Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина

Уральский энергетический институт
Кафедра «Автоматизированные электрические системы»
Кафедра «Электротехника»

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ТРАНСФОРМАТОРОВ

Методические указания
к курсовому проекту по модулю «Основы теории электрических машин»
для студентов направления 13.03.02 - «Электроэнергетика и электротехника»
ускоренной дистанционной заочной формы обучения

Екатеринбург
2020

УДК 321.312

Составитель: **Н.Н. Новиков**
Научный редактор: проф., д.т.н. **А.В. Паздерин**

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ТРАНСФОРМАТОРОВ: Методические указания к курсовому проекту по модулю «Основы теории электрических машин» / Н.Н.Новиков. Екатеринбург: УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, 2020. 43 с.

Методические указания содержат описание математических моделей основных типов электрических машин и трансформаторов, участвующих в процессе преобразования энергии в электрической системе. Приводятся их основные характеристики, методика и пример расчета установившихся режимов. Даются варианты заданий для выполнения курсового проекта по модулю «Основы теории электрических машин» студентами ускоренной заочной формы обучения по направлению 13.03.02 - «Электроэнергетика и электротехника» и траектории «Электроэнергетические системы и сети».

Библиогр.: 8 назв. Рис. 29. Табл. 10.

Подготовлено
кафедрами «Автоматизированные электрические системы», «Электротехника».

© ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2020

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В любой электрической системе основными силовыми элементами, участвующими в процессе преобразования энергии, являются электрические машины. Производство электрической энергии осуществляется синхронными генераторами на тепловых, атомных и гидроэлектростанциях или на автономных установках с дизельными двигателями и газовыми турбинами. Экономичная передача электрической энергии на большие расстояния возможна через воздушные и кабельные линии высокого напряжения. Для этой цели, а также для последующего распределения энергии между отдельными группами потребителей служат повышающие и понижающие трансформаторы. Среди потребителей электрической энергии существенную долю составляет двигательная нагрузка, состоящая в основном из асинхронных двигателей. При большой протяженности линии электропередачи и слабой связи с системой целесообразно использование синхронных двигателей, способствующих поддержанию постоянства напряжения в узле нагрузок путем регулирования реактивной мощности. Такую же роль выполняет и синхронный компенсатор, который устанавливают на крупных подстанциях с большими колебаниями напряжения.

Оценку работы электрических машин в описанной выше системе можно дать на основе анализа установившихся режимов их работы. Интерес при этом представляет влияние на работу электрических машин параметров сети, например, протяженности линий электропередачи, и наоборот, влияние самих машин на режимные параметры сети, в частности, на напряжения в различных точках. На рис. 1 изображена принципиальная электрическая схема электроснабжения группы потребителей, содержащая n асинхронных двигателей $АД_1$, $АД_2$, … $АД_n$, m синхронных двигателей $СД_1$, $СД_2$,… $СД_m$ и статическую нагрузку СН.

Узел нагрузки связан с шинами генераторного напряжения ШГ двухцепной линией

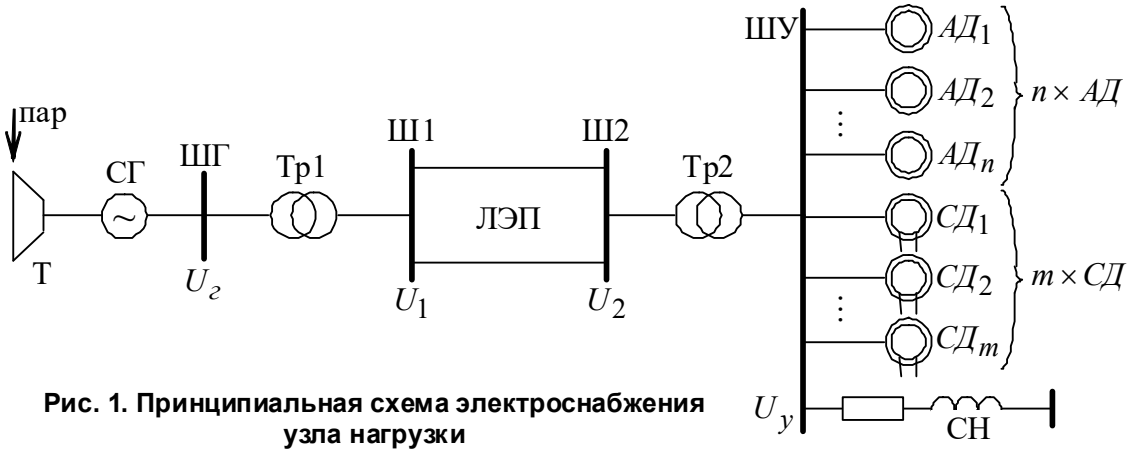


Рис. 1. Принципиальная схема электроснабжения узла нагрузки

передачи и двумя трансформаторами Тр1 и Тр2. В качестве источника энергии выбран синхронный турбогенератор СГ, преобразующий механическую энергию паровой турбины Т. Для упрощения расчетов будем считать все асинхронные двигатели и все синхронные двигатели одинаковыми и имеющими один и тот же рабочий механизм. Это позволит достаточно просто представить двигатели их эквивалентным аналогом, увеличив мощность и токи *АД* в n раз, а *СД* в m раз. На рис. 2 представлена эквивалентная схема электроснабжения.

Будем также считать, что асинхронный двигатель имеет короткозамкнутый ротор и его рабочим механизмом служит подъемное устройство с постоянным внешним моментом. Синхронный двигатель имеет явнополюсную конструкцию ротора и работает на насосную установку, внешний момент которой зависит от частоты вращения ротора. Однако, так как частота вращения ротора *СД* остается в синхронном режиме неизменной, то в дальнейшем при расчетах внешний момент нагрузки будет считаться постоянным. Сопротивление кабельных линий принимается нулевым, учитываться будет лишь воздушная ЛЭП протяженностью l *км*.

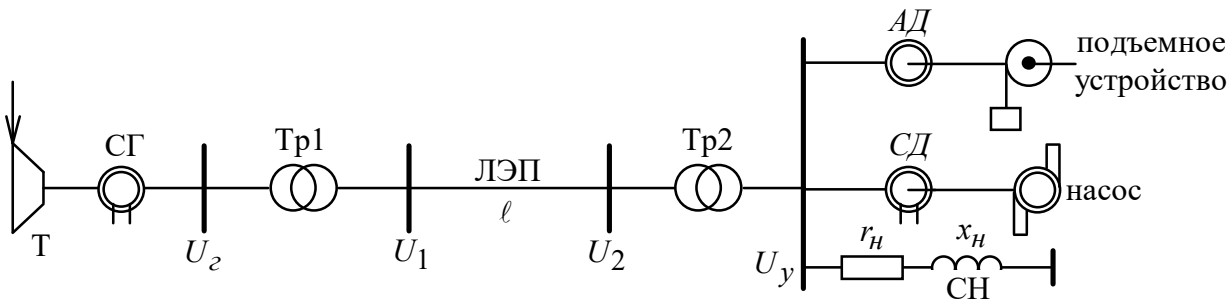


Рис. 2. Эквивалентная схема электроснабжения узла нагрузки

Основными задачами курсового проекта являются:

– изучение и описание конструкции электромагнитного ядра асинхронного двигателя, синхронных машин и трансформаторов;

– определение параметров расчетной схемы по каталожным данным;

– расчет установившегося режима узла и сети при номинальной нагрузке электрических двигателей и номинальном напряжении узла;

– расчет характеристик силовых элементов сети.

2. РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ

Для решения поставленных задач необходимо составить общую расчетную схему электрической системы. Она включает в себя расчетные модели установившегося режима синхронного генератора, трансформатора, линии электропередачи, асинхронного двигателя, синхронного двигателя и статической нагрузки. Анализ режимов силового оборудования и сети будет проводиться с помощью уравнений, записанных в комплексной форме, и с помощью векторных диаграмм.

2.1. Основные соотношения в активно-индуктивном элементе сети

Рассмотрим сначала векторную диаграмму и процессы в наиболее простой схеме, состоящей из последовательно соединенных активного и индуктивного сопротивлений (рис. 3). В соответствии со вторым законом Кирхгофа можно записать следующее уравнение электрического равновесия: $\dot{U}_1 - \dot{U}_2 = r\dot{I} + jx\dot{I}$. Выразив его в явном виде относительно напряжения 2-го узла, получим: $\dot{U}_2 = \dot{U}_1 - r\dot{I} - jx\dot{I}$. Этому уравнению соответствует векторная диаграмма, представленная на рис. 4. Как следует из векторной диаграммы, в общем случае фазовый сдвиг тока относительно напряжения в различных узловых точках цепи будет неодинаковым $\varphi_1 \neq \varphi_2$. Это обуславливает различие энергетических потоков в разных сечениях цепи. Так, в 1-ом узле полная мощность $S_1 = U_1 I$ оказывается больше полной мощности 2-го узла. Для установления соотношений между активными и реактивными мощностями воспользуемся двумя дополнительными векторными диаграммами, на которых ток представлен своими реактивными и активными проекциями на соответствующие векторы напряжения (рис. 5).

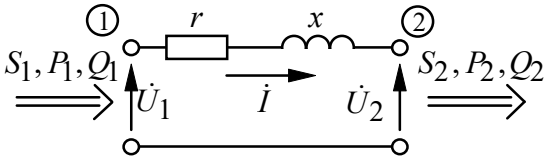


Рис. 3. Схема *r-x* элемента

Выведем уравнения для потоков мощности P_1 и Q_1, проходящих через 1-ый узел. Из векторной диаграммы рис. 5, *а* имеем

$$\begin{cases} \overline{bc} = \overline{af} + \overline{fe} \\ \overline{cd} = \overline{ob} - \overline{oa} - \overline{ed} \end{cases}$$

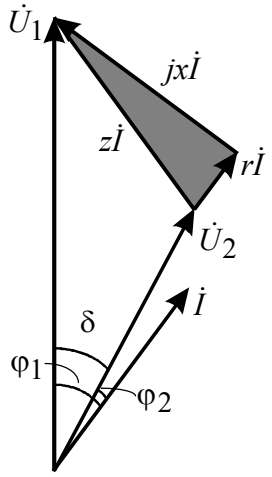
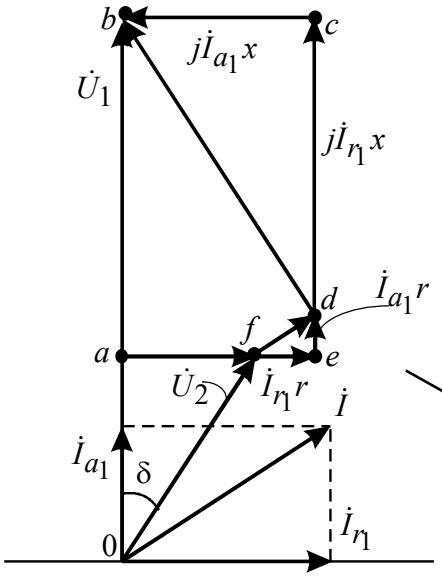
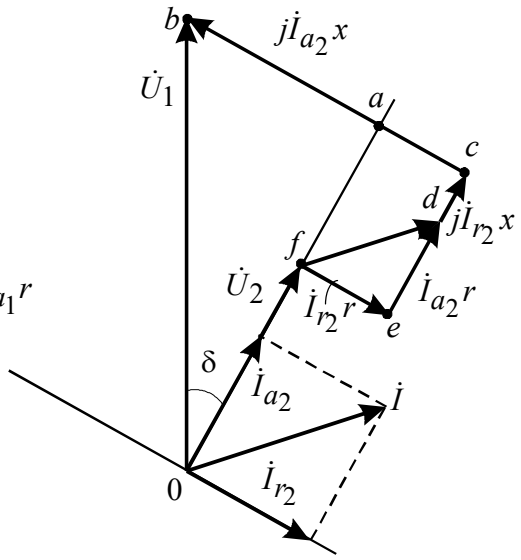


Рис. 4. Векторная диаграмма напряжений



а) узел 1



б) узел 2

Рис. 5. К определению энергетических соотношений

Заменив отрезки векторной диаграммы на соответствующие им падения напряжения, получим

$$\begin{cases} I_{a_1}x = U_2\sin\delta + I_{r_1}r \\ I_{r_1}x = U_1 - U_2\cos\delta - I_{a_1}r. \end{cases}$$

Умножим первое и второе уравнения на U_1/x:

$$\begin{cases} U_1 I_{a_1} = \dfrac{U_1U_2}{x}\sin\delta + U_1 I_{r_1}\dfrac{r}{x} \\ U_1 I_{r_1} = \dfrac{U_1^2}{x} - \dfrac{U_1U_2}{x}\cos\delta - U_1 I_{a_1}\dfrac{r}{x}. \end{cases}$$

Так как $P_1 = U_1 I_{a_1}$ и $Q_1 = U_1 I_{r_1}$, то окончательно получим

$$\begin{cases} P_1 = \dfrac{U_1U_2}{x}\sin\delta + Q_1\dfrac{r}{x} \\ Q_1 = -\dfrac{U_1U_2}{x}\cos\delta - P_1\dfrac{r}{x} + \dfrac{U_1^2}{x}. \end{cases} \qquad (1)$$

Проведя аналогичные операции для второго узла (рис. 5, *б*), найдем выражения для P_2 и Q_2:

$$\begin{cases} \overline{bc} = \overline{ab} + \overline{ef} \\ \overline{cd} = \overline{oa} - \overline{of} - \overline{ed} \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_{a_2}x = U_1\sin\delta + I_{r_2}r \\ I_{r_2}x = U_1\cos\delta - U_2 - I_{a_2}r. \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_2 I_{a_2} = \dfrac{U_1U_2}{x}\sin\delta + U_2 I_{r_2}\dfrac{r}{x} \\ U_2 I_{r_2} = \dfrac{U_1U_2}{x}\cos\delta - \dfrac{U_2^2}{x} - U_2 I_{a_2}\dfrac{r}{x}. \end{cases}$$

И, наконец,
$$\begin{cases} P_2 = \dfrac{U_1 U_2}{x}\sin\delta + Q_2\dfrac{r}{x} \\ Q_2 = \dfrac{U_1 U_2}{x}\cos\delta - P_2\dfrac{r}{x} - \dfrac{U_2^2}{x}. \end{cases} \qquad (2)$$

Уравнения (1), (2) называются угловыми характеристиками активной и реактивной мощностей и являются фундаментальными расчетными соотношениями в R–X элементе. Однако они не всегда удобны для расчета режимов в сети, т. к. необходимо знать оба вектора напряжений в узлах и фазовый сдвиг между ними. Поэтому дополним эти уравнения выражениями для режимных параметров одного узла, определяемыми через известные режимные параметры другого узла.

Если известны U_2, P_2, Q_2, то тогда, в соответствии с выбранным положительным направлением тока (рис. 3) от 1-го ко 2-му узлу, получим

$$\begin{cases} P_1 = P_2 + I^2 r; \\ Q_1 = Q_2 + I^2 x; \\ U_1 = \dfrac{S_1}{I}. \end{cases}$$

Учитывая, что $I = S_2/U_2$ и $S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2}$, окончательно найдем

$$\begin{cases} P_1 = P_2 + \dfrac{S_2^2}{U_2^2} r; \\ Q_1 = Q_2 + \dfrac{S_2^2}{U_2^2} x; \\ S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2}; \\ U_1 = \dfrac{S_1}{S_2} U_2. \end{cases} \qquad (3)$$

Аналогично рассуждая, получим выражения для режимных параметров 2-го узла при известных U_1, P_1, Q_1

$$\begin{cases} P_2 = P_1 - \dfrac{S_1^2}{U_1^2} r; \\ Q_2 = Q_1 - \dfrac{S_1^2}{U_1^2} x; \\ S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2}; \\ U_2 = \dfrac{S_2}{S_1} U_1. \end{cases} \qquad (4)$$

Полученные соотношения являются удобными при расчете режимов работы силовых элементов сети тогда, когда в качестве исходных или искомых используются не токи, а потоки мощности, что наиболее часто встречается в практике инженерных расчетов электрических сетей.

2.2. Схема замещения статической нагрузки

Под статической нагрузкой будем понимать такую нагрузку, в состав которой не входят электромеханические преобразователи, а основную долю составляют осветительные и нагревательные приборы. Такую нагрузку можно представить в виде активного сопротивления $r_н$ и небольшого индуктивного сопротивления $x_н$, включенными между собой последовательно (рис. 6). Параметры нагрузки часто зависят от величины напряжения, однако, при небольших отклонениях напряжения их можно считать неизменными. Обычно статическая нагрузка задается величиной потребляемой активной и реактивной мощностей $P_н$ и $Q_н$. Для определения электрических параметров $r_н$ и $x_н$ схемы замещения воспользуемся следующими формулами:

$$\begin{cases} P_н = 3 \cdot I_ф^2 \cdot r_н = 3 \cdot \left(\dfrac{S_н}{\sqrt{3} \cdot U_л} \right)^2 \cdot r_н = \dfrac{S_н^2}{U_л^2} \cdot r_н \\ Q_н = 3 \cdot I_ф^2 \cdot x_н = 3 \cdot \left(\dfrac{S_н}{\sqrt{3} \cdot U_л} \right)^2 \cdot x_н = \dfrac{S_н^2}{U_л^2} \cdot x_н \end{cases}$$

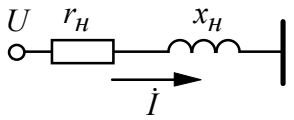


Рис. 6. Схема замещения статической нагрузки

Отсюда получим значения сопротивлений в [*Ом*]:

$$r_н = P_н \cdot \frac{U_л^2}{S_н^2}; \quad x_н = Q_н \cdot \frac{U_л^2}{S_н^2}.$$

При проведении инженерных расчетов в сетях с различным уровнем номинального напряжения электрооборудования используют систему относительных единиц. Для статической нагрузки в качестве базисных единиц удобно выбрать номинальные значения полной мощности, фазного тока и фазного напряжения:

$$S_б = S_н; \quad I_б = I_{нф}; \quad U_б = U_{нф}.$$

При соединении нагрузки в «звезду»: $U_б = \dfrac{U_л}{\sqrt{3}}; \quad I_б = \dfrac{S_б}{3U_б}.$

Тогда связь между величинами в *о.е.* и в физических единицах будет определяться формулами:

$$S^* = S/S_б; \quad I^* = I/I_б; \quad U^* = U/U_б; \quad P^* = P/P_б; \quad Q^* = Q/Q_б.$$

Для определения параметров схемы замещения в *о.е.* необходимо найти базисное сопротивление СН

$$z_б = U_б/I_б = 3U_б^2 \big/ S_б = U_л^2 \big/ S_б = U_л^2 \big/ S_н;$$

$$r_н^* = r_н/z_б = P_н \big/ S_н = P_н^*;$$

$$x_н^* = x_н/z_б = Q_н \big/ S_н = Q_н^*.$$

Как видно из формул, $r_н$ и $x_н$ в *о.е.* определяются достаточно просто через относительные значения $P_н^*$ и $Q_н^*$.

2.3. Схема замещения линии электропередачи

В рамках поставленной задачи связь между генератором и узлом нагрузки осуществляется посредством воздушной линии электропередачи. Полная схема замещения такой линии должна учитывать емкостные токи и токи проводимости между линейным проводом и землей. Однако, учитывая их малое влияние на режим работы нагруженной сети, а также учитывая учебный характер решаемой задачи, можно ограничиться моделью линии в виде только продольных $r_л$ и $x_л$ сопротивлений (рис. 7).

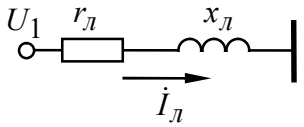


Рис. 7. Схема замещения линии электропередачи

В справочной литературе обычно даются удельные значения этих сопротивлений r_0 и x_0 в [*Ом*] в расчете на 100 *км*.

