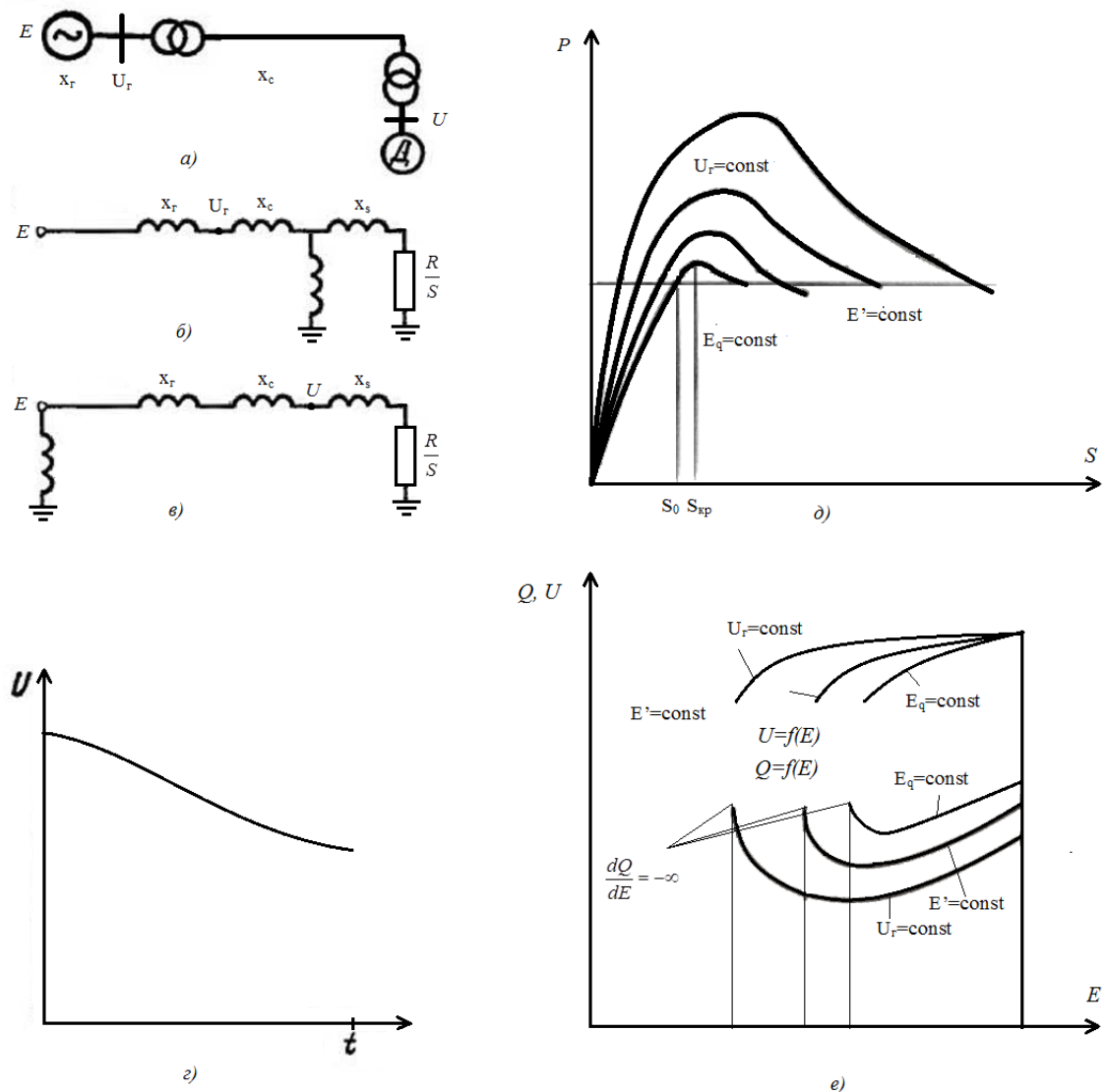


Рис. 12.1. Характеристики группы двигателей соизмеримой по мощности с питающим их генератором.