При известной протяженности ЛЭП сопротивления определяются по соотношениям:

$$r_л = r_0 \cdot \ell/100; \quad x_л = x_0 \cdot \ell/100.$$

Если линия электропередачи состоит из двух параллельных цепей, то эквивалентное сопротивление нужно уменьшить в два раза. Обычно все последовательные элементы сети, питающей узел нагрузки, приводятся к единой системе базисных единиц, в качестве которых принимаются либо мощность наибольшего трансформатора, либо полная мощность генератора, а в качестве базисного напряжения - фазное напряжение узла нагрузки.

Тогда с учетом параллельного соединения цепей получим в *о.е.*

$$r_л^* = \frac{r_0 \cdot \ell}{200} \cdot \frac{S_б}{U_л^2}; \quad x_л^* = \frac{x_0 \cdot \ell}{200} \cdot \frac{S_б}{U_л^2}.$$

2.4. Расчетная модель трансформатора

2.4.1. Схема замещения трансформатора

Силовой двухобмоточный трансформатор может быть представлен «Т» - образной схемой замещения приведенного трансформатора (рис. 8). На ней обозначены: r_1 - активное сопротивление первичной обмотки; x_1 - индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки; r_2' - активное приведенное сопротивление вторичной обмотки; x_2' - индуктивное приведенное сопротивление рассеяния вторичной обмотки; x_m - индуктивное сопротивление взаимоиндукции; r_m - активное сопротивление, обусловленное магнитными потерями в стали сердечника; I_1 - ток первичной обмотки; I_2' - приведенный ток вторичной обмотки; I_m - ток намагничивания (ток холостого хода); U_1 - первичное напряжение; U_2' - вторичное приведенное напряжение.

В приведенном трансформаторе вторичная обмотка имеет такое же число витков, как и первичная обмотка, поэтому ЭДС, наводимые основным магнитным потоком, будут одинаковы и, следовательно, можно электрически объединить обе обмотки. Связь между параметрами и величинами неприведенного и приведенного трансформатора осуществляется через коэффициент трансформации

$$k_т = W_1/W_2 \approx U_{1ф}/U_{2ф}$$

следующими соотношениями

$$U_2' = U_2/k_т; \qquad I_2' = k_т I_2; \qquad r_2' = r_2/k_т^2; \qquad x_2' = x_2/k_т^2.$$

Для определения параметров схем замещения трансформатора можно воспользоваться его справочными данными. Обычно в справочниках приводятся

- полная мощность, $S_т$, $кВ \cdot А$;
- линейное напряжение ВН, U_1, $кВ$;
- линейное напряжение НН, U_2, $кВ$;
- напряжение короткого замыкания, $u_к$, %;
- ток холостого хода, I_m, %;
- потери холостого хода, P_0, $кВт$;
- потери короткого замыкания, $P_к$, $кВт$;
- схемы соединений обмоток ВН и НН.

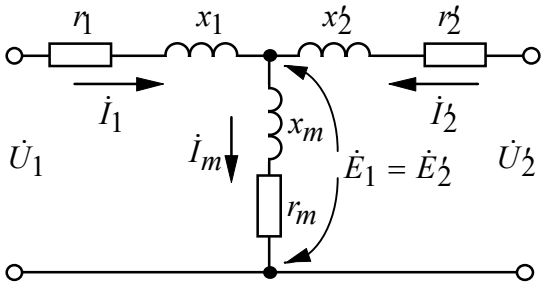


Рис. 8. «Т»-образная схема замещения трансформатора

В именованных единицах номинальные величины и параметры трансформатора определяются по следующим формулам:

1) Для схемы Δ: $U_{1ф} = U_1$; $I_{1ф} = I_1/\sqrt{3}$;

для схемы ⅄: $U_{1ф} = U_1/\sqrt{3}$; $I_{1ф} = I_1$.

Линейный первичный ток: $I_1 = \dfrac{S_т}{\sqrt{3}\cdot U_1}$; $I_m[A] = \dfrac{I_m[\%]\cdot I_{1ф}}{100}$

2) $x_m = \dfrac{U_{1ф}\cdot 1000}{I_m[A]}$; $r_m = \dfrac{P_0}{3\cdot I_m^2[A]}\cdot 1000$;

3) $x_к = x_1 + x_2' = \dfrac{u_к[\%]}{100}\cdot\dfrac{U_{1ф}}{I_{1ф}}\cdot 1000$; $x_1 \approx x_2' = \dfrac{x_к}{2}$;

4) $r_к = r_1 + r_2' = \dfrac{P_к}{3\cdot I_{1ф}^2}\cdot 1000$; $r_1 \approx r_2' = \dfrac{r_к}{2}$.

Для перевода параметров в относительные единицы необходимо найти базисные величины трансформатора

$$U_{б_т} = U_{1ф};\quad I_{б_т} = I_{1ф};\quad S_{б_т} = S_т;\quad Z_{б_т} = \frac{U_{б_т}}{I_{б_т}}.$$

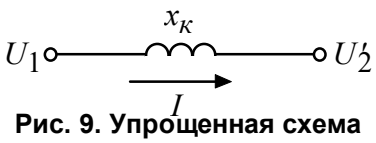


Рис. 9. Упрощенная схема замещения трансформатора

При расчете режимов сети трансформатор достаточно представить схемой замещения, состоящей из одного сопротивления короткого замыкания $x_к$ (рис. 9), т.к. ток холостого хода трансформатора весьма мал, а активные сопротивления обмоток на порядок меньше индуктивного сопротивления рассеяния.

2.4.2. Векторная диаграмма трансформатора

Полная схема замещения используется для детального анализа режима работы самого трансформатора. В соответствие с этой схемой установившийся режим трансформатора описывается системой трех уравнений

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + jx_1\dot{I}_1 + r_1\dot{I}_1; \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2' - jx_2'\dot{I}_2' - r_2'\dot{I}_2'; \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2' = \dot{I}_m, \end{cases}$$

которые наглядно можно представить в виде векторных диаграмм. На рис. 10 изображена векторная диаграмма трансформатора при работе на активно-индуктивную (*а*) и активно-емкостную (*б*) нагрузку (для наглядности на рисунке ток холостого хода и падения напряжения искусственно завышены и изображены не в масштабе).

Для построения векторной диаграммы трансформатора в масштабе следует, прежде всего, найти токи I_1, I_2', I_m и их фазовые сдвиги.

В качестве исходных данных принимаются известные из расчета сети значения потоков входных P_1, Q_1 и выходных P_2, Q_2 мощностей, а также первичное U_1 и вторичное U_2' напряжения трансформатора, связанные между собой соотношениями (3) и (4).

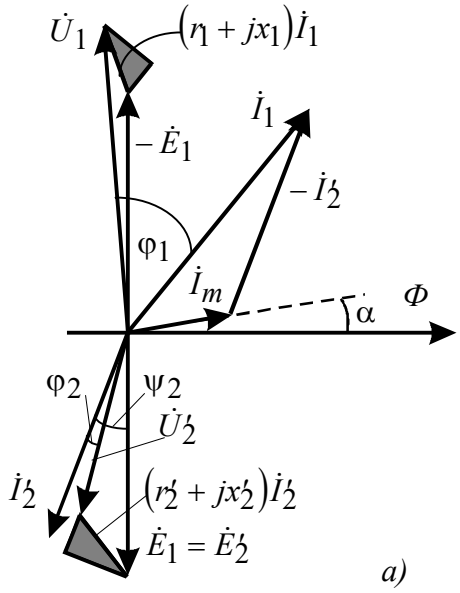
Вторичный ток I_2' и его фаза определяется через мощности и напряжение вторичной обмотки трансформатора

$$I_2' = \frac{\sqrt{P_2^2 + Q_2^2}}{U_2'};\qquad \varphi_2 = \operatorname{arctg}\frac{Q_2}{P_2}.$$

Аналогично определяется первичный ток через мощности и напряжение первичной обмотки трансформатора

$$I_1 = \frac{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}{U_1};\qquad \varphi_1 = \operatorname{arctg}\frac{Q_1}{P_1}.$$

Ток холостого хода I_m можно найти через E_1 по формуле



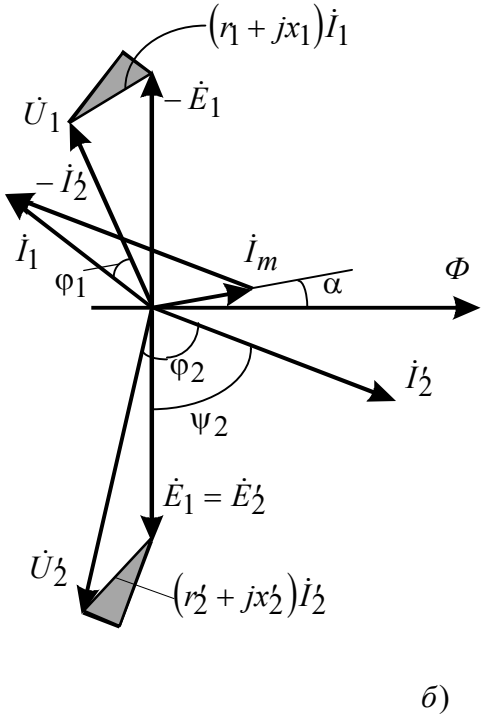


Рис. 10. Векторная диаграмма приведенного трансформатора при активно-индуктивной (а) и активно-емкостной (б) нагрузке

$$I_m = \frac{E_1}{z_m}, \text{ где } z_m = \sqrt{r_m^2 + x_m^2}\,.$$

Однако при этом необходимо иметь ввиду, что сопротивление намагничивающего контура z_m является нелинейным и зависит от степени насыщения магнитопровода трансформатора. Поэтому при повышении ЭДС ($E_1 > 1$ *о.е.*) можно воспользоваться степенной зависимостью вида

$$I_m = \frac{1}{z_m} E_1^9,$$

отражающей нелинейность магнитной характеристики.

ЭДС E_1, наводимая магнитным потоком в первичной обмотке, достаточно просто определяется через эквивалентные сопротивления нагрузки трансформатора:

$$Z_{2_н} = \frac{U_2'}{I_2'}; \quad R_{2_н} = Z_{2_н}\cos\varphi_2; \quad X_{2_н} = Z_{2_н}\sin\varphi_2,$$

тогда

$$E_1 = E_2' = I_2'\sqrt{\left(r_2' + R_{2_н}\right)^2 + \left(x_2' + X_{2_н}\right)^2};$$

$$\psi_2 = \operatorname{arctg}\frac{x_2' + X_{2_н}}{r_2' + R_{2_н}}.$$

С учетом нелинейности магнитной характеристики ток холостого хода определяется в соответствии с условием

$$\begin{cases} I_m = \dfrac{1}{z_m} E_1 & \text{при} \quad E_1 \le 1 \\ I_m = \dfrac{1}{z_m} E_1^9 & \text{при} \quad E_1 > 1, \end{cases}$$

а его фазовый сдвиг относительно вектора магнитного потока $\alpha = 90° - \operatorname{arctg}\dfrac{x_m}{r_m}$.

2.4.3. Основные характеристики трансформатора

а) Внешняя характеристика

Внешней характеристикой трансформатора называется зависимость вторичного напряжения от тока нагрузки

$$U_2 = f(I_2).$$

Ее определяют при номинальном первичном напряжении $U_1 = U_{1_{ном}}$ и неизменном характере нагрузки $\varphi_2 = const$.

На рис. 11 представлено семейство внешних характеристик при различном характере нагрузки. Как видно из него, вторичное напряжение с ростом нагрузки изменяется: при индуктивном характере нагрузки оно уменьшается, а при емкостном - увеличивается. Это также наглядно иллюстрируется векторными диаграммами (см. рис. 10). Причиной изменения вторичного напряжения является падение напряжения ΔU на внутреннем сопротивлении трансформатора $z_к = r_к + jx_к$. Изменение вторичного напряжения при заданной нагрузке можно приближенно определить по формуле

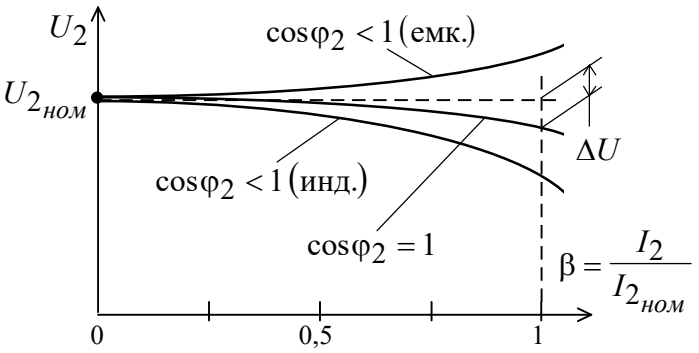


Рис. 11. Внешние характеристики трансформатора

$$\Delta u = \beta \cdot (u_{ка} \cos\varphi_2 + u_{кr} \sin\varphi_2),$$

где $u_{ка} = u_к \cos\varphi_к$ - активная составляющая напряжения короткого замыкания $u_к$; $u_{кr} = u_к \sin\varphi_к$ - реактивная составляющая напряжения короткого замыкания $u_к$; $\beta = I_2 / I_{2_н}$ - коэффициент нагрузки; $\varphi_к = \mathrm{arctg}\frac{x_к}{r_к}$ - угол, определяющий характер внутреннего сопротивления трансформатора $x_к$.

Подставив $u_{ка}$ и $u_{кr}$ в Δu получим

$$\Delta U = \beta u_к (\cos\varphi_к \cos\varphi_2 + \sin\varphi_к \sin\varphi_2) = \beta u_к \cos(\varphi_к - \varphi_2).$$

Считая, что на холостом ходу трансформатора вторичное напряжение U_{2_0} равно номинальному, можно окончательно записать выражение для определения вторичного напряжения при нагрузке в *о.е.*

$$U_2 = 1 - \Delta U = 1 - \beta u_к \cos(\varphi_к - \varphi_2)$$

и использовать его для построения внешних характеристик.

Пример. Рассчитать внешнюю характеристику трансформатора с исходными данными, взятыми из примера расчета системы (см. п. 4): $u_к = 10{,}5\%$; $x_к = 0{,}106$ *о.е.*; $r_к = 0{,}0044$ *о.е.*

Пусть нагрузка трансформатора будет чисто активная $\varphi_2 = 0$. Тогда

$$\varphi_к = \mathrm{arctg}\frac{0{,}106}{0{,}0044} = 87{,}6°; \qquad \Delta U = \beta \cdot 0{,}105 \cdot \cos 87{,}6° = \beta \cdot 0{,}00435 \text{ о.е.}$$

Результат расчета сведен в таблицу.

$\beta = I_2 / I_{2н}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\Delta U = 0{,}00435\beta$	0	0,00087	0,00174	0,0026	0,00348	0,00435

$U_2 = 1 - \Delta U$	1	0,999	0,998	0,997	0,996	0,996

Из расчета следует, что при чисто активной нагрузке при номинальном токе вторичное напряжение изменится по сравнению с напряжением холостого хода на 0,435%.

б) Коэффициент полезного действия трансформатора

Коэффициентом полезного действия (к.п.д.) трансформатора называют отношение активной мощности на выходе вторичной обмотки P_2 (полезная мощность) к активной мощности на входе первичной обмотки P_1 (подводимая мощность)

$$\eta = P_2 / P_1 .$$

Так как полезная мощность P_2 меньше подводимой P_1 на сумму потерь мощности $\sum P$, то

$$\eta = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P} .$$

Потери в трансформаторе складываются из потерь в первичной и вторичной обмотках при протекании по ним тока ($P_{эл}$ - электрические потери), а также из потерь на перемагничивание магнитопровода и от вихревых токов при переменном магнитном потоке ($P_{мг}$ - магнитные потери). Они непосредственно связаны с и потерями на короткого замыкания $P_к$ и потерями холостого хода P_0.

Учитывая, что полезная мощность равна

$$P_2 = \beta S_н \cos\varphi_2 ,$$

окончательно получим выражение для к.п.д. трансформатора

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_к}{\beta S_н \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_к} .$$

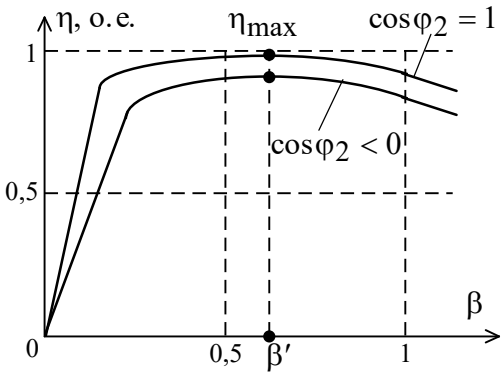


Рис. 12. Зависимость к.п.д. трансформатора от коэффициента нагрузки

Зависимость $\eta = f(\beta)$ иллюстрируется графиками, представленными на рис. 12. Из них видно, что чем меньше коэффициент мощности ($\cos\varphi_2$), т.е. чем больше нагружен трансформатор реактивной мощностью Q_2, тем ниже к.п.д. При некоторой нагрузке к.п.д. оказывается максимальным. Это происходит тогда, когда электрические потери в обмотках становятся равными магнитным потерям в сердечнике ($P_к = P_0$), что соответствует

$$\beta' = \sqrt{\frac{P_0}{P_к}} .$$

При выборе трансформатора стремятся к тому, чтобы β' был близок к средней загрузке трансформатора. Обычно для большинства силовых трансформаторов β' находится в пределах от 0,4 до 0,7.

Полученные соотношения для к.п.д. трансформатора соответствуют его работе при номинальном напряжении. В реальных условиях первичное напряжение часто отличается от номинального. В этом случае магнитный поток в сердечнике магнитопровода также будет отличаться от номинального, что отразится на величине потерь холостого хода. Для расчета к.п.д. при неноминальном первичном напряжении следует пользоваться скорректированной формулой

$$\eta = 1 - \frac{k_u^2 P_0 + \beta^2 P_к}{\beta k_u S_н \cos\varphi_2 + k_u^2 P_0 + \beta^2 P_к} ,$$

при этом $\beta' = k_u \sqrt{\dfrac{P_0}{P_к}}$, где $k_u = \dfrac{U_1}{U_{1ном}}$.

Пример. Рассчитаем коэффициент полезного действия трансформатора с исходными данными: $P_0 = 40$ кВт, $P_к = 140$ кВт, $S_н = 32000$ кВ·А для чисто активной нагрузки $\varphi_2 = 0$ при повышенном на 5% первичном напряжении $k_u = 1{,}05$.

Результаты сведем в таблицу.