$$S_{кр} = \frac{R}{x_r + x_c + x_b}, E_q' = \text{const}$$

оказывается много меньше, чем критическое скольжение двигателя, определявшееся раньше \* как  $S_{кр} = \frac{R}{x_r}$ . Из этих соображений,

подтвержденных характеристиками, следует, что опрокидывание двигателя (или группы двигателя), питающегося от генератора соизмеримой мощности, может произойти при сравнительно небольших изменениях скольжения и небольших снижениях э.д.с., питающей эквивалентный двигатель, и тем более при небольших изменениях напряжения  $U$  (зависящего от режима двигателя).

Подчеркнем, что определение критических условий следует в этом случае проводить, исходя не из напряжения на зажимах двигателя, которое не является независимой переменной, а исходя из этой э.д.с. генератора  $E$ , которую в данных условиях можно считать не зависящей от изменений режима. Эта э.д.с. при различном способе регулирования генератора будет различной. В случае нерегулируемого генератора это будет э.д.с.  $E_q$ ; при обычных (пропорционального типа) регуляторах возбуждения -  $E_q = E'$ ; при регуляторах сильного действия -  $U_r$ . Соответствующие характеристики  $U = f(E)$  и  $Q = f(E)$  показаны на рисунке. Из характеристик видно, что снижение э.д.с.  $E$ , особенно в зоне, где  $\frac{dQ}{dE}$  отрицательно, приводит к росту реактивной мощности, соответственному увеличению токов, потребляемых двигателями нагрузки, и увеличению потерь напряжения в питающей сети, способствуя дальнейшему снижению напряжения.

Таким образом, вблизи режима опрокидывания двигателей процесс прогрессирующего снижения напряжения оказывается очень заметным. Персонал станции и системы не может судить непосредственно о росте токов роторов, статоров и скольжений двигателей, входящих в состав комплексной нагрузки в то время, когда они приближаются к опрокидыванию, но наблюдает резкое, лавинообразное снижение напряжения. Процесс этот поэтому и получил название лавины напряжения. Появлению лавины напряжения обычно предшествуют режимы при недостаточно высоком возбуждении генераторов или при увеличении реактивных сопротивлений связи. Получающееся при этом снижение реактивной мощности, приходящей к потребителю, заставляет персонал систем считать причиной лавины напряжения так называемый «дефицит реактивной мощности».

Количественное определение условий, в которых может возникнуть лавина напряжения, и определение запаса устойчивости двигателей могли бы производиться, исходя из схемы замещения, приведенной на рисунке, в. точно так же, как они определялись для единичного двигателя, только здесь вместо  $U$  будет фигурировать  $E$  и вместо  $x_b$  — значение  $x_{ta} = x_r + x_e + x_t$ .

Схема, изображенная на рисунке, о. могла бы соответствовать и более сложной системе с несколькими генераторами и нагрузками, если в этой системе все генераторы заменить одним эквивалентным генератором с постоянной э. д. с. и объединить все нагрузки в один эквивалентный двигатель. Однако, поскольку нагрузка электрических систем обычно состоит из различного рода потребителей электрической энергии и асинхронные двигатели составляют в ней только некоторую (хотя и значительную) долю, определить параметры эквивалентного двигателя было

бы затруднительно.

Оказывается, более удобно вместо критерия устойчивости  $\frac{dP}{dU} = 0$  или эквивалентного ему критерия  $\frac{dQ}{dU} = -\infty$ , полученных в гл. IV для одиночного двигателя, воспользоваться так называемой вторичным критерием устойчивости  $\frac{dE}{dU} = 0$ . Смысл этого критерия пояснен на рисунке, где в соответствии с данными гл. IV показано, что при снижении напряжения на шинах двигателя до значения  $U_{кр}$ , отвечающего границе устойчивого режима, производная от эквивалентной э.д.с.  $E_a$  по напряжению проходит через нуль. Таким образом, для нарушения устойчивости характерны три соотношения:

$$\frac{dE}{dU} = 0; \quad \frac{dQ}{dE} = -\infty; \quad \frac{dP}{ds} = 0.$$

В справедливости этого положения легко убедиться, исходя из эквивалентной схемы, если напряжение на зажимах комплексной нагрузки рассматривать как величину, зависящую от режима двигателя, а эквивалентную э. д. с  $E = E_g$  - как независимую переменную. При этом условии между напряжением на зажимах и эквивалентной э. д. с. существует очевидное соотношение

$$U = \sqrt{\left(E - \frac{Q_g \cdot x_g}{E_g}\right)^2 + \left(\frac{P \cdot x_g}{E_g}\right)^2} \approx E_g - \frac{Q_g \cdot x_g}{E_g}.$$

Здесь значения  $Q_g$  являются значениями внутренней реактивной мощности генератора.

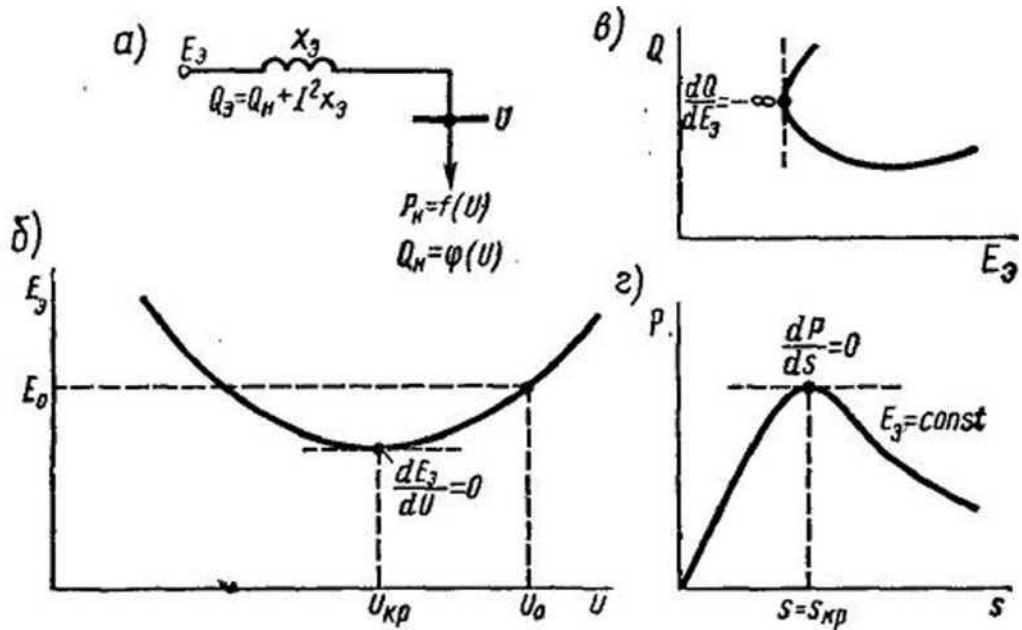


Рис. 12.2. Критерии устойчивости нагрузки.

**Проверка устойчивости нагрузки по критерию  $dE/dU$ .** Она начинается с построения зависимости  $E_3 = f(U)$ . Предварительно задаются рядом значений напряжения  $U$ , для каждого из которых по характеристикам нагрузки находят соответствующие значения  $P_n$ ,  $Q_n$ , а затем строят зависимость  $E_3 = f(U)$ .

Запас устойчивости нагрузки определяется как отношение  $[(U_0 - U_{кр})/U_0] \cdot 100\%$ , где

$U_0$  — рабочее напряжение, а  $U_{кр}$  — значение критического напряжения, при котором  $dE/dU = 0$ .

Генераторы без АРВ замещаются э. д. с.  $E_q$ , а генераторы при АРВ — э. д. с.  $E_x$ , приложенной за сопротивлением  $A_x$ , причем при АРВ с. д.  $A_x = 0$  и э. д. с.  $E_x = U_r$ .