β	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	$\beta' = 0{,}56$
η, %	0	99,27	99,51	99,53	99,51	99,45	$\eta_{max} = 99{,}53$

2.5. Расчетная модель асинхронного двигателя

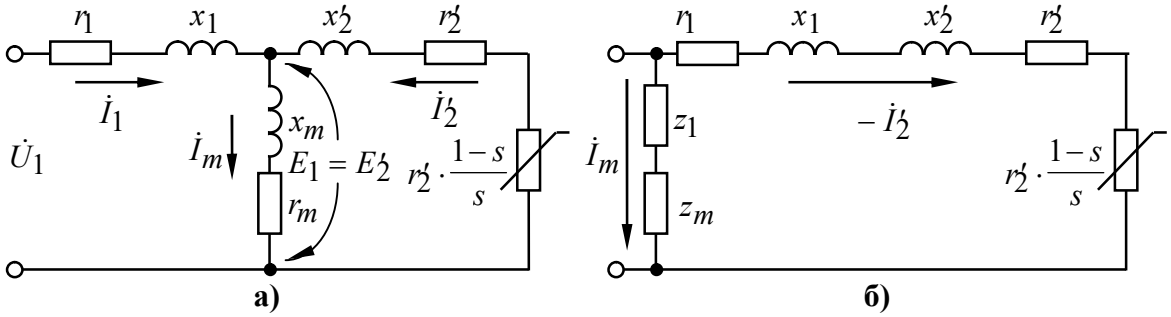


Рис. 13. Схемы замещения асинхронного двигателя

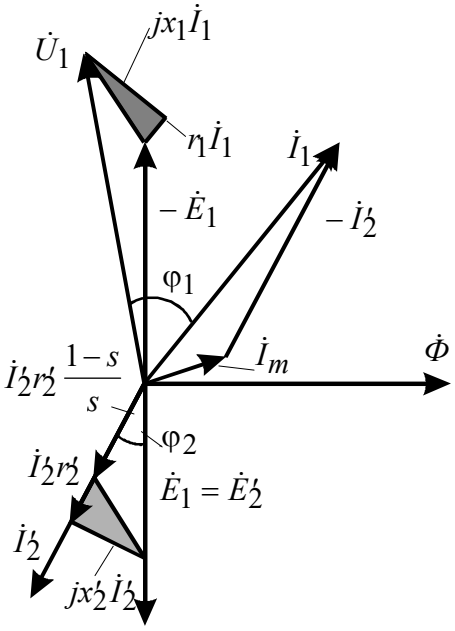


Рис. 14. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

2.5.1. Схема замещения асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель, так же как и трансформатор, представляется «Т»-образной схемой замещения, только в качестве эквивалентной механической нагрузки в схему введено добавочное сопротивление $R_{доб} = r_2' \cdot (1-s)/s$, зависящее от скольжения s (рис. 13, *а*).

Активная мощность, выделяемая на этом сопротивлении эквивалентна механической мощности на валу двигателя.

В соответствии с этой схемой установившийся режим работы двигателя описывается системой уравнений (5)

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + jx_1\dot{I}_1 + r_1\dot{I}_1; \\ 0 = \dot{E}_2' - jx_2'\dot{I}_2' - r_2'\dot{I}_2' - r_2' \cdot \dfrac{1-s}{s} \cdot \dot{I}_2' \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2' = \dot{I}_m \end{cases} \qquad (5)$$

и векторной диаграммой (рис. 14).

Скольжение двигателя определяется по формуле

$$s = \frac{n_1 - n_р}{n_1},$$

где $n_1 = 60 f_1 / p$ - синхронная частота вращения магнитного поля, об/мин; f_1 - частота сети, Гц; p - число пар полюсов; $n_р$ - частота вращения ротора, об/мин.

Особенностью асинхронного двигателя является большой ток намагничивания $\dot{I}_m$, составляющий от 20% до 50% номинального тока и обуславливающий низкий cosφ двигателя. Поэтому пренебрегать намагничивающим контуром $z_m = r_m + jx_m$ нельзя. При анализе электромагнитных процессов часто пользуются упрощенной «Г»–образной схемой замещения с вынесенным намагничивающим контуром (рис. 9, *б*). Эта схема дает удовлетворительные результаты при расчете рабочих режимов.

2.5.2. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Для определения величины скольжения *s* необходимо найти точку механического равновесия между электромагнитным моментом *M*, развиваемым двигателем, и внешним моментом нагрузки $M_{\text{вн}}$. С этой целью предварительно рассчитываются *механические характеристики* двигателя $M = f(s)$ и рабочего механизма $M_{\text{вн}} = f(s)$. Электромагнитный момент двигателя связан с электромагнитной мощностью $P_{\text{эм}}$ простым соотношением

$$M = \frac{P_{\text{эм}}}{\Omega_1} = \frac{60}{2\pi n_1} \cdot P_{\text{эм}},$$

где $P_{\text{эм}} = \frac{m_1 I_2'^2}{s} r_2'$; $\Omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{2\pi}{60} n_1$ - угловая частота вращения магнитного поля статора; m_1 - число фаз двигателя.

Если подставить в формулу для момента выражение для тока I_2', определенное по схеме рис. 13, *б*, то получим

$$M = \frac{m_1 p}{2\pi f_1} \cdot \frac{U_1^2 \cdot \frac{r_2'}{s}}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + \left(x_1 + x_2'\right)^2}.$$

На рис. 15 изображена зависимость этого момента от скольжения. К особой точке механической характеристики относится точка максимального момента $M_{\max}$, соответствующая критическому скольжению $s_{\text{кр}} = r_2'/x_{\text{к}}$

$$M_{\max} = \frac{m_1 p}{2\pi f_1} \cdot \frac{U_1^2 x_{\text{к}}}{\left(r_1 + x_{\text{к}}\right)^2 + x_{\text{к}}^2}.$$

Если пренебречь активным сопротивлением обмотки статора, то выражение для $M_{\max}$ упростится и будет зависеть от единственного параметра $x_{\text{к}}$

$$M_{\max} = \frac{m_1 p}{4\pi f_1} \cdot \frac{U_1^2}{x_{\text{к}}}.$$

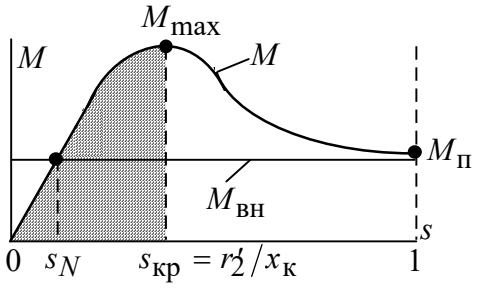


Рис. 15. Механические характеристики двигателя и рабочего механизма

Важность этой точки для установившегося режима заключается в том, что она определяет устойчивую зону работы двигателя в диапазоне скольжения от нуля до $s_{\text{кр}}$. При скольжении больше критических двигатель «опрокидывается».

Внешний момент рабочего механизма, если в его качестве выступает подъемное устройство, не зависит от скольжения и его можно принять постоянным. При номинальном внешнем моменте, равным

$$M_{\text{вн}} = \frac{P_2}{\Omega_1} = \frac{S_{\text{ном}} \eta_{\text{ном}} \cos\varphi_{\text{ном}}}{2\pi f_1} p,$$

ему будет соответствовать номинальное скольжение s_N. Здесь $S_{\text{ном}}, \eta_{\text{ном}}, \cos\varphi_{\text{ном}}$ - номинальные полная мощность, к.п.д. и коэффициент мощности двигателя.

2.5.3. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя

Для приближенного расчета параметров схемы замещения АД, удовлетворяющих рабочему режиму, можно использовать справочные данные о кратности максимального момента и величины номинального скольжения. С целью дальнейшего упрощения этой задачи будем считать активные сопротивления и индуктивные сопротивления рассеяния статорной и роторной обмотки равными между собой, то есть $r_1 = r_2'$ и $x_1 = x_2'$, а намагничивающий ток чисто реактивным. Расчеты будем вести в системе относительных единиц, в которой за базисные величины приняты:

$$S_б = S_{\text{ном}}, \quad \Omega_б = \Omega_1, \quad U_б = U_{ф_{\text{ном}}}, \quad I_б = I_{ф_{\text{ном}}}, \quad M_б = S_б/\Omega_б .$$

Тогда можно записать в *о.е.* полученные ранее выражения в следующем виде

$$\begin{cases} M^* = \dfrac{U_1^2}{\left[r_2'\left(1+\dfrac{1}{s}\right)\right]^2 + x_к^2} \cdot \dfrac{r_2'}{s}; \\ M^*_{\max} = \dfrac{U_1^2 x_к}{\left(r_1 + x_к\right)^2 + x_к^2} \approx \dfrac{U_1^2}{2x_к}; \\ M^*_{\text{ном}} = \eta_{\text{ном}} \cos\varphi_{\text{ном}} \end{cases} \tag{6}$$

Исходя из заданных значений $\eta_{\text{ном}}, \cos\varphi_{\text{ном}}$, $M_{\max}/M_{\text{ном}}$, s_N, по выражениям (6) найдем параметры. Из 2-го уравнения при номинальном напряжении $U_1 = 1$ о.е.

$$x_к \approx \frac{1}{2 \cdot \dfrac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}} \cdot \eta_м \cdot \cos\varphi_{\text{ном}}}; \quad x_1 = x_2' = \frac{x_к}{2}.$$

Решив 1-е уравнение по известным s_N и $M_{\text{ном}}$, определим r_2' и r_1

$$r_1 \approx r_2' = \frac{s_N}{2M_{\text{ном}}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - x_к^2 \cdot 4M_{\text{ном}}^2}\right).$$

Для определения параметров намагничивающего контура используем значение $\cos\varphi_{\text{ном}}$. Тогда

$\dot{I}_{1_н} = I_{1_н}\underline{|\varphi_{\text{ном}}}$, где $I_{1_н} = 1$, $\varphi_{\text{ном}} = \arccos\varphi_{\text{ном}}$;

$\dot{I}_{2_н}' = I_{2_н}'\underline{|\varphi_2}$, где $I_{2_н}' = \dfrac{1}{\sqrt{\left[\left(r_2'\right)^2\left(1+1/s_N\right)^2 + x_к^2\right]}}$, $\varphi_2 = \operatorname{arctg}\dfrac{x_к}{r_2'\left(1+1/s_N\right)}$;

$I_m = I_{1_н}\sin\varphi_{\text{ном}} - I_{2_н}'\sin\varphi_2$; $x_m = \dfrac{1}{I_m} - x_1$.

2.5.4. Пусковые характеристики асинхронного двигателя

К *пусковым характеристикам* двигателя относятся зависимости электромагнитного момента и тока статора в функции скольжения. В отличии от механической характеристики, которая рассматривается в зоне малых рабочих скольжений, пусковые характеристики определяются во всем диапазоне скольжений - от единицы, когда ротор неподвижен, до нуля. Пусковые характеристики позволяют дать оценку таким важнейшим показателям режима

пуска, как времени пуска, степени нагрева двигателя при пуске, влияния пуска на посадку напряжения в узле и т.д.

Расчет этих характеристик осложняется тем, что параметры схемы замещения двигателя во время пуска оказываются нелинейными, они зависят от скольжения и тока роторной и статорной обмотки. Непостоянство параметров, прежде всего, x_1, x'_2 и r'_2, связано с явлением вытеснения тока в стержнях роторной обмотки и с явлением насыщения зубцов статора и ротора потоками рассеяния. Эти явления оказывают большое влияние на параметры в области больших скольжений, когда частота тока в роторе близка к частоте сети и по обмоткам протекают большие пусковые токи. При этом активное сопротивление ротора r'_2 возрастает, а индуктивные сопротивления рассеяния x_1 и x'_2, наоборот, уменьшаются. При скольжениях меньше критического вытеснение тока и насыщение зубцов уже не проявляется.

Таким образом, при пуске в начальный момент, когда $s = 1$, $r'_2 = r'_{2\text{п}}$, $x_\text{к} = x_{\text{к}_\text{п}}$, а в рабочем режиме при малых скольжениях ($s < s_\text{кр}$), когда двигатель уже запустился $r'_2 = r'_{2\text{с}}$, $x_\text{к} = x_{\text{к}_\text{с}}$. Здесь индекс «п» означает «пусковые параметры», а индекс «с» - «синхронные параметры».

Переход от пусковых параметров к синхронным подчиняется нелинейной степенной функции вида $f(s) = as^n + b$, как это показано на рис. 16.

Для мощных асинхронных двигателей показатель степени можно принять равным $n = \frac{1}{5} = 0{,}2$ и тогда в диапазоне s от 0 до $s_\text{кр}$ параметры двигателя определяются выражением

$$\begin{cases} r'_2(s) = a_r s^n + b_r \\ x_\text{к}(s) = a_x s^n + b_x, \end{cases}$$

где $a_r = \dfrac{r'_{2\text{п}} - r'_{2\text{с}}}{1 - s_\text{кр}^n}$; $b_r = \dfrac{r'_{2\text{с}} - r'_{2\text{п}} s_\text{кр}^n}{1 - s_\text{кр}^n}$;

$a_x = \dfrac{x_{\text{к}_\text{п}} - x_{\text{к}_\text{с}}}{1 - s_\text{кр}^n}$; $b_x = \dfrac{x_{\text{к}_\text{с}} - x_{\text{к}_\text{п}} s_\text{кр}^n}{1 - s_\text{кр}^n}$;

$s_\text{кр} = r'_{2\text{с}} / x_{\text{к}_\text{с}}$.

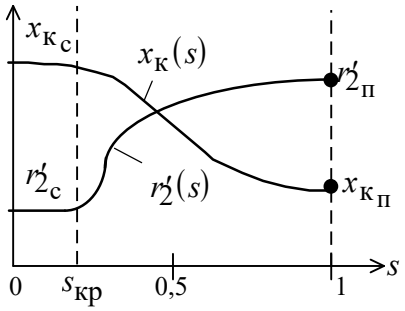


Рис. 16. Зависимость параметров двигателя от скольжения

При $s < s_\text{кр}$ $\begin{cases} r'_2(s) = r'_{2\text{с}} \\ x_\text{к}(s) = x_{\text{к}_\text{с}} \end{cases}$.

Параметры $r'_{2\text{с}}$ и $x_{\text{к}_\text{с}}$, соответствующие рабочему режиму, определяются по методике, описанной в п. 2.5.2. Пусковые параметры $r'_{2\text{п}}$ и $x_{\text{к}_\text{п}}$ рассчитываются, исходя из заданной кратности пускового тока $I_\text{п} / I_\text{ном} = I_\text{п}^*$ и кратности пускового момента $M_\text{п} / M_\text{ном} = M_\text{п}^*$.

Пусковой ток приближенно равен

$$I_\text{п} = \frac{U_1}{x_{\text{к}_\text{п}}} + I_m, \qquad \text{в о.е. } I_\text{п}^* = \frac{1}{x_{\text{к}_\text{п}}} + I_m^*, \qquad I_m^* = \frac{1}{x_m},$$

отсюда $$x_{\text{к}_\text{п}} = \frac{1}{I_\text{п}^* - I_m^*}.$$

Пусковой момент, в соответствии с выражением (6), при условии $s = 1$, будет равен

$$M_{\text{п}}^{*}=\frac{r_{2\text{п}}'}{\left(\left(\text{r}_1+r_{2\text{п}}'\right)^2+x_{\text{к}_{\text{п}}}^2\right)\eta_{\text{ном}}\cos\varphi_{\text{ном}}}\approx\frac{r_{2\text{п}}'}{x_{\text{к}_{\text{п}}}^2\,\eta_{\text{ном}}\cos\varphi_{\text{ном}}};$$

$$r_{2\text{п}}'=M_{\text{п}}^{*}\eta_{\text{ном}}\cos\varphi_{\text{ном}}x_{\text{к}_{\text{п}}}^2=\frac{M_{\text{п}}^{*}\eta_{\text{ном}}\cos\varphi}{\left(I_{\text{п}}^{*}-I_m^{*}\right)^2}.$$

Задаваясь скольжением в диапазоне от 1 до 0, рассчитываются пусковые характеристики тока и момента

$$I_1=\sqrt{\left(I_m+I_2'\sin\varphi_2\right)^2+\left(I_2'\cos\varphi_2\right)^2},$$

где $I_2'=\dfrac{U_1}{\sqrt{\left(r_1+\dfrac{r_2'(s)}{s}\right)^2+\left(x_{\text{к}}(s)\right)^2}}$; $\varphi_2=\text{arctg}\dfrac{x_{\text{к}}(s)}{r_1+\dfrac{r_2'(s)}{s}}$; $I_m=\dfrac{U_1}{x_m}$;

$$M=\frac{U_1^2\cdot\dfrac{r_2'(s)}{s}}{\left(r_1+\dfrac{r_2'(s)}{s}\right)^2+\left(x_{\kappa}(s)\right)^2}=I_2'^2\cdot\frac{r_2'(s)}{s},\qquad M^{*}=\frac{M}{\eta_{\text{ном}}\cos\varphi_{\text{ном}}}.$$

Пример. Рассчитать пусковые характеристики асинхронного двигателя с исходными данными, взятыми из примера расчета системы (см. п. 4). Электрические параметры схемы замещения, соответствующие рабочему режиму, определены для $\eta=0{,}94$, $\cos\varphi=0{,}8$, $n_{\text{с}}=375$ об/мин, $n_{\text{р}}=371$ об/мин, $M_{\max}/M_{\text{ном}}=2{,}2$ равными:

$$r_{2\text{с}}'=0{,}013\text{ о.е.},\qquad r_1=0{,}013\text{ о.е.},\qquad x_{\text{к}_{\text{с}}}=0{,}302\text{ о.е.},\qquad x_m=2{,}21\text{ о.е.}$$

Определим пусковые параметры двигателя для $I_{\text{п}}^{*}=\dfrac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}}=7$ и $M_{\text{п}}^{*}=\dfrac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}=1{,}1$.

Тогда
$$I_m^{*}=\frac{1}{2{,}21}=0{,}45\text{ о.е.};$$
$$x_{\text{к}_{\text{п}}}=\frac{1}{7-2{,}21}=0{,}152\text{ о.е.};$$
$$r_{2\text{п}}'=\frac{1{,}1\cdot0{,}94\cdot0{,}8}{(7-0{,}45)^2}=0{,}0193\text{ о.е.};$$
$$s_{\text{кр}}=\frac{0{,}013}{0{,}302}=0{,}043\text{ о.е.}$$

Для расчета параметров при $s>s_{\text{кр}}$ найдем коэффициенты уравнений a и b

$$a_r=\frac{0{,}0193-0{,}013}{1-0{,}043^{0{,}2}}=0{,}013;\qquad b_r=\frac{0{,}013-0{,}0193\cdot0{,}043^{0{,}2}}{1-0{,}043^{0{,}2}}=0{,}006;$$

$$a_x=\frac{0{,}152-0{,}302}{1-0{,}043^{0{,}2}};\qquad b_x=\frac{0{,}302-0{,}152\cdot0{,}043^{0{,}2}}{1-0{,}043^{0{,}2}}=0{,}472.$$

Отсюда

$$r_2'(s)=\begin{cases}0{,}013s^{0{,}2}+0{,}006 & \text{при}\quad s>0{,}043\\ 0{,}013 & \text{при}\quad s<0{,}043\end{cases},\qquad x_{\text{к}}(s)=\begin{cases}-0{,}32s^{0{,}2}+0{,}472 & \text{при}\quad s>0{,}043\\ 0{,}302 & \text{при}\quad s<0{,}043\end{cases}$$

Результаты расчета сведем в таблицу (в о.е.).

s	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0,05	0,043	0,04	0,03	0,02	0,01	0
$r_2'(s)$	0,019	0,019	0,018	0,017	0,016	0,014	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
$x_к(s)$	0,153	0,167	0,184	0,206	0,241	0,271	0,297	0,302	0,302	0,302	0,302	0,302	0,302
I_2'	6,41	5,86	5,3	4,68	3,89	3,2	2,46	2,29	2,17	1,82	1,34	0,72	0
φ_2	1,36	1,36	1,34	1,31	1,21	1,05	0,82	0,76	0,71	0,58	0,42	0,22	–
$I_1/I_{ном}$	6,85	6,3	5,74	5,12	4,31	3,6	2,8	2,62	2,49	2,1	1,58	0,931	0,45
$M_1/M_{ном}$	1,05	1,07	1,12	1,24	1,57	1,95	2,13	2,11	2,09	1,96	1,6	0,93	0

На рис. 17 изображены пусковые характеристики, построенные по результатам расчета.

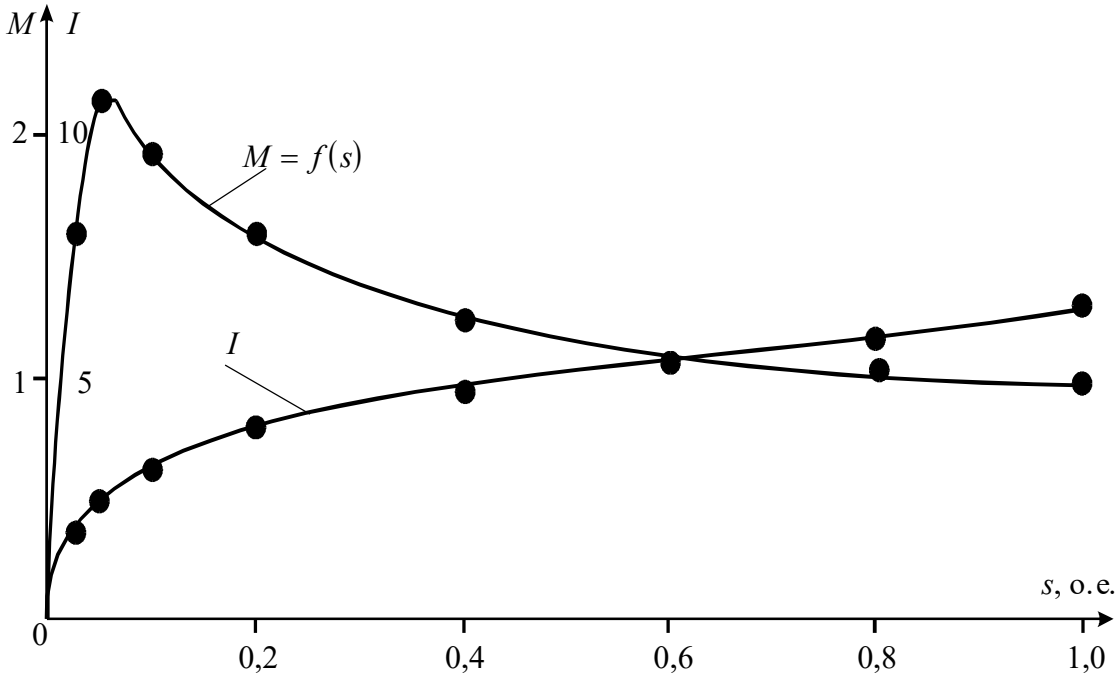


Рис. 17 Пусковые характеристики асинхронного двигателя

2.6. Схема замещения синхронных машин

2.6.1. Схема замещения синхронного неявнополюсного генератора

По условию решаемой задачи узел нагрузки питается от синхронного турбогенератора, конструкция ротора которого является неявнополюсной с равномерным воздушным зазором между статором и ротором. Эта конструктивная особенность позволяет представить генератор весьма простой электрической схемой, состоящей из источника ЭДС E_0 и внутреннего синхронного сопротивления $x_с$ (рис. 18).

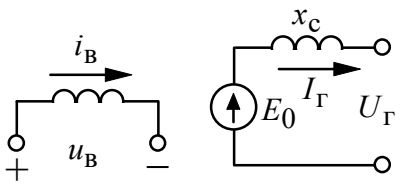


Рис. 18. Схема замещения синхронного генератора в установившемся режиме

ЭДС E_0 создается током возбуждения $i_в$ синхронной влия машины и связана с ним характеристикой холостого хода (рис. 19). На холостом ходу связь между E_0 и $i_в$ носит нелинейный характер из-за насыщения стали, однако при нагрузке, вследствие ния поля реакции якоря, степень насыщения остается практически постоянной и близкой к точке $i_{в0}$, соответствующей номинальному напряжению $U_н$. Поэтому можно с достаточной для инженерной практики точностью считать, что связь между E_0 и $i_в$ под на-

грузкой линейна. Такой подход позволит определить по векторной диаграмме ток возбуждения под нагрузкой генератора. Для построения векторной диаграммы запишем уравнение электрического равновесия для статорной цепи $\dot{U}_{\text{г}} = \dot{E}_0 - jx_{\text{с}}\dot{I}_{\text{г}}$, и для случая активно-индуктивной нагрузки построим векторную диаграмму напряжений и магнитных потоков (рис. 20).

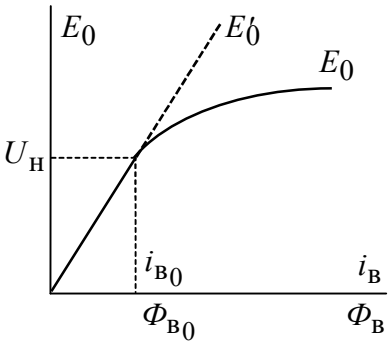


Рис. 19. Характеристика холостого хода

Как видно из рис. 20, несмотря на то, что магнитный поток $\Phi_{\text{в}}$, соответствующий величине E_0 и пропорциональный току возбуждения, оказывается значительно большим, чем $\Phi_{\text{в}0}$, результирующий поток $\Phi_{\text{рез}}$ намного меньше $\Phi_{\text{в}}$ и близок к $\Phi_{\text{в}0}$ из-за размагничивания потоком реакции якоря Φ_a. Из подобия векторных треугольников магнитных потоков и напряжений можно записать следующие соотношения

$$\frac{\Phi_{\text{в}}}{\Phi_{\text{рез}}} = \frac{E_0}{U_{\text{г}}} = \frac{i_{\text{в}}}{i_{\text{в}0}},$$

из которых легко определяется ток возбуждения генератора при нагрузке по известному току возбуждения на холостом ходу $i_{\text{в}} = i_{\text{в}0} \cdot E_0 / U_{\text{г}}$.

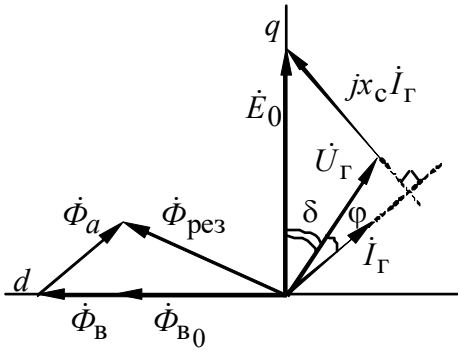


Рис. 20. Векторная диаграмма неявнополюсного генератора

2.6.2. Схема замещения и векторная диаграмма синхронного явнополюсного двигателя

Синхронные машины (СМ) с явновыраженными полюсами имеют неодинаковый воздушный зазор - под полюсами он в несколько раз меньше, чем в межполюсном пространстве. Это вносит определенные трудности при создании расчетных моделей явнополюсных машин, прежде всего из-за того, что внутреннее сопротивление машины зависит от характера нагрузки. Одним из путей преодоления этих трудностей является использование принципа двух реакций, заключающегося в разложении магнитного поля реакции якоря на продольную d и поперечную q оси ротора. В этом случае уравнение электрического равновесия при работе СМ от сети имеет вид:

$$\dot{U}_{\text{с}} = -\dot{E}_0 + jx_d\dot{I}_d + jx_q\dot{I}_q,$$

где $\dot{U}_{\text{с}}$ - вектор напряжения сети; $\dot{E}_0$ - вектор ЭДС холостого хода; $\dot{I}_d$, $\dot{I}_q$ - проекции вектора тока статора $\dot{I}$ на продольную и поперечную оси; x_d - продольное индуктивное сопротивление; x_q - поперечное индуктивное сопротивление.

Подставив в уравнение электрического равновесия выражение для тока $\dot{I}_q = \dot{I} - \dot{I}_d$, и обозначив через $\dot{E}_q = \dot{E}_0 - j\left(x_d - x_q\right)\dot{I}_d$ получим уравнение вида

$$\dot{U}_{\text{с}} = -\dot{E}_q + jx_q\dot{I}.$$

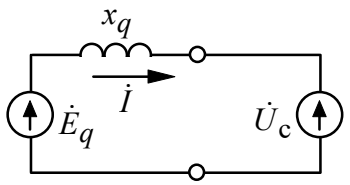


Рис. 21. Схема замещения синхронного явнополюсного двигателя

Ему соответствует схема замещения явнополюсной синхронной машины и векторная диаграмма, представленные на рис. 21, 22 соответственно. Результирующий магнитный поток $\Phi_{\text{рез}}$ пропорционален величине напряжения сети, а поток возбуждения

$\Phi_в$ - ЭДС холостого хода E_0. Соотношения между потоками реакции якоря по продольной и поперечной осям подчиняются приближенно следующему соотношению

$$\frac{\Phi_d}{\Phi_q} = \frac{I_d x_d}{I_q x_q}$$

Векторная диаграмма строится следующим образом:

– по заданным вектору тока $\dot{I}$, вектору напряжения $\dot{U}_с$ и углу сдвига между ними φ с учетом падения напряжения $jx_q\dot{I}$ определяют вектор $\dot{E}_q$ и положение осей q и d;

– находят проекцию вектора тока $\dot{I}_d$ на ось d;

– прибавляя к вектору $\dot{E}_q$ падение напряжения $j\left(x_d - x_q\right)\dot{I}_d$, определяют вектор $\dot{E}_0$.

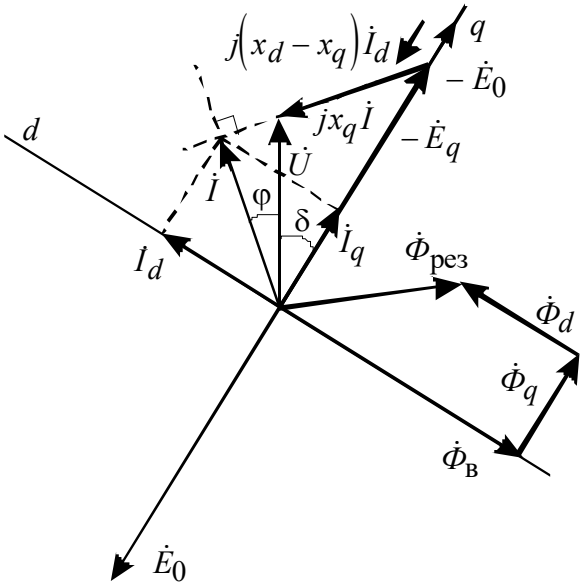


Рис. 22. Векторная диаграмма синхронного явнополюсного двигателя

2.6.3. Основные характеристики синхронного генератора

Синхронный генератор (СГ) в рассматриваемой схеме является единственным источником электроснабжения. Такой режим его работы называется автономным. В автономном режиме свойства СГ оцениваются двумя характеристиками - внешней и регулировочной. *Внешней характеристикой* СГ называют зависимость напряжения статора от тока нагрузки $U_г = f\left(I_г\right)$, определяемую при $n = n_с = const$, $i_в = const$ и $\cos\varphi = const$. В основу расчета внешней характеристики может быть положена схема замещения и векторная диаграмма на рис. 18, 20. Однако из-за нелинейности характеристики холостого хода возникают определенные трудности. С целью упрощения расчета представим зависимость $E_0 = f\left(i_в\right)$ (рис. 23) в виде двух прямолинейных участков: ненасыщенной и насыщенной части.

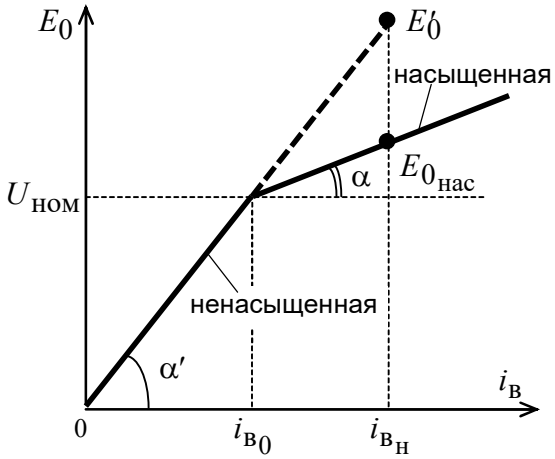


Рис. 23. Аппроксимированная характеристика холостого хода

Пусть точка перехода из ненасыщенной к насыщенной характеристике соответствует

$$\begin{cases} E_0 = U_{ном}; \\ i_в = i_{в0}. \end{cases}$$

Тогда в зависимости от величины результирующего потока в СГ $\Phi_{рез}$, пропорционального $U_г$, синхронная машина будет находиться либо в ненасыщенном состоянии ($U_г < U_{ном}$), либо в насыщенном ($U_г > U_{ном}$), что при расчете учитывается изменением параметров схемы замещения:

$$\begin{cases} E_0 = E_0' \\ x_с = x_{с_{ненас}} \end{cases} \text{при } U_г \le U_{ном}; \qquad \begin{cases} E_0 = E_{0_{нас}} \\ x_с = x_{с_{нас}} \end{cases} \text{при } U_г > U_{ном} \qquad (7)$$

Насыщенное значение синхронного сопротивления можно принять равным

$$x_{\text{с}_{\text{нас}}} = x_{\text{с}_{\text{ненас}}} \cdot \frac{\text{tg}\alpha}{\text{tg}\alpha'} = x_{\text{с}_{\text{ненас}}} \cdot k_{\text{нас}},$$

где $k_{\text{нас}} = \dfrac{\text{tg}\alpha}{\text{tg}\alpha'}$ - коэффициент наклона насыщенной части характеристики.

Связь между E_0 и $i_{\text{в}}$ определяется следующими уравнениями

$$\begin{cases} E_0' = \text{tg}\alpha' \cdot i_{\text{в}} = \dfrac{U_{\text{ном}}}{i_{\text{в}_0}} \cdot i_{\text{в}} = i_{\text{в}}^* \ \text{ при } \ U_{\text{г}} \le U_{\text{ном}} \\ E_{0_{\text{нас}}} = U_{\text{ном}} + \text{tg}\alpha\left(i_{\text{в}} - i_{\text{в}_0}\right) = U_{\text{ном}} + \text{tg}\alpha'\left(i_{\text{в}} - i_{\text{в}_0}\right) \cdot k_{\text{нас}} = U_{\text{ном}}\left(1 + \dfrac{i_{\text{в}} - i_{\text{в}_0}}{i_{\text{в}_0}} k_{\text{нас}}\right) \\ \text{при } \ U_{\text{г}} > U_{\text{ном}} \end{cases} \qquad (8)$$

Расчет внешней характеристики синхронного генератора выполняется в следующей последовательности:

1) задаются исходные данные: $k_{\text{нас}}$, $x_{\text{с}_{\text{ненас}}}$;

2) задаются условия расчета внешней характеристики: $\cos\varphi$, $i_{\text{в}}/i_{\text{в}_0}$;

3) задаются значения тока статора от 0 до $1{,}2 I_{\text{н}}$ (или до тока короткого замыкания $I_{\text{к}} = E_0/x_{\text{с}}$) и определяется напряжение генератора по формуле, полученной из векторной диаграммы (рис. 20)

$$U_{\text{г}} = \sqrt{E_0^2 - \left(x_{\text{с}} I_{\text{г}} \cos\varphi\right)^2} - x_{\text{с}} I_{\text{г}} \sin\varphi .$$

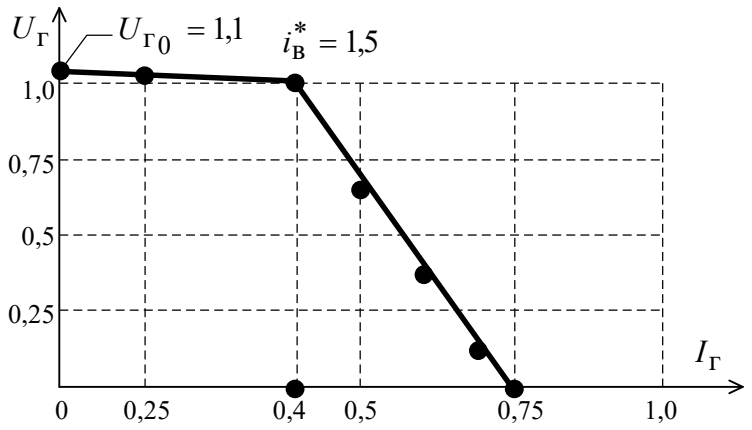
Величины E_0 и $x_{\text{с}}$ зависят от $U_{\text{г}}$ и подчиняются условиям (7) и (8).

Сначала по заданному току статора определяется напряжение генератора в предположении, что магнитная цепь ненасыщенна. Если найденная величина напряжения окажется больше $U_{\text{ном}}$, то следует выполнить перерасчет, но уже по насыщенной характеристике холостого хода.

Пример. Рассчитать внешнюю характеристику для $i_{\text{в}}^* = i_{\text{в}}/i_{\text{в}_0} = 1{,}5$ и $\cos\varphi = 0{,}8$, если $k_{\text{нас}} = 0{,}2$ и $x_{\text{с}_{\text{ненас}}} = 2$.

Результаты расчета сведены в таблицу представлены на рисунке.

$I_{\text{г}}$	0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	$I_{\text{к}} = 0{,}75$
E_0	1,1	1,1	1,1	1,5	1,5	1,5	1,5
$x_{\text{с}}$	0,4	0,4	0,4	2	2	2	2
$U_{\text{г}}$	1,1	1,05	1,004	0,67	0,39	0,16	0



Регулировочной характеристикой генератора называется зависимость тока возбуждения от тока статора, определяемая при $U_{\text{г}} = U_{\text{ном}}$, $n = n_{\text{с}}$ и $\cos\varphi = const$. Расчет этой характеристики проще, чем внешней, т.к. исходным является напряжение генератора, которое позволяет сразу установить - в насыщенном или ненасыщенном состоянии находится генератор и определить соответствующие этому состоянию параметры схемы замещения. Порядок расчета регулировочной характеристики следующий:

1) задаются исходные данные: $k_{\text{нас}}$, $x_{\text{с}_{\text{ненас}}}$;

2) задаются условия расчета: $\cos\varphi$, $U_{\text{г}}$;

3) задаются значения тока статора от 0 до $1{,}2 I_{\text{н}}$ и определяется сначала E_0, а затем $i_{\text{в}}^*$:

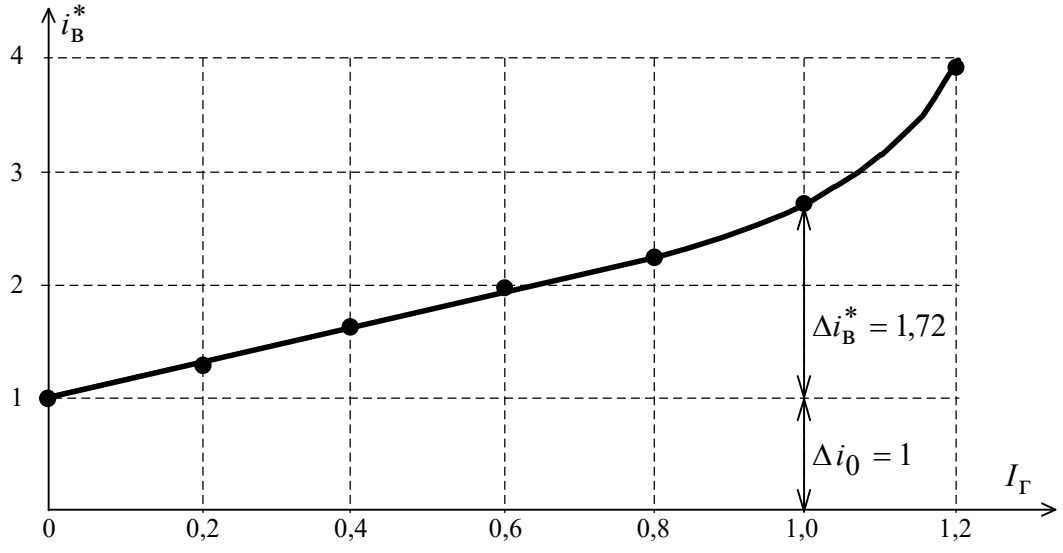
$$E_0 = \sqrt{\left(U_{\text{г}} + x_{\text{с}} I_{\text{г}} \sin\varphi\right)^2 + \left(x_{\text{с}} I_{\text{г}} \cos\varphi\right)^2}$$

$$\begin{cases} i_{\text{в}}^* = E_0 \ \text{ при } \ U_{\text{г}} \le U_{\text{ном}} \\ i_{\text{в}}^* = \dfrac{E_0 - 1}{k_{\text{нас}}} + 1 \ \text{ при } \ U_{\text{г}} > U_{\text{ном}} \end{cases}$$

Пример. Рассчитать регулировочную характеристику для $U_{\text{г}} = U_{\text{ном}}$ и $\cos\varphi = 0{,}8$, если $k_{\text{нас}} = 0{,}2$ и $x_{\text{с}_{\text{ненас}}} = 2$.