**Проверка устойчивости нагрузки по критерию  $d\Delta Q/dU > 0$ .** При расчетах устойчивости нагрузки в системе, имеющей нагрузку, сосредоточенную в узловой точке  $\Delta Q = \sum Q_n - \sum Q_r$  удобно воспользоваться практическим критерием:  $d\Delta Q/dU > 0$ , тогда

Задаваясь напряжением на шинах  $U$ , можно построить характеристику мощности  $\sum Q_r = f(U)$  притекающей в узловую точку, и характеристику суммарной мощности нагрузки  $\sum Q_n = f(U)$

Разумеется, для схемы, представленной на рисунке, а. также можно применить критерий  $d\Delta Q/dU > 0$ , рассматривая любую точку схемы как узловую и строя зависимость подходящего к ней потока мощности  $\sum Q_r$  и потока мощности, отходящего от нее в нагрузку. Именно построением

характеристик  $\Delta Q = f(U)$  можно наиболее просто и наглядно выявить факторы, благоприятно или отрицательно влияющие на устойчивость нагрузки.

**Влияние регуляторов возбуждения, установленных на генераторах.** Представляя группу генераторов станции одним эквивалентным отражаем эффект регулирования в характеристике

$$\sum Q_p = f(U) = \left(\frac{EU}{x_\Sigma}\right) \cos \delta - \frac{U^2}{x_\Sigma}$$

уменьшением  $x_\Sigma$  и э. д. с.  $E$ .

Эта характеристика при АРВ идет так, что коэффициент запаса устойчивости  $k_2$  оказывается больше, чем коэффициент запаса в нерегулируемой системе:

$$k_2 = \frac{|U_{кр2} - U_0|}{U_0} > k_1 = \frac{|U_{кр1} - U_0|}{U_0} \text{ где } U_{кр1}, U_{кр2} \text{ определены согласно}$$

характеристикам критического режима.

Влияние включения в нагрузку конденсаторов. Конденсаторы улучшают  $\cos \phi$  и обеспечивают поддержание напряжения при изменении режима, что может резко ухудшать устойчивость. В этом случае в составе мощности нагрузки появилась отрицательная составляющая  $\sum U_G^2 / x_C$  и суммарная кривая оказалась пологой. В  $\sum Q_H = f(U)$  свою очередь, э. д. с. эквивалентного генератора при включении конденсаторов уменьшается, что приводит к деформации характеристики  $\sum Q_r$ . В результате запас устойчивости нагрузки при включении конденсаторов уменьшается от значений

$$k_1, \dots, k_3, \text{ где } k_1 = |U_{кр1} - U_0| / U_0 \text{ до } k_4 = |U_{кр4} - U_0| / U_0$$

или нагрузка становится неустойчивой.

Исправить это положение можно, применяя одновременно с улучшением  $\cos \phi$  статическими конденсаторами регулирование возбуждения на генераторах и увеличивая в составе нагрузки число синхронных двигателей с регулированием возбуждения.