Результаты расчета сведены в таблицу.

$I_{\text{г}}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
E_0	1	1,28	1,61	1,97	2,26	0,72	3,94
$i_{\text{в}}^*$	1	1,28	1,61	1,97	2,26	0,72	3,94



2.6.4. Основные характеристики синхронного двигателя

Поведение и свойства синхронного двигателя оцениваются с помощью угловых характеристик активной и реактивной мощностей и *U*-образных характеристик.

Угловыми характеристиками называются зависимости $P = f(\delta)$ и $Q = f(\delta)$, определяемые при $U_{\text{с}} = U_{\text{ном}}$ и $i_{\text{в}} = const$. Угол δ является рабочим углом двигателя и отсчитывается от вектора E_0 к вектору $U_{\text{с}}$ против направления движения часовой стрелки. Этот угол фактически определяет положение ротора относительно результирующего магнитного потока. Аналитические выражения, связывающие активную и реактивную мощности с углом δ, были получены ранее в п. 2.1. Однако они справедливы лишь для неявнополюсной синхрон-

ной машины. Для явнополюсной синхронной машины, у которой $x_d \neq x_q$, угловые характеристики определяются следующим уравнением

$$\begin{cases} P = \dfrac{U_{\text{с}} E_0}{x_d} \sin\delta + \dfrac{U_{\text{с}}^2}{x_q}\left(\dfrac{1}{x_q} - \dfrac{1}{x_d}\right) \sin 2\delta \\ Q = \dfrac{U_{\text{с}} E_0}{x_d} \cos\delta - U_{\text{с}}^2 \left(\dfrac{\sin^2\delta}{x_q} + \dfrac{\cos^2\delta}{x_d}\right). \end{cases}$$

При получении этих уравнений не учитывалось активное сопротивление статорной обмотки, т.к. оно на несколько порядков меньше индуктивного. Можно также считать, что синхронная машина при работе от сети, находится практически в ненасыщенном состоянии, поскольку результирующий магнитный поток, определяемый величиной напряжения, остается неизменным при любой нагрузке и соответствует по характеристике холостого хода току $i_{\text{в}0}$.

Для синхронного двигателя вместо активной мощности иногда удобнее использовать электромагнитный момент. При расчете угловой характеристики в о.е. $P = M$, поэтому первое уравнение системы (9) остается без изменения. По нему можно определить рабочий угол δ. Для этого необходимо построить угловую характеристику $M = f(\delta)$ и сопоставить ее с внешним моментом, номинальная величина которого равна номинальному cosφ:

$$M_{\text{вн}_{\text{ном}}} = \cos\varphi_{\text{ном}}.$$

Устойчивой рабочей частью угловой характеристики является начальная часть характеристики до угла $\delta = \delta_{\text{кр}}$, который соответствует максимальному электромагнитному моменту (рис. 24). Если внешний момент нагрузки превысит его, то двигатель выйдет из синхронизма и перейдет в асинхронный режим или даже остановится.

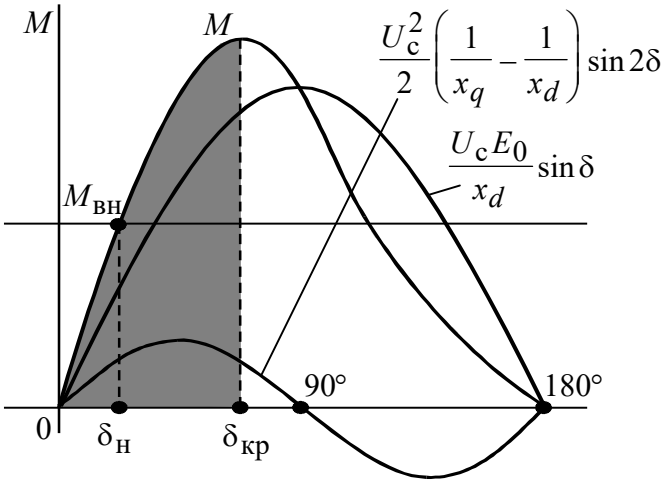


Рис. 24. Угловая характеристика синхронного явнополюсного двигателя

Пример. Рассчитать угловые характеристики синхронного явнополюсного двигателя при работе от сети с номинальным напряжением, если $i_{\text{в}}^* = 1{,}5$, $x_d = 1{,}2$, $x_q = 0{,}8$, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0{,}9$. Определить рабочий угол машины при номинальном моменте.

В соответствии с (9) можно записать

$$\begin{cases} M = \dfrac{1 \cdot 1{,}5}{1{,}2} \sin\delta + \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{1}{0{,}8} - \dfrac{1}{1{,}2}\right) \sin 2\delta = M_{\text{с}} + M_{\text{я}} \\ Q = \dfrac{1 \cdot 1{,}5}{1{,}2} \cos\delta + 1 \cdot \left(\dfrac{\sin^2\delta}{0{,}8} + \dfrac{\cos^2\delta}{1{,}2}\right) = Q_{\text{с}} + Q_{\text{я}}. \end{cases}$$

Здесь обозначены: $M_{\text{с}}$ и $Q_{\text{с}}$ - синхронные составляющие момента и реактивной мощности, зависящие от тока возбуждения; $M_{\text{я}}$ и $Q_{\text{я}}$ - момент и реактивная мощность, обусловленные явнополюсной конструкцией ротора.

Результаты расчета сведены в таблицу.

δ	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
$M_{\text{с}}$	0	0,32	0,625	0,88	1,08	1,21	1,25	1,21	1,08	0,88	0,625	0,32	0
$M_{\text{я}}$	0	0,104	0,18	0,208	0,18	0,104	0	–0,104	–0,18	–0,208	–0,18	–0,104	0
M	0	0,424	0,805	1,09	1,26	1,31	1,25	1,1	0,9	0,67	0,445	0,216	0

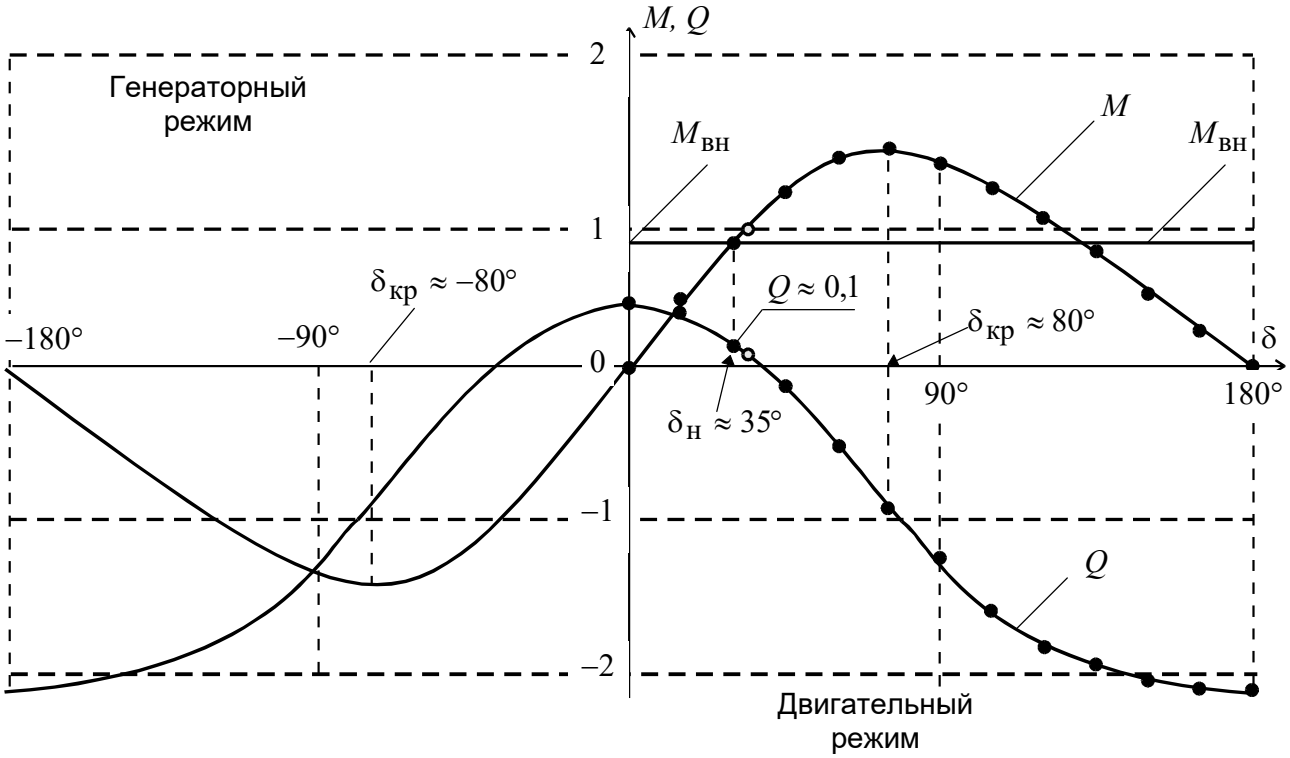


Рис. 25. Расчетные угловые характеристики электромагнитного момента и реактивной мощности

$Q_с$	1,259	1,207	1,08	0,88	0,625	0,32	0	–0,32	–0,625	–0,88	–1,08	–1,207	–1,25
$Q_я$	–0,833	–0,86	–0,94	–1,04	–1,14	–1,22	–1,25	–1,22	–1,14	–1,04	–0,94	–0,86	–0,833
Q	0,417	0,35	0,14	–0,16	–0,515	–0,9	–1,25	–1,54	–1,765	1,92	–2,02	–2,07	–2,08

На рис. 25 представлены графические зависимости угловых характеристик (на рисунке также показан генераторный режим работы - он симметричен относительно двигательного режима).

При номинальном моменте рабочий угол $\delta_н = 35°$ и реактивная мощность $Q = 0{,}1$ о.е. (отдается в сеть).

U-образными характеристиками синхронной машины, подключенной к сети с напряжением $U_с$, называют зависимость тока статора I от тока возбуждения $i_в$, которая рассчитывается при постоянной активной мощности или моменте на валу машины. Характеристику $I = f(i_в)$ можно теоретически рассчитать, используя векторную диаграмму явнополюсной машины. При этом задается ток статора I в пределах от некоторого минимального значения до 1,2 номинального, определяется E_0 и по характеристике холостого хода находится ток $i_в$. При работе от сети с напряжением близким к номинальному можно считать машину ненасыщенной и использовать ненасыщенную характеристику холостого хода.

В соответствии с векторной диаграммой расчет проходит в три этапа:

1) рассчитывается E_q по заданным значениям I, $U_с$ и P

$$E_q = \sqrt{\left(I\cos\varphi\, x_q\right)^2 + \left(U_с + I\sin\varphi\, x_q\right)^2}$$

или

$$E_q = \sqrt{\left(\frac{Px_q}{U_c}\right)^2 + \left(U_с + \frac{Qx_q}{U_с}\right)^2},$$

где $Q = \pm\sqrt{S^2 - P^2}$; $S = U_с I$ при $S \geq P$.

Таким образом, начальное значение тока статора определяется следующим соотношением

$$I_{\min} \geq P/U_{\text{с}} ;$$

2) рассчитывается угол δ между векторами $\dot{U}_{\text{с}}$ и $\dot{E}_q$ и угол ψ между векторами $\dot{I}$ и $\dot{E}_q$

$$\delta = \arcsin\frac{Px_q}{E_q U_{\text{с}}} ; \qquad \varphi = \pm\arcsin\frac{Q}{S} \qquad \psi = \delta + \varphi ;$$

3) рассчитываются E_0 и $i_{\text{в}}$: $E_0 = E_q + I_d\left(x_d - x_q\right)$; $I_d = I\sin\psi$; $i_{\text{в}}^* = E_0$ (для ненасыщенной характеристики холостого хода).

Одновременно при одном и том же токе статора определяются два значения тока возбуждения $i_{\text{в}}^*$ - одно соответствует выдаче реактивной мощности в сети $Q > 0$, второе - ее потреблению $Q < 0$.

Пример. Рассчитать U-образную характеристику для $P = 0{,}5$, если $x_d = 1{,}2$, $x_q = 0{,}8$, $U_{\text{с}} = 1$, $I_{\min} = P/U_{\text{с}} = 0{,}5/1 = 0{,}5$.

I	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
Правая ветвь									
Q	0	0,33	0,49	0,62	0,75	0,87	0,98	1,09	1,2
E_q	1,08	1,33	1,45	1,55	1,65	1,74	1,83	1,91	2,0
δ	21,8°	17,5°	16,03°	15,0°	14,0°	13,3°	12,6°	12,1°	11,5°
$i_{\text{в}}$	1,15	1,51	1,69	1,84	1,99	2,12	2,25	2,38	2,51
Левая ветвь									
Q	0	–0,33	–0,49	–0,62	–0,75	–0,87	–0,98	–1,09	–1,2
E_q	1,08	0,84	0,73	0,64	0,57	0,5	0,45	0,42	0,4
δ	21,8°	28,6°	33,3°	38,6°	44,9°	52,5°	61,6°	72,3°	84,3°
$i_{\text{в}}$	1,15	0,82	0,67	0,57	0,5	0,45	0,44	0,48	0,55

Левая ветвь U-образной характеристики ограничивается током $i_{\text{в}} = 0{,}44$. В дальнейшем этот ток возрастает, что соответствует выходу за границу устойчивости.

На рис. 26 представлена U-образная характеристика, построенная по данным таблицы. Для сравнения на этом же графике изображена U-образная характеристика при $P = 0$.

3. МЕТОДИКА И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТА УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА

На основании описанных в предыдущем разделе моделей отдельных элементов можно составить следующую расчетную схему электромеханической системы (рис. 27).

В этой расчетной схеме имеется единственный узел, к которому подключены несколько ветвей. Если на шинах этого узла будет задано напряжение $U_у$, то установившийся режим отдельных элементов и всей системы в целом определяется достаточно просто. Изложим последовательность этапов решения.

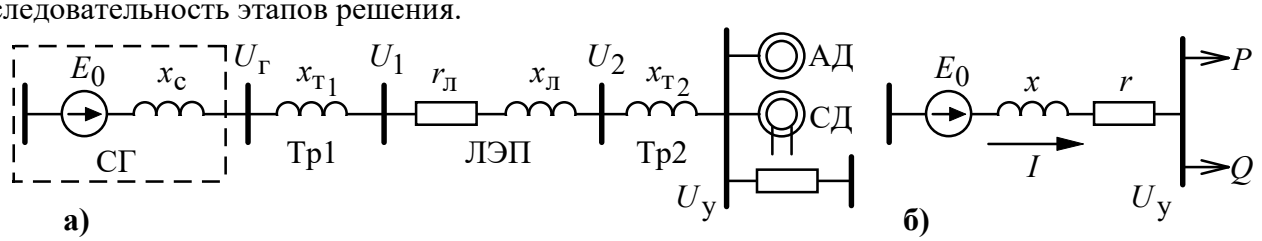


Рис. 27. Полная (а) и свернутая (б) расчетная схемы системы

1. Рассчитываются по исходным данным параметры отдельных элементов системы в физических единицах и в относительных единицах базисной системы элемента.

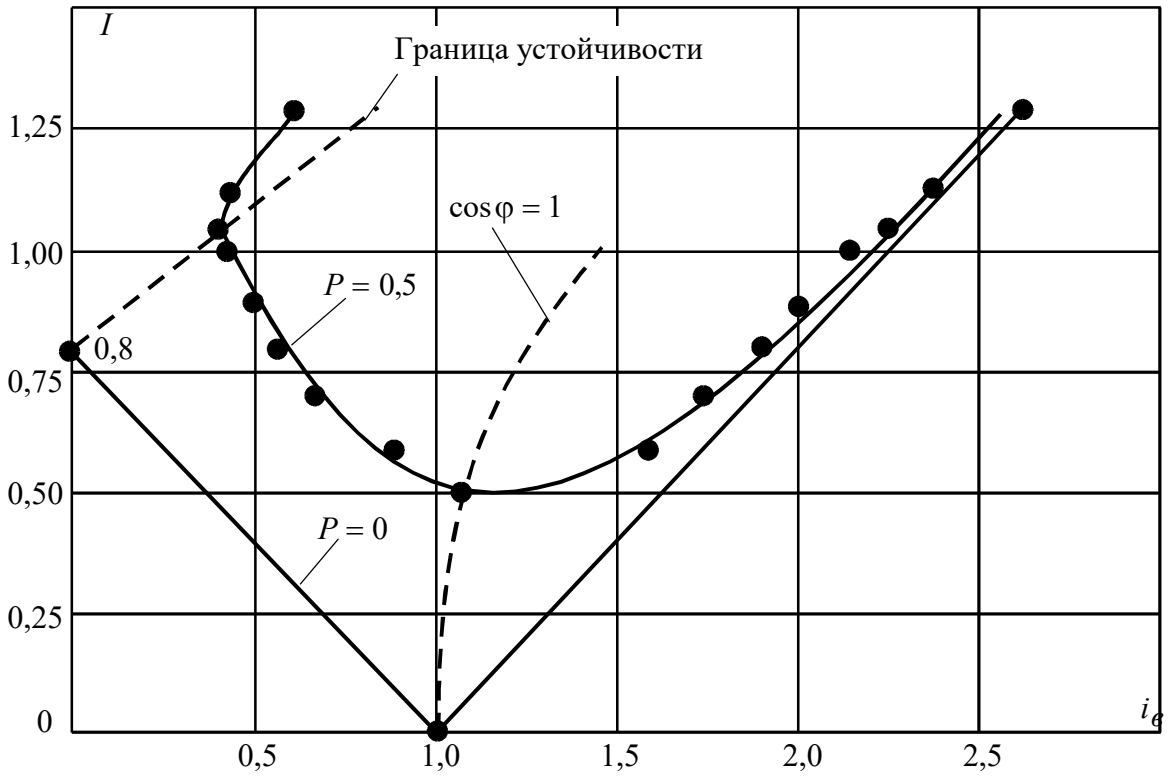


Рис. 26. U-образная характеристика синхронного двигателя

2. Рассчитываются базисная мощность и производные от нее базисные величины эквивалентных АД и СД путем простого умножения базисной мощности одного элемента на общее количество однотипных элементов.

3. Выбирается базисная мощность и базисное напряжение питающей сети, в качестве которых удобно принять суммарную полную генерирующую мощность СГ и линейное напряжение узла. Приводятся к этой системе параметры элементов питающей сети и рассчитывается общее сопротивление x и r. Если r окажется на порядок меньше x, то им можно пренебречь.

4. Задается напряжение узла, внешний момент АД, внешний момент СД (или P и Q), мощность статической нагрузки и рассчитываются режимы работы АД, СД, СН с построением векторных диаграмм напряжений и токов.

5. Определяется суммарная активная и реактивная мощности потребителей узла и приводятся к базисной мощности сети.

6. Определяются E_0 синхронного генератора, ток линии, напряжения на шинах генератора $U_г$, шинах высокого напряжения в начале линии U_1 и в конце линии U_2. Строится векторная диаграмма питающей сети и находятся все величины в именованных единицах.

7. Рассчитывается режим работы генератора с построением векторной диаграммы и определяется ток возбуждения.

Все векторные диаграммы следует строить в масштабе.