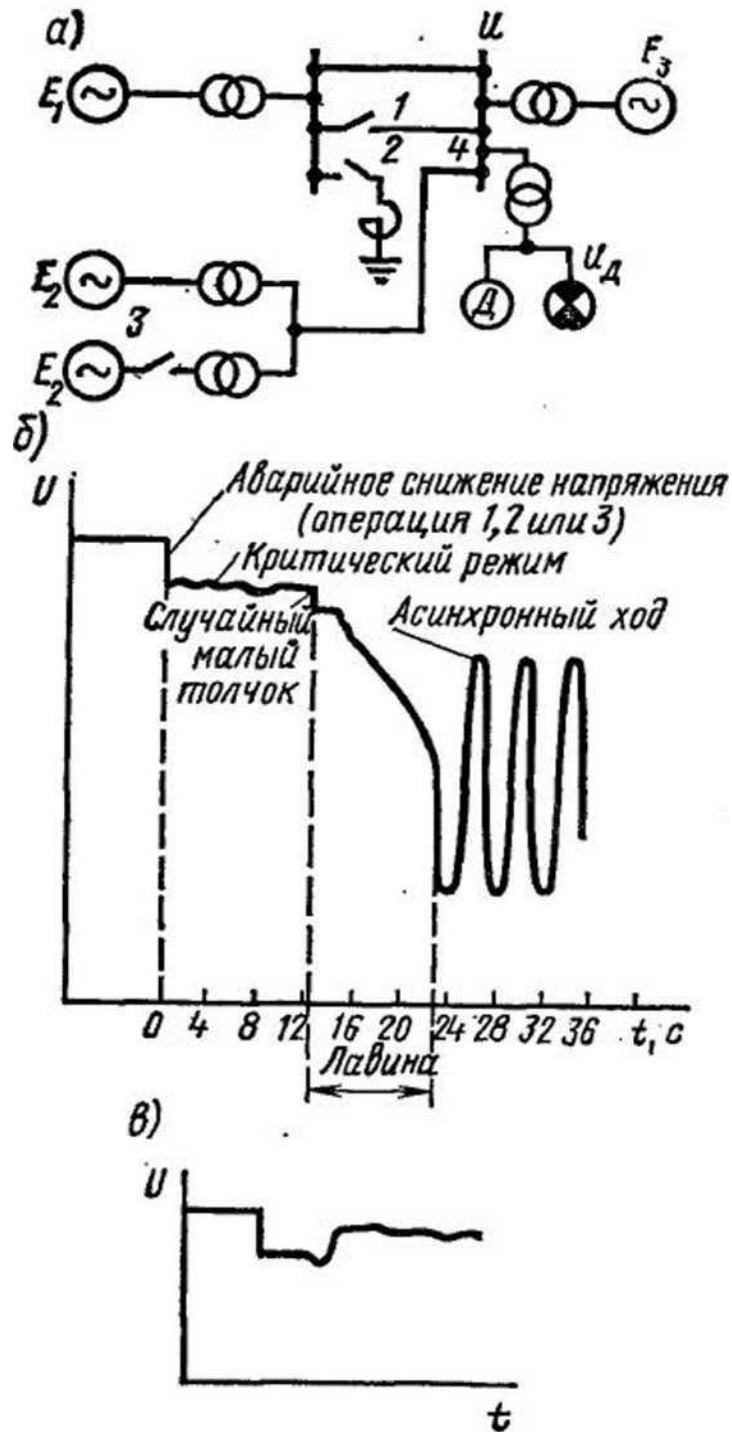


Рис. 12.3. Пример протекания процесса нарушения устойчивости нагрузки, подключенной в точке 4 схемы (лавины напряжения):  
 а — схема системы и изменения, вызывающие лавину напряжения; отключение цепи 1, включение значительной реактивной нагрузки 2, отключение части генераторов 3;  
 б — возникновение и характер протекания процесса при отсутствии АРВ;

$v$  — то же, но при форсировании возбуждения регуляторами

### Контрольные вопросы

1. Как называется часть электроэнергетической системы, которая осуществляет непосредственное снабжение потребителей электрической энергии. Какие устройства она содержит?
2. Как называются места подключения отдельных систем электроснабжения к высоковольтным сетям электрических систем?
3. Какие переходные процессы происходят в системах электроснабжения, при нормальной работе оборудования и при коротком замыкании?
4. На какие основные три вида могут быть разделены переходные процессы?
5. В каком режиме при малых возмущениях возникает необходимость проверки статической устойчивости синхронных двигателей?
6. В каких случаях напряжение зависит от режима работы двигателя?
7. Каким процессам, предшествуют режимы при недостаточно высоком возбуждении генераторов или при увеличении реактивных сопротивлений связи?
8. К чему приводит включение конденсаторов в нагрузку?
9. Что подразумевается под возмущениями энергосистемы?
10. На какие два вида разделяются возмущающие воздействия?