4. ПРИМЕР РАСЧЕТА

4.1. Исходные данные

4.1.1. Потребители узла нагрузки

1) Асинхронный двигатель: $P_2 = 2000$ кВт, $U_л = 6$ кВ, $\eta = 0{,}94$, $\cos\varphi = 0{,}8$, $n_с = 375$ об/мин; $n_р = 371$ об/мин; $M_{max}/M_{ном} = 2{,}2$.

Общее количество - $n = 5$.

2) Синхронный двигатель: $P_2 = 5000$ кВт, $U_л = 6$ кВ, $\eta = 0{,}95$, $\cos\varphi = 0{,}9$, $n_с = 250$ об/мин; $i_{во} = 200\ A$; $x_d = 1{,}2$; $x_q = 0{,}9$.

Общее количество - $m = 2$.

3) Статическая нагрузка: $P = 6000$ кВт; $Q = 1000$ кВАр.

4.1.2. Питающая сеть

1) Трансформаторы *Тр*1 и *Тр*2: $S = 32000$ кВ·А, $U_{вн} = 115$ кВ, $U_{нн} = 6{,}3$ кВ, $u_к = 10{,}5\%$, $P_к = 140$ кВт, $P_0 = 40$ кВт, $I_m = 0{,}7\%$, схема - Y/Δ.

2) Линия электропередачи: $U = 110$ кВ, $\ell = 50$ км, $x_0 = 40$ Ом/100 км, $r_0 = 30$ Ом/100 км, двухцепная.

3) Синхронный генератор: $P = 32000$ кВт, $U_л = 6{,}3$ кВ, $\cos\varphi = 0{,}8$, $x_с = 1{,}8$, $i_{во} = 320$ А. Схема - «Y».

4.2. Расчет параметров схем замещения элементов

4.2.1. Параметры асинхронного двигателя

1) Электрические параметры и номинальные величины

$$x_к = \frac{1}{2\cdot\left(M_{max}/M_{ном}\right)\cdot\eta\cdot\cos\varphi} = \frac{1}{2\cdot 2{,}2\cdot 0{,}8\cdot 0{,}94} = 0{,}302 \text{ о.е.};$$

$$x_1 = x_2' = x_к/2 = 0{,}302/2 = 0{,}151 \text{ о.е.};$$

$$M_{ном} = \eta\cdot\cos\varphi = 0{,}94\cdot 0{,}8 = 0{,}75 \text{ о.е.};$$

$$s_N = \frac{n_с - n_р}{n_с} = \frac{375-371}{375} = 0{,}0107 \text{ о.е.}, \qquad \left(s_N\% = 1{,}07\ \%\right);$$

$$r_1 = \frac{s_N}{2\cdot M_{ном}}\left(1+\sqrt{1-\left(2x_к\cdot M_{ном}\right)^2}\right) = \frac{0{,}0107}{2\cdot 0{,}75}\left(1+\sqrt{1-\left(2\cdot 0{,}302\cdot 0{,}75\right)^2}\right) = 0{,}013 \text{ о.е.};$$

$$r_2' = r_1 = 0{,}013 \text{ о.е.};$$

$$I_{2ном}' = \frac{1}{\sqrt{\left[r'^2\left(1+1/s_N\right)^2 + x_к^2\right]}} = \frac{1}{\sqrt{\left[0{,}013\cdot\left(1+1/0{,}0107\right)\right]^2 + 0{,}302^2}} = 0{,}766 \text{ о.е.};$$

$$\varphi_{2_{\text{ном}}} = \text{arctg}\frac{x_{\text{к}}}{r_2'\left(1+\frac{1}{s_N}\right)} = \text{arctg}\frac{0{,}302}{0{,}013\cdot\left(1+\frac{1}{0{,}0107}\right)} = 13{,}4^\circ;$$

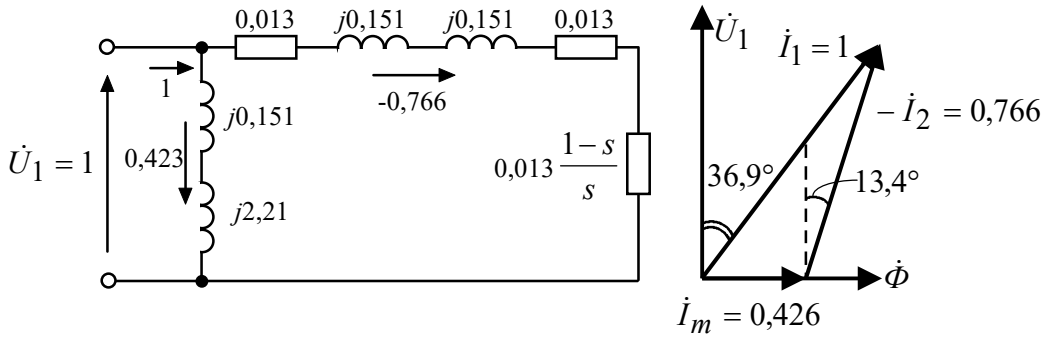
$$\varphi_{1\text{ном}} = \arccos\varphi_{\text{ном}} = \arccos 0{,}8 = 36{,}9^\circ;$$

$$I_{1_{\text{ном}}} = 1 \text{ о.е.};$$

$$I_m = I_{1\text{ном}}\sin\varphi_{1\text{ном}} - I_{2\text{ном}}'\sin\varphi_{2\text{ном}} = 1\cdot\sin 36{,}9^\circ - 0{,}766\cdot\sin 13{,}4^\circ = 0{,}423 \text{ о.е.};$$

$$I_{\text{хх}_{\text{АД}}} = I_m = 42{,}3\%;$$

$$x_m = 1/I_m - x_1 = 1/0{,}423 - 0{,}151 = 2{,}21 \text{ о.е.}$$



2) Базисные величины:

$$S_{\text{б}} = \frac{P_2}{\eta\cos\varphi} = \frac{2000}{0{,}94\cdot 0{,}8} = 2660 \text{ кВ}\cdot\text{А}; \qquad U_{\text{б}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3464 \text{ В};$$

$$I_{\text{б}} = \frac{S_{\text{б}}}{3U_{\text{б}}} = \frac{2660}{3\cdot 3464}\cdot 1000 = 256 \text{ А}; \qquad Z_{\text{б}} = \frac{U_{\text{б}}}{I_{\text{б}}} = \frac{3464}{256} = 13{,}5 \text{ Ом};$$

$$M_{\text{б}} = \frac{S_{\text{б}}}{\Omega_{\text{б}}} = \frac{2660\cdot 10^3}{2\pi\cdot 50}\cdot 8 = 68000 \text{ нм}; \qquad \Omega_{\text{б}} = \frac{2\pi f_1}{p};$$

$$p = \frac{60 f_1}{n_{\text{с}}} = \frac{60\cdot 50}{375} = 8.$$

3) Базисные величины эквивалентного АД

$$S_{\text{б}_{\text{АД}}} = nS_{\text{б}} = 5\cdot 2660 = 13300 \text{ кВ}\cdot\text{А}; \qquad U_{\text{б}_{\text{АД}}} = U_{\text{б}} = 3464 \text{ В};$$

$$I_{\text{б}_{\text{АД}}} = n\cdot I_{\text{б}} = 5\cdot 256 = 1280 \text{ А}; \qquad Z_{\text{б}_{\text{АД}}} = Z_{\text{б}}/n = 13{,}5/5 = 2{,}7 \text{ Ом};$$

$$M_{\text{б}_{\text{АД}}} = n\cdot M_{\text{б}} = 5\cdot 68000 = 340\cdot 10^3 \text{ нм}.$$

4.2.2. Параметры синхронного двигателя

1) Электрические параметры и номинальные величины: $x_d = 1{,}2$ о.е.; $x_q = 0{,}9$ о.е.

$$E_{q_{\text{ном}}} = \frac{x_q}{U_{\text{с}}}\sqrt{P_{\text{ном}}^2 + \left(Q_{\text{ном}} + \frac{U_{\text{с}}^2}{x_q}\right)^2} = \frac{0{,}9}{1}\sqrt{0{,}9^2 + \left(0{,}436 + \frac{1}{0{,}9}\right)^2} = 1{,}61 \text{ о.е.};$$

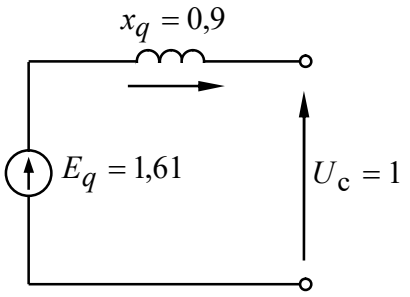
$$P_{\text{ном}} = \cos\varphi = 0{,}9 \text{ о.е.}; \qquad Q_{\text{ном}} = \sqrt{1 - P_{\text{ном}}^2} = \sqrt{1 - 0{,}9^2} = 0{,}436 \text{ о.е.};$$

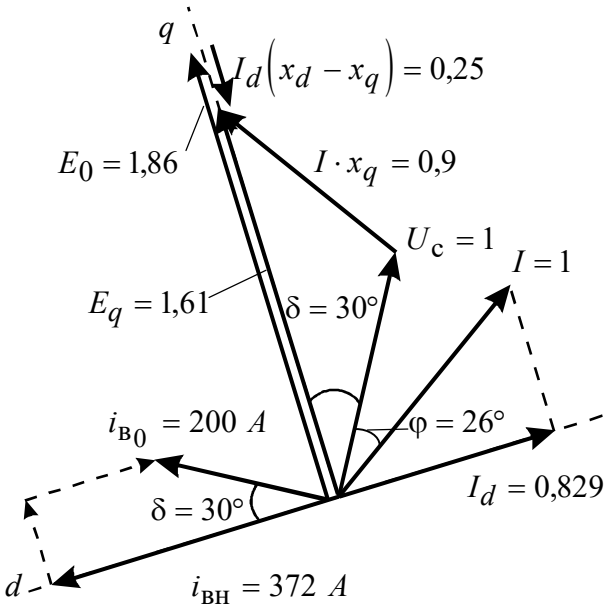
$$\varphi_{\text{ном}} = \arccos\varphi = \arccos 0{,}9 = 26^\circ; \quad \delta_{\text{ном}} = \arcsin\frac{x_q P_{\text{ном}}}{E_{q_{\text{ном}}} U_{\text{с}}} = \arcsin\frac{0{,}9\cdot 0{,}9}{1{,}61\cdot 1} = 30^\circ;$$

$$I_d = I\cdot\sin\left(\varphi_{\text{ном}} + \delta_{\text{ном}}\right) = 1\cdot\sin(26^\circ + 30^\circ) = 0{,}829 \text{ о.е.};$$

$$E_{0_{\text{ном}}} = E_{q_{\text{ном}}} + \left(x_d - x_q\right)\cdot I_d = 1{,}61 + (1{,}2 - 0{,}9)\cdot 0{,}829 = 1{,}86 \text{ о.е.};$$

$i_{в_{ном}} = i_{в_0} \cdot E_{0_{ном}} = 200 \cdot 1{,}86 = 372$ А .





2) Базисные величины:

$S_б = \dfrac{P_2}{\eta \cos\varphi} = \dfrac{5000}{0{,}95 \cdot 0{,}9} = 5850$ кВ · А ; $\qquad U_б = \dfrac{U_л}{\sqrt{3}} = \dfrac{6000}{\sqrt{3}} = 3464$ В ;

$I_б = \dfrac{S_б}{3 \cdot U_б} = \dfrac{5850 \cdot 10^3}{3 \cdot 3464} = 563$ А ; $\qquad Z_б = \dfrac{U_б}{I_б} = \dfrac{3464}{563} = 6{,}16$ Ом ;

$M_б = \dfrac{S_б}{\Omega_б} = \dfrac{5850 \cdot 10^3}{2\pi \cdot 50} \cdot 12 = 224 \cdot 10^3$ нм ; $\qquad p = \dfrac{60 f_1}{n_с} = \dfrac{60 \cdot 50}{250} = 12$.

3) Базисные величины эквивалентного СД:

$S_{б_{СД}} = m \cdot S_б = 2 \cdot 5850 = 11700$ кВ · А ;

$U_{б_{СД}} = U_б = 3464$ В ;

$I_{б_{СД}} = m \cdot I_б = 2 \cdot 563 = 1126$ А

$Z_{б_{СД}} = Z_б / m = 6{,}16/2 = 3{,}08$ Ом ;

$M_{б_{СД}} = m \cdot M_б = 2 \cdot 224 \cdot 10^3 = 448 \cdot 10^3$ нм ;

$I_{в_{ном\ СД}} = m \cdot i_{в_{ном}} = 2 \cdot 372 = 744$ А .

4.2.3. Параметры статической нагрузки

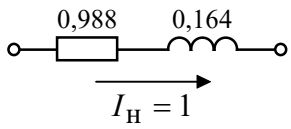
1) Электрические параметры и номинальные величины:

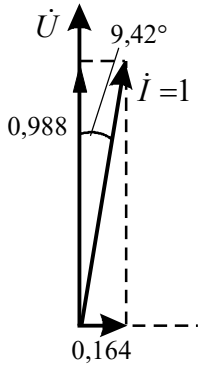
$S_н = \sqrt{P_н^2 + Q_н^2} = \sqrt{6000^2 + 1000^2} = 6083$ кВ · А .

$r_н = P_н / S_н = 6000/6083 = 0{,}988$ о.е. ;

$x_н = Q_н / S_н = 1000/6083 = 0{,}164$ о.е. ;

$\varphi_н = \mathrm{arctg}\dfrac{x_н}{r_н} = \mathrm{arctg}\dfrac{0{,}164}{0{,}988} = 9{,}42°$.





2) Базисные величины:

$S_{б_{СН}} = S_н = 6083$ кВ · А ; $\qquad U_{б_{СН}} = U_л / \sqrt{3} = 6000/\sqrt{3} = 3464$ В ;

$I_{б_{СН}} = S_б / 3U_б = 6083 \cdot 10^3 / (3 \cdot 3464) = 585$ А ; $\quad Z_{б_{СН}} = U_б / I_б = 3470/585 = 5{,}93$ Ом .

4.2.4. Параметры трансформаторов

1) Электрические параметры, приведенные к ВН:

$$x_m = \frac{U_{ВН}}{\sqrt{3} \cdot I_m[А]} = \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1{,}12} = 59040 \text{ Ом}, \text{ где } I_m[A] = \frac{I_m[\%] \cdot I_{ном_{ВН}}}{100} = \frac{0{,}7 \cdot 160}{100} = 1{,}12 \text{ А};$$

$$I_{ном_{ВН}} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{ВН}} = \frac{32000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 160 \text{ А};$$

$$x_к = \frac{u_к}{100} \cdot \frac{U_{ВН}}{\sqrt{3} \cdot I_{ном_{ВН}}} = \frac{10{,}5}{100} \cdot \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 160} = 43{,}4 \text{ Ом}; \qquad x_1 = x_2' = \frac{x_к}{2} = \frac{43{,}4}{2} = 21{,}7 \text{ Ом};$$

$$r_к = \frac{P_к}{3 \cdot I^2_{ном_{ВН}}} = \frac{140}{3 \cdot 160^2} \cdot 10^3 = 1{,}8 \text{ Ом}; \qquad r_1 = r_2' = \frac{r_к}{2} = \frac{1{,}8}{2} = 0{,}9 \text{ Ом};$$

$$r_m = \frac{P_0}{3 \cdot I^2_m[А]} = \frac{40}{3 \cdot 1{,}12^2} \cdot 10^3 = 10543 \text{ Ом}.$$

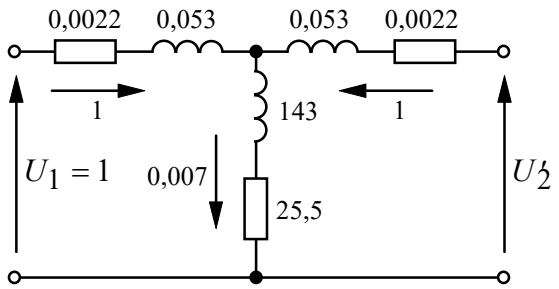
2) Базисные величины:

$S_{б_т} = S = 32000$ кВ · А ; $\quad U_{б_т} = U_{ВН} / \sqrt{3} = 115/\sqrt{3} = 66{,}5$ кВ ;

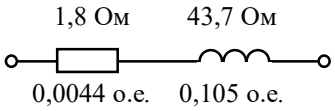
$I_{б_т} = I_{ном_{ВН}} = 160$ А ; $\quad Z_{б_т} = U_{б_т} / I_{б_т} = 66{,}5 \cdot 10^3 / 160 = 413$ Ом .

3) Электрические параметры трансформатора в о.е.:

Полная схема замещения



Упрощенная схема замещения

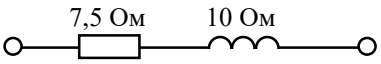


$$x_m = \frac{x_m[Ом]}{Z_{б_т}} = \frac{59040}{413} = 143 \text{ о.е.}; \qquad r_m = \frac{r_m[Ом]}{Z_{б_т}} = \frac{10543}{413} = 25{,}5 \text{ о.е.};$$

$$x_1 = x_2' = \frac{x_к[Ом]}{2 \cdot Z_{б_т}} = \frac{43{,}4}{2 \cdot 413} = 0{,}053 \text{ о.е.}; \qquad r_1 = r_2' = \frac{r_к[Ом]}{2 \cdot Z_{б_т}} = \frac{1{,}8}{2 \cdot 413} = 0{,}0022 \text{ о.е.}$$

4.2.5. Параметры линии электропередачи

$$r_л = \frac{r_0 \ell}{2 \cdot 100} = \frac{30 \cdot 50}{200} = 7{,}5 \text{ Ом}; \quad x_л = \frac{x_0 \ell}{2 \cdot 100} = \frac{40 \cdot 50}{200} = 10 \text{ Ом}.$$



4.2.6. Параметры синхронного генератора

1) Электрические параметры и номинальные величины:

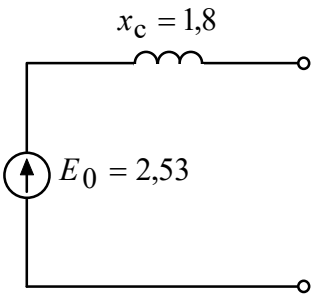
$x_с = 1{,}8$ о.е.

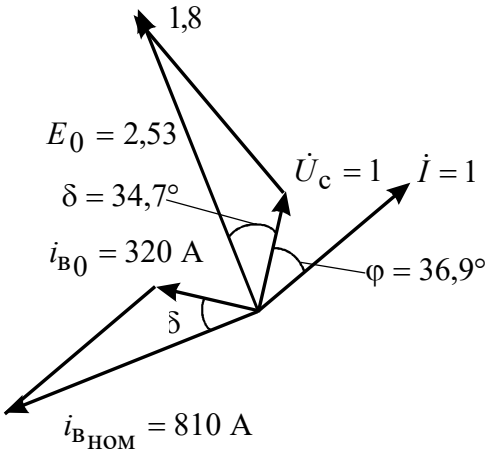
$$E_{0_{ном}} = \frac{x_с}{U_с} \sqrt{P^2_{ном} + \left(Q_{ном} + \frac{U_с^2}{x_с}\right)^2} = \frac{1{,}8}{1} \sqrt{0{,}8^2 + \left(0{,}6 + \frac{1}{1{,}8}\right)^2} = 2{,}53 \text{ о.е.};$$

$P_{\text{ном}} = \cos\varphi = 0{,}8$ о.е.; $\qquad Q_{\text{ном}} = \sqrt{1 - P_{\text{ном}}^2} = \sqrt{1 - 0{,}8^2} = 0{,}6$ о.е.;

$\varphi_{\text{ном}} = \arccos\varphi = \arccos 0{,}8 = 36{,}9°$; $\qquad \delta_{\text{ном}} = \arcsin\dfrac{x_{\text{с}} P_{\text{ном}}}{E_{0_{\text{ном}}} U_{\text{с}}} = \arcsin\dfrac{1{,}8 \cdot 0{,}8}{2{,}53 \cdot 1} = 34{,}7°$;

$i_{\text{вн}} = i_{\text{в}0} E_0 = 320 \cdot 2{,}53 = 810$ А.





2) Базисные величины:

$S_{\text{б}_{\text{СГ}}} = P/\cos\varphi = 32000/0{,}8 = 40000$ кВ·А;

$U_{\text{б}_{\text{СГ}}} = U_{\text{л}}/\sqrt{3} = 6{,}3/\sqrt{3} = 3{,}64$ кВ;

$I_{\text{б}_{\text{СГ}}} = S_{\text{б}_{\text{СГ}}}/3U_{\text{б}_{\text{СГ}}} = 40800/3 \cdot 3{,}64 = 3670$ А;

$Z_{\text{б}_{\text{СГ}}} = U_{\text{б}_{\text{СГ}}}/I_{\text{б}_{\text{СГ}}} = 3640/3670 = 0{,}999$ Ом.

4.3. Расчет сопротивления связи между шинами генераторного напряжения и шинами узла нагрузки

Сопротивления связи, приведенные к напряжению 115 кВ:

$x_{\text{вн}} = x_{\text{к}_{\text{Т1}}} + x_{\text{к}_{\text{Т2}}} + x_{\text{л}} = 43{,}4 + 43{,}4 + 10 = 96{,}8$ Ом;

$r_{\text{вн}} = r_{\text{к}_{\text{Т1}}} + r_{\text{к}_{\text{Т2}}} + r_{\text{л}} = 1{,}8 + 1{,}8 + 7{,}5 = 11{,}1$ Ом.

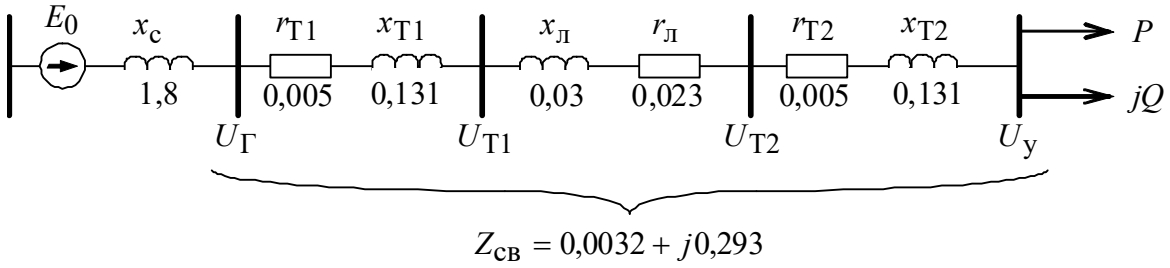
Для перехода к относительным единицам примем в качестве базисной мощности сети базисную мощность генератора $S_{\text{б}_{\text{С}}} = S_{\text{б}_{\text{СГ}}} = 40000$ кВ·А и разделим на базисное сопротивление $z_{\text{б}_{\text{с}}} = U_{\text{л}}^2/S_{\text{б}_{\text{с}}} = \dfrac{115^2}{40000} \cdot 10^3 = 330{,}6$ Ом, тогда получим:

$x_{\text{св}} = \dfrac{x_{\text{вн}}}{Z_{\text{б}_{\text{с}}}} = \dfrac{96{,}8}{330{,}6} = 0{,}293$ о.е.; $\qquad r_{\text{св}} = \dfrac{r_{\text{вн}}}{Z_{\text{б}_{\text{с}}}} = \dfrac{11{,}1}{330{,}6} = 0{,}032$ о.е.;

$x_{\text{Т1}} = x_{\text{Т2}} = \dfrac{x_{\text{к}}}{Z_{\text{б}_{\text{с}}}} = \dfrac{43{,}7}{330{,}6} = 0{,}131$ о.е.; $\qquad r_{\text{Т1}} = r_{\text{Т2}} = \dfrac{r_{\text{к}}}{Z_{\text{б}_{\text{с}}}} = \dfrac{1{,}8}{330{,}6} = 0{,}005$ о.е.

$x_{\text{л}} = \dfrac{x_{\text{л}}[\text{Ом}]}{Z_{\text{б}_{\text{с}}}} = \dfrac{10}{330{,}6} = 0{,}03$ о.е.; $\qquad r_{\text{л}} = \dfrac{r_{\text{л}}[\text{Ом}]}{Z_{\text{б}_{\text{с}}}} = \dfrac{7{,}5}{330{,}6} = 0{,}023$ о.е.

При одинаковой базовой мощности генератора и сети $x_{\text{с}}$ генератора в о.е. остается неизменным и равным $x_{\text{с}} = 1{,}8$ о.е.



4.4. Расчет номинального режима потребителей узла при напряжении узла $U_{\text{у}} = 1$ о.е.

4.4.1. Расчет режима АД

Рассчитаем механическую характеристику $M = f(s)$ и $M/M_{\text{ном}} = f(s)$ по схеме замещения АД (см. п. 4.2.1) и формулам (6) (см. п. 2.5.3)

$$M = \frac{U_1^2}{\left[r_2'\left(1+\frac{1}{s}\right)\right]^2 + x_{\text{к}}^2} \cdot \frac{r_2'}{s} = \frac{1}{\left[0{,}013\cdot\left(1+\frac{1}{s}\right)\right]^2 + 0{,}302^2} \cdot \frac{0{,}013}{s}$$

$$M_{\text{ном}} = \eta_{\text{ном}} \cos\varphi = 0{,}94 \cdot 0{,}8 = 0{,}75 \text{ о.е.}$$

Расчет достаточно выполнить до $s_{\text{кр}} = r_2'/x_{\text{к}} = 0{,}013/0{,}302 = 0{,}044$, которому соответствует максимальный момент

$$M_{\max} = \frac{1}{\left[0{,}013\cdot\left(1+\frac{1}{0{,}044}\right)\right]^2 + 0{,}302^2} \cdot \frac{0{,}013}{0{,}044} = 1{,}61 \text{ о.е.}$$

или по отношению к номинальному моменту: $\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}} = \frac{1{,}61}{0{,}75} = 2{,}15$. Это значение близко к заданной величине.

Результаты расчета сведены в таблицу

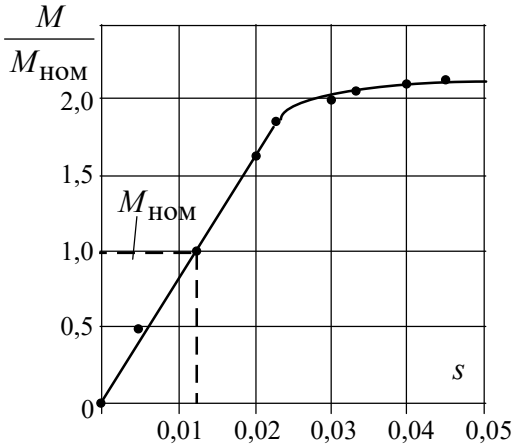
S, о.е.	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,045
M, о.е.	0,365	0,7	0,98	1,2	1,36	1,47	1,54	1,57	1,59
$M/M_{\text{ном}}$	0,485	0,926	1,3	1,595	1,812	1,96	2,05	2,09	2,1

Построим $M/M_{\text{ном}} = f(s)$ и для номинального внешнего момента определим величину номинального скольжения s_N: $s_N = 0{,}0109$ о.е.

Необходимо уточнить и скорректировать это значение, рассчитав по нему $M/M_{\text{ном}}$, которое должно быть равно 1.

По найденному значению s_N определяется величина и фазовый сдвиг тока статора.

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left[r_2'\left(1+\frac{1}{s_N}\right)\right]^2 + x_к^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left[0{,}013\cdot\left(1+\frac{1}{0{,}0109}\right)\right]^2 + 0{,}302^2}} = 0{,}781 \text{ о.е.};$$



$$\varphi_2 = \text{arctg}\frac{x_к}{r_2'\left(1+\frac{1}{s_N}\right)} = \text{arctg}\frac{0{,}302}{0{,}013\cdot\left(1+\frac{1}{0{,}0109}\right)} = 13{,}6°;$$

$$I_m = \frac{U_1}{x_1 + x_m} = \frac{1}{0{,}151 + 2{,}21} = 0{,}421;$$

$$I_{1r} = I_m + I_2' \sin\varphi_2 = 0{,}421 + 0{,}781\sin 13{,}6° = 0{,}607 \text{ о.е.};$$

$$I_{1a} = I_2' \cos\varphi_2 = 0{,}781\cos 13{,}6° = 0{,}759 \text{ о.е.};$$

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2} = \sqrt{0{,}607^2 + 0{,}759^2} = 0{,}972 \text{ о.е.}$$

Величина тока I_1 должна быть при номинальном напряжении близка к единице. Некоторое отличие объясняется приближенным определением параметров двигателя.

$$\varphi_1 = \text{arctg}\frac{I_{1r}}{I_{1a}} = \text{arctg}\frac{0{,}607}{0{,}759} = 38{,}66°.$$

Потребляемая мощность двигателя из сети равна

$$S_1 = U_у I_1 = 1\cdot 0{,}972 = 0{,}972 \text{ о.е.}; \qquad P_1 = U_у I_{1a} = 1\cdot 0{,}759 = 0{,}759 \text{ о.е.};$$

$$Q_1 = U_у I_{1r} = 1\cdot 0{,}607 = 0{,}607 \text{ о.е.}$$

В именованных единицах для $S_{б_{АД}} = 13300$ кВ·А:

$$S_{АД} = S_1 \cdot S_{б_{АД}} = 0{,}972\cdot 13300 = 12930 \text{ кВ·А};$$

$$P_{АД} = P_1 \cdot S_{б_{АД}} = 0{,}759\cdot 13300 = 10100 \text{ кВт};$$

$$Q_{АД} = Q_1 \cdot S_{б_{АД}} = 0{,}607\cdot 13300 = 8076 \text{ кВАр}.$$

4.4.2. Расчет установившегося режима СД

Рассчитаем угловую характеристику СД $M = f(\delta)$ и $M/M_{ном} = f(\delta)$ в диапазоне δ от 0 до 90°:

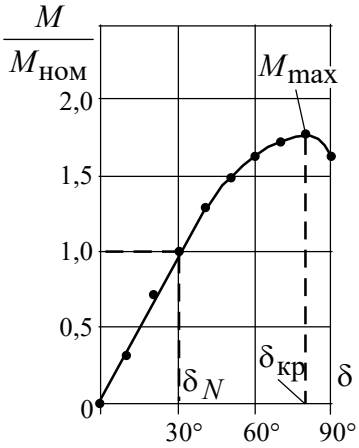
$$M = \frac{U_у E_0}{x_d}\sin\delta + \frac{U_у^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\sin 2\delta = \frac{1\cdot 1{,}86}{1{,}2}\sin\delta + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{0{,}9} - \frac{1}{1{,}2}\right)\sin 2\delta = 1{,}55\sin\delta + 0{,}14\sin 2\delta;$$

$M_{ном} = \cos\varphi = 0{,}9$ и $i_в = i_{в_{ном}}$.

Результаты сведены в таблицу:

δ, град	10	20	30	40	50	60	70	80	90
M, о.е.	0,317	0,621	0,897	1,135	1,326	1,464	1,546	1,574	1,548
$M/M_{ном}$	0,353	0,690	0,997	1,261	1,473	1,627	1,718	1,748	1,721

Построим зависимость $M/M_{\text{ном}} = f(\delta)$ и по ней для номинального момента определим угол δ_N. Найденное по графику значение угла δ_N следует уточнить по формуле для активной мощности, которая для номинального режима равна $\cos\varphi$.



Уточненное значение $\delta_N = 30°$, ему соответствуют:

активная мощность

$$P = M = \frac{1\cdot 1{,}86}{1{,}2}\sin 30° + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{0{,}9} - \frac{1}{1{,}2}\right)\sin(2\cdot 30°) = 0{,}9 \text{ о.е.};$$

реактивная мощность

$$Q = \frac{U_{\text{у}}E_0}{x_d}\cos\delta - U_{\text{у}}^2\left(\frac{\sin^2\delta}{x_q} + \frac{\cos^2\delta}{x_d}\right) = \frac{1\cdot 1{,}86}{1{,}2}\cos 30° - 1\cdot\left(\frac{\sin^2 30°}{0{,}9} + \frac{\cos^2 30°}{1{,}2}\right) = 0{,}436 \text{ о.е.}$$

Следует учитывать в дальнейшем при определении суммарной мощности узла, что реактивная мощность двигателя генерируется (отдается) в сеть, а не потребляется от сети как, например, в случае асинхронного двигателя и ее нужно суммировать со знаком «–». Генерирование Q в сеть происходит в режиме перевозбуждения СД, когда $i_{\text{в}} > i_{\text{в}0}$.

В именованных единицах для $S_{\text{б}_{\text{СД}}} = 11700$ кВ·А и $I_{\text{б}_{\text{СД}}} = 1126$ А:

$P_{\text{СД}} = 0{,}9\cdot 11700 = 10500$ кВт; $\quad Q_{\text{СД}} = 0{,}436\cdot 11700 = 5096$ кВАр;

$S_{\text{СД}} = 1\cdot 11700 = 11700$ кВ·А; $\quad I_{\text{СД}} = 1\cdot 1126 = 1126$ А;

$$\varphi = \text{arctg}\frac{Q_{\text{СД}}}{P_{\text{СД}}} = \text{arctg}\frac{5096}{10500} = 26°.$$

4.4.3. Расчет режима статической нагрузки

$$I = \frac{U_{\text{у}}}{z_{\text{н}}} = \frac{1}{\sqrt{r_{\text{н}}^2 + x_{\text{н}}^2}} = \frac{1}{\sqrt{0{,}988^2 + 0{,}164^2}} = 1;$$

$S_{\text{н}} = U_{\text{у}}I = 1\cdot 1 = 1$; $\quad P_{\text{н}} = r_{\text{н}}S_{\text{н}} = 0{,}988\cdot 1 = 0{,}988$; $\quad Q_{\text{н}} = x_{\text{н}}S_{\text{н}} = 0{,}164\cdot 1 = 0{,}164$.

В именованных единицах для $S_{\text{б}_{\text{СН}}} = 6083$ кВ·А: $S_{\text{СН}} = 6083$ кВ·А;

$P_{\text{СН}} = 0{,}988S_{\text{б}_{\text{СН}}} = 0{,}988\cdot 6083 = 6000$ кВт; $Q_{\text{СН}} = 0{,}164S_{\text{б}_{\text{СН}}} = 0{,}164\cdot 6083 = 1000$ кВАр.

4.5. Расчет суммарной мощности узла

$P_{\text{у}} = P_{\text{АД}} + P_{\text{СД}} + P_{\text{СН}} = 10100 + 10500 + 6000 = 26600$ кВт;

$Q_{\text{у}} = Q_{\text{АД}} - Q_{\text{СД}} + Q_{\text{СН}} = 8076 - 5096 + 1000 = 3980$ кВАр;

$S_{\text{у}} = \sqrt{P_{\text{у}}^2 + Q_{\text{у}}^2} = \sqrt{26600^2 + 3980^2} = 26920$ кВ·А.

Приведем к базисной мощности сети $S_{\text{б}_{\text{с}}} = 40000$ кВ·А:

$P_{\text{у}} = 26600/40000 = 0{,}666$; $\quad Q_{\text{у}} = 3980/40000 = 0{,}1$; $\quad S_{\text{у}} = 26920/40000 = 0{,}673$.

По результатам расчета режима потребителей построим диаграмму токов. С этой целью сведем данные по токам в таблицу.

	А Д	С Д	С Н	У з е л
I, А	1244	1126	585	2590
φ, град	38,7	-26	9,4	8,5

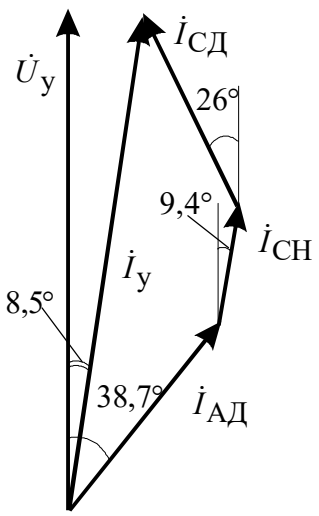
Ток в узле равен

$$I_{\text{у}} = \frac{S_{\text{у}}}{\sqrt{3}U_{\text{л}}} = \frac{26920}{\sqrt{3}\cdot 6} = 2590\ \text{А};$$

$$\varphi = \text{arctg}\frac{Q_{\text{у}}}{P_{\text{у}}} = \text{arctg}\frac{3980}{26600} = 8{,}5^\circ,$$

и в относительных единицах

$$I_{\text{у}} = \frac{S_{\text{у}}}{U_{\text{у}}} = \frac{0{,}673}{1} = 0{,}673.$$



4.6. Расчет режима питающей сети

В соответствии со схемой (п. 4.3) и формулами (3)–(4) определим величину напряжения в различных точках питающей сети, взаимные фазовые сдвиги, потоки мощности, Э.Д.С. генератора и его ток возбуждения. Ток во всех элементах питающей сети будет одинаковым и равным току узла $I_{\text{у}}$.