### Задачи

1. Пять однотипных асинхронных двигателей насосной станции через линию электропередачи номинальным напряжением  $6 \text{ кВ}$  подключены к трансформатору главной понизительной подстанции. Параметры элементов системы электроснабжения:

- двигатель АД:  $P_n = 0,8 \text{ МВт}$ ,  $P_0 = 0,7 \text{ МВт}$ ,  $\cos\varphi_0 = 0,9$ , кратность максимального момента  $b_m = 2$ ;
- линия:  $x_0 = 0,38 \text{ Ом/км}$ ,  $l = 5 \text{ км}$ ;
- трансформатор Т:  $S_{um} = 25 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ,  $U_k = 11\%$
- напряжение на шинах двигателей:  $U = 6 \text{ кВ}$ .

Требуется определить критическое напряжение на шинах питающей системы.

2. Пять однотипных асинхронных двигателей насосной станции через линию электропередачи номинальным напряжением 8 кВ подключены к трансформатору главной понизительной подстанции. Параметры элементов системы электроснабжения:

- двигатель АД:  $P_n = 0,6 \text{ МВт}$ ,  $P_0 = 0,9 \text{ МВт}$ ,  $\cos\varphi_0 = 0,5$  кратность максимального момента  $b_m = 2$ ;

- линия:  $x_0 = 0,58 \text{ Ом/км}$ ,  $l = 5 \text{ км}$ ;

- трансформатор Т:  $S_{um} = 35 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ,  $U_k = 13\%$

-напряжение на шинах двигателей:  $U = 8 \text{ кВ}$ .

Требуется определить критическое напряжение на шинах питающей системы.

3. Пять однотипных асинхронных двигателей насосной станции через линию электропередачи номинальным напряжением 9 кВ подключены к трансформатору главной понизительной подстанции. Параметры элементов системы электроснабжения:

- двигатель АД:  $P_n = 0,4 \text{ МВт}$ ,  $P_0 = 0,8 \text{ МВт}$ ,  $\cos\varphi_0 = 0,6$  кратность максимального момента  $b_m = 3$ ;

- линия:  $x_0 = 0,58 \text{ Ом/км}$ ,  $l = 10 \text{ км}$ ;

- трансформатор Т:  $S_{um} = 20 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ,  $U_k = 20\%$

-напряжение на шинах двигателей:  $U = 6 \text{ кВ}$ .

Требуется определить критическое напряжение на шинах питающей системы.

4. Пять однотипных асинхронных двигателей насосной станции через линию электропередачи номинальным напряжением 10 кВ подключены к трансформатору главной понизительной подстанции. Параметры элементов системы электроснабжения:

- двигатель АД:  $P_n = 0,75 \text{ МВт}$ ,  $P_0 = 0,85 \text{ МВт}$ ,  $\cos\varphi_0 = 0,65$  кратность максимального момента  $b_m = 3$ ;

- линия:  $x_0 = 0,48 \text{ Ом/км}$ ,  $l = 10 \text{ км}$ ;

- трансформатор Т:  $S_{um} = 35 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ,  $U_k = 12\%$

-напряжение на шинах двигателей:  $U = 8 \text{ кВ}$ .

Требуется определить критическое напряжение на шинах питающей системы.

5. Три однотипных асинхронных двигателей насосной станции через линию электропередачи номинальным напряжением 10 кВ подключены к трансформатору главной понизительной подстанции. Параметры элементов системы электроснабжения:

- двигатель АД:  $P_n = 0,95 \text{ МВт}$ ,  $P_0 = 0,9 \text{ МВт}$ ,  $\cos\varphi_0 = 0,25$  кратность максимального момента  $b_M = 4$ ;

- линия:  $x_0 = 0,68 \text{ Ом/км}$ ,  $l = 10 \text{ км}$ ;

- трансформатор Т:  $S_{нт} = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ,  $U_k = 20\%$

-напряжение на шинах двигателей:  $U = 9 \text{ кВ}$ .

Требуется определить критическое напряжение на шинах питающей системы.