1) Трансформатор *Тр*2

$$P_{\text{Т2}} = P_{\text{у}} + I^2\cdot r_{\text{Т2}} = 0{,}666 + 0{,}673^2\cdot 0{,}005 = 0{,}668\ \text{о.е.};$$

$$Q_{\text{Т2}} = Q_{\text{у}} + I^2\cdot x_{\text{Т2}} = 0{,}1 + 0{,}673^2\cdot 0{,}131 = 0{,}159\ \text{о.е.}$$

$$S_{\text{Т2}} = \sqrt{P_{\text{Т2}}^2 + Q_{\text{Т2}}^2} = \sqrt{0{,}668^2 + 0{,}159^2} = 0{,}687\ \text{о.е.};$$

$$U_{\text{Т2}} = \frac{S_{\text{Т2}}}{I} = \frac{0{,}687}{0{,}673} = 1{,}02\ \text{о.е.};$$

$$\delta_{\text{Т2}} = \arcsin\left[\frac{x_{\text{Т2}}}{U_{\text{у}}U_{\text{Т2}}}\cdot\left(P_{\text{у}} - Q_{\text{у}}\cdot\frac{r_{\text{Т2}}}{x_{\text{Т2}}}\right)\right] = \arcsin\left(\frac{0{,}131}{1\cdot 1{,}02}\cdot\left(0{,}666 - 0{,}1\cdot\frac{0{,}005}{0{,}131}\right)\right) = 4{,}88^\circ;$$

2) линия электропередачи

$$P_{\text{Т1}} = P_{\text{Т2}} + I^2\cdot r_{\text{л}} = 0{,}668 + 0{,}673^2\cdot 0{,}023 = 0{,}678\ \text{о.е.};$$

$$Q_{\text{Т1}} = Q_{\text{Т2}} + I^2\cdot x_{\text{л}} = 0{,}159 + 0{,}673^2\cdot 0{,}03 = 0{,}173\ \text{о.е.};$$

$$S_{\text{Т1}} = \sqrt{P_{\text{Т1}}^2 + Q_{\text{Т1}}^2} = \sqrt{0{,}678^2 + 0{,}173^2} = 0{,}7\ \text{о.е.};$$

$$U_{\text{Т1}} = \frac{S_{\text{Т1}}}{I} = \frac{0{,}7}{0{,}673} = 1{,}04\ \text{о.е.};$$

$$\delta_{\text{л}} = \arcsin\left[\frac{x_{\text{л}}}{U_{\text{Т1}}U_{\text{Т2}}}\cdot\left(P_{\text{Т2}} - Q_{\text{Т2}}\cdot\frac{r_{\text{л}}}{x_{\text{л}}}\right)\right] = \arcsin\left(\frac{0{,}03}{1{,}04\cdot 1{,}02}\cdot\left(0{,}668 - 0{,}159\cdot\frac{0{,}023}{0{,}03}\right)\right) = 0{,}9^\circ;$$

3) трансформатор *Тр*1

$$P_{\text{г}} = P_{\text{Т1}} + I^2\cdot r_{\text{Т1}} = 0{,}678 + 0{,}673^2\cdot 0{,}005 = 0{,}681\ \text{о.е.};$$

$$Q_{\text{г}} = Q_{\text{Т1}} + I^2\cdot x_{\text{Т1}} = 0{,}173 + 0{,}673^2\cdot 0{,}131 = 0{,}232\ \text{о.е.};$$

$$S_{\text{г}} = \sqrt{P_{\text{г}}^2 + Q_{\text{г}}^2} = \sqrt{0{,}681^2 + 0{,}232^2} = 0{,}719\ \text{о.е.};$$

$$U_{\text{г}} = \frac{S_{\text{г}}}{I} = \frac{0{,}719}{0{,}673} = 1{,}069\ \text{о.е.};$$

$$\delta_{T1} = \arcsin\left[\frac{x_{T1}}{U_{T1}U_{г}}\cdot\left(P_{T1} - Q_{T1}\cdot\frac{r_{T1}}{x_{T1}}\right)\right] = \arcsin\left(\frac{0{,}131}{1{,}04\cdot 1{,}069}\cdot\left(0{,}678 - 0{,}173\cdot\frac{0{,}005}{0{,}131}\right)\right) = 4{,}54°;$$

4) синхронный генератор

$$E_0 = \frac{x_{с}}{U_{г}}\sqrt{P_{г}^2 + \left(Q_{г} + \frac{U_{г}^2}{x_{с}}\right)^2} = \frac{1{,}8}{1{,}069}\sqrt{0{,}681^2 + \left(0{,}232 + \frac{1{,}069^2}{1{,}8}\right)^2} = 1{,}984\ \text{о.е.};$$

$$\delta_{г} = \arcsin\frac{x_{с}P_{г}}{E_0 U_{г}} = \arcsin\frac{1{,}8\cdot 0{,}681}{1{,}984\cdot 1{,}069} = 35{,}3°;$$

$$i_{вг} = i_{в0}E_{0_{г}} = 320\cdot 1{,}984 = 634{,}9\ \text{А}.$$

Мощность силовых элементов удобнее представить в физических единицах, умножив их на $S_{б_{с}} = 40000\ \text{кВ}\cdot\text{А}$.

Элемент сети	Выходная мощность			Потери мощности		
	S, кВА	*P*, кВт	*Q*, кВАр	Δ*S*, кВА	Δ*P*, кВт	Δ*Q*, кВАр
СГ	28760	27240	9280	–	–	–
Тр1	28000	27120	6910	760	120	2370
ЛЭП	27480	26720	6350	520	400	560
Тр2	26920	26600	3980	560	120	2370

Результаты расчета режима сети представим в виде диаграммы напряжений, потоков мощности (рис. 28) и векторной диаграммы (рис. 29).

Режим работы силового оборудования при другом уровне напряжения в узле нагрузки рассчитывается аналогично, начиная с п. 4.4.

5. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

Курсовой проект включает следующие этапы:

1) изучение конструкции и принципа действия силовых масляных трансформаторов, синхронных турбогенераторов, синхронных явнополюсных двигателей и асинхронных двигателей;

2) расчет установившегося режима работы асинхронных и синхронных двигателей, статической нагрузки, трансформаторов, линии электропередачи и синхронного генератора при номинальном напряжении в узле нагрузки;

3) расчет основных характеристик силового оборудования.

Курсовой проект выполняется в виде пояснительной записки, которая должна содержать следующие разделы (в скобках указан примерный объем раздела в листах):

– титульный лист (1);
– реферат (1);
– содержание (1–2);
– задание на курсовой проект (1);
– введение (1);
– основная часть, состоящая из глав:

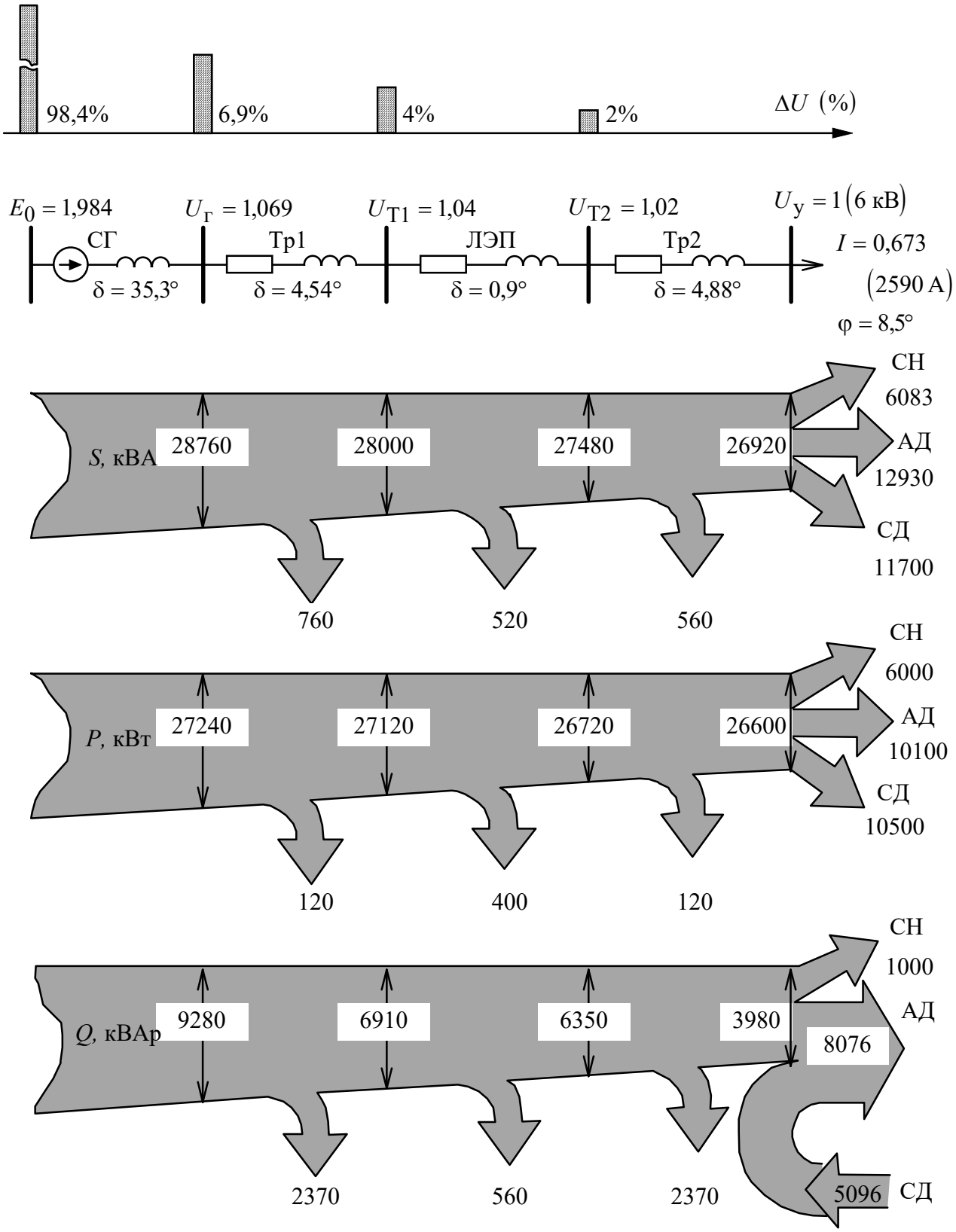


Рис. 28. Диаграммы напряжений и потоков мощности

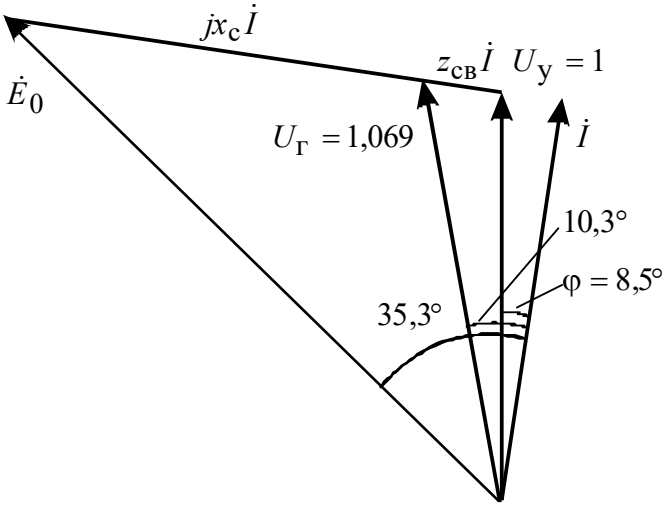


Рис. 29. Векторная диаграмма

1. Описание конструкции и принципа действия силовых элементов сети (12–20)
   1.1. Силовой масляный трансформатор (4–5)
   1.2. Синхронный турбогенератор (3–4)
   1.3. Асинхронный двигатель (3–4)
   1.4. Синхронный двигатель (3–4)
2. Расчет установившегося режима силовых элементов сети (20–40)
   2.1. Исходные данные для расчета
   2.2. Расчет параметров и номинальных величин элементов
   2.3. Расчет режима работы силовых элементов сети
3. Расчет основных характеристик силового оборудования.
   3.1. Расчет внешних характеристик трансформатора
   3.2. Расчет пусковых характеристик асинхронного двигателя
   3.3. Расчет U-образных характеристик синхронного двигателя

– Библиографический список (1).

Пояснительная записка оформляется на стандартных листах формата А4 $(210 \times 297$ мм$)$ в соответствии с общепринятыми требованиями, предъявляемыми к текстовым документам. Записка может быть выполнена в рукописном, машинописном или компьютерном вариантах в обложке из плотного материала или ватмана.

Лицевая часть обложки одновременно является титульным листом. Пример оформления титульного листа приводится в приложении. В реферате дается в трех-четырех предложениях краткое содержание пояснительной записки и ее выходные данные - количество листов, число рисунков, таблиц, количество использованных источников.

В содержании приводится перечень разделов пояснительной записки, включая все главы и их параграфы, с указанием номера листа, откуда они начинаются.

В задании на курсовой проект даются цель проекта, номер варианта и исходные данные.

Во введении, как правило, описывается постановка задачи в более развернутом, чем в задании, виде. Все рисунки и таблицы должны выполняться с помощью чертежных инструментов или с использованием компьютерных технологий.

Ориентировочные затраты времени на выполнение курсового проекта составляют 70-100 часов.

6. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

1. Состав и мощность силовых элементов сети

Акад. группа	Узел нагрузки								Питающая сеть				
	АД			СД			СН		ТР	СГ			
	$P_н$, кВт	n	n_p, об/мин	$P_н$, кВт	m	$i_{в0}$, А	$P_н$, кВт	$Q_н$, кВАр	$S_н$, кВА	$P_н$, кВт	$i_{в0}$, А	$U_{вн}$, кВ	$U_{нн}$, кВ
1	2000	5	370	5000	2	200	7000	1500	32000	32000	320	110	6
2	2500	5	365	4000	3	180	10000	2000	40000	40000	360	150	10
3	2000	6	360	3550	3	150	6000	1200	32000	32000	300	110	10
4	3150	4	371	6300	2	300	12000	2000	40000	40000	400	150	6

Синхронная частота вращения асинхронного двигателя $n_{c_{АД}} = 375$ об/мин, синхронного двигателя $n_{c_{СД}} = 250$ об/мин. Схемы соединения обмоток статора АД, СД, СГ - ⅄, трансформаторов - ⅄/Δ.

2. Исходные данные потребителей

№ вар.	АД					СД			
	η	$\cos\varphi$	$\frac{M_m}{M_н}$	$\frac{M_п}{M_н}$	$\frac{I_п}{I_н}$	η	$\cos\varphi$	x_d	x_q
1	0,95	0,82	2,5	0,5	5,0	0,94	0,9	1,5	1,0
2			2,4	0,6	5,2			1,4	1,0
3			2,3	0,7	5,4			1,3	1,0
4			2,2	0,8	5,6			1,2	0,8
5			2,1	0,9	5,8			1,1	0,8
6	0,94	0,81	2,0	0,9	6,0	0,93	0,89	1,1	0,7
7			1,9	0,8	6,2			1,2	0,7
8			1,8	0,7	6,4			1,3	0,8
9			1,7	0,6	6,6			1,4	0,8
10			1,6	0,5	6,8			1,5	0,9
11	0,93	0,80	2,5	1,0	7,0	0,92	0,88	1,0	0,70
12			2,4	0,9	6,8			1,1	0,75
13			2,3	0,8	6,6			1,2	0,75
14			2,2	0,7	6,4			1,3	0,75
15			2,1	0,6	6,2			1,4	0,75
16	0,92	0,79	2,0	0,6	5,0	0,91	0,87	1,4	1,0
17			1,9	0,7	5,2			1,3	1,0
18			1,8	0,8	5,4			1,2	1,0
19			1,7	0,9	5,6			1,1	0,8
20			1,6	1,0	5,8			1,0	0,8
21	0,91	0,78	2,5	0,9	6,0	0,90	0,86	1,2	0,65
22			2,4	0,8	6,2			1,1	0,65
23			2,3	0,7	6,4			1,0	0,65
24			2,2	0,6	6,6			0,9	0,6
25			2,1	0,5	6,8			0,8	0,6
26	0,90	0,77	2,0	0,5	7,0	0,89	0,85	0,8	0,5
27			1,9	0,6	6,8			0,9	0,6
28			1,8	0,7	6,6			1,0	0,7
29			1,7	0,8	6,4			1,1	0,8
30			1,6	0,9	6,2			1,2	0,9

3. Параметры силовых элементов питающей сети

№ вар.	Тр 1, Тр 2				СГ		ЛЭП
	$u_к$, %	P_0, кВт	$P_к$, кВт	I_m, %	cos φ	$x_с$, о.е.	ℓ, км
1			140	0,5		2,5	
2			142	0,6		2,4	
3	7	50	144	0,7	0,8	2,3	100
4			146	0,8		2,2	
5			148	0,9		2,1	
6			150	1,0		2,0	
7			152	1,1		1,9	
8	8	60	154	1,2	0,81	1,8	90
9			156	1,3		1,7	
10			158	1,4		1,6	
11			160	1,5		1,5	
12			162	1,4		1,6	
13	9	70	164	1,3	0,82	1,7	80
14			166	1,2		1,8	
15			168	1,1		1,9	
16			170	1,0		2,0	
17			172	0,9		2,1	
18	10	80	174	0,8	0,83	2,2	70
19			176	0,7		2,3	
20			178	0,6		2,4	
21			180	0,5		2,5	
22			182	0,6		2,4	
23	11	90	184	0,7	0,84	2,3	60
24			186	0,8		2,2	
25			188	0,9		2,1	
26			190	1,0		2,0	
27			192	1,1		1,9	
28	12	100	194	1,2	0,85	1,8	50
29			196	1,3		1,7	
30			198	1,4		1,6	

Активное сопротивление линии в расчете на 100 км принять равным $r_0 = 30$ Ом, а индуктивное – $x_0 = 40$ Ом.

4. Задания для расчета основных характеристик силового оборудования

Элемент	З а д а н и е
Трансформатор	<u>*Рассчитать и построить в одних координатных осях*</u> <u>*внешние характеристики*</u> $U_2 = f(I_2)$: • для $\cos\varphi = 0$ (инд.); $\cos\varphi = 1$; $\cos\varphi = 0{,}8$ (инд); $\cos\varphi = 0{,}8$ (емк.) в диапазоне изменения вторичного тока от 0 до 120% номинального значения; • найти процентное изменение напряжения при номинальном токе; Результаты расчета свести в таблицу. В качестве примера дать расчет одной точки характеристики.
Асинхронный двигатель	<u>*Рассчитать и построить в одних координатных осях*</u> <u>*пусковые характеристики*</u> $M = f(s)$, $I = f(s)$ <u>*в диапазоне скольжения от 0 до 1:*</u> • для $U = 1$ и $U = 0{,}8$; • установить влияние напряжения на величину пускового и максимального моментов, и пускового тока; Результаты расчета свести в таблицу. В качестве примера дать расчет одной точки характеристики.
Синхронный двигатель	<u>*Рассчитать и построить U-образные характеристики*</u> $I = f(i_{\text{в}})$: • для $U = 1$ при $P = 0$; $P = 0{,}5P_{\text{н}}$; $P = P_{\text{н}}$; • определить величину реактивной мощности при номинальном токе возбуждения и разной нагрузке СД; Результаты расчета свести в таблицу. В качестве примера дать расчет одной точки характеристики.

Библиографический список

1 **Копылов И.П.** Электрические машины. 6-е изд.,испр.-М.:Высшая школа.2009.-607с.

2 **Кацман М.М.** Электрические машины. 5-е изд.,испр.М.: Высшая школа, 2009.463 с.

3 **Новиков Н.Н., Шутько В.Ф.** Электрические машины: Учеб.пособие.-15-е изд., испр.-Екатеринбург, Изд.УрФУ; 2017-192 с.

4 Проектирование электрических машин: учеб. для студентов электромехан. и электроэнергет. специальностей вузов / [И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев] ; под ред. И. П. Копылова. - 4-е изд., перераб. и доп. - Москва: Юрайт, 2011. - 767 с.

5 **Беспалов В.Я.** Электрические машины: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. 140600 "Электротехника, электромеханика и электротехнологии" / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. - Москва: Academia, 2006. - 320 с.

6 **Вольдек А.И.** Электрические машины. Л.: 1978. 832 с.

7 **Костенко М.П., Пиотровский Л.М.** Электрические машины. Л.: Энергия, 1972, ч. I. 544 с.; 1973, ч. II. 648 с.

8 **Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С.** Электрические машины. М.: Высшая школа, 1987, ч. I. 283 с; 1987, ч. II. 304 с.

9 **Петров Г.Н.** Электрические машины. Ч. 1. М.: Энергия, 1974. 240 с. Ч. 2. М.: Энергия, 1963. 416 с. Ч. 3. М.: Энергия, 1968. 223 с.

10 **Важнов А.И.** Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. 840 с.

11 **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины: учеб. для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. дипломир. специалистов "Электротехника, электромеханика и электротехнологии" : в 2 т. Т. 1 / А. В. Иванов-Смоленский. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Издательство МЭИ, 2004. - 652 с.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина

Уральский энергетический институт
Кафедра «Автоматизированные электрические системы»,
Кафедра «Электротехника»

Оценка работы:_____

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ТРАНСФОРМАТОРОВ

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

Пояснительная записка

Руководитель:
к.т.н., доцент Н.Н. Новиков

Студент
группы ЭНЗ-280047у И.И. Иванов

Екатеринбург
2021

С О Д Е Р Ж А Н И Е

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ..... 3

2. РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ..... 4
2.1. Основные соотношения в активно-индуктивном элементе сети..... 4
2.2. Схема замещения статической нагрузки..... 7
2.3. Схема замещения линии электропередачи..... 7
2.4. Расчетная модель трансформатора..... 8
2.4.1. Схема замещения трансформатора..... 8
2.4.2. Векторная диаграмма трансформатора..... 9
2.4.3. Основные характеристики трансформатора..... 11
2.5. Расчетная модель асинхронного двигателя..... 13
2.5.1. Схема замещения асинхронного двигателя..... 13
2.5.2. Механическая характеристика асинхронного двигателя..... 14
2.5.3. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя..... 15
2.5.4. Пусковые характеристики асинхронного двигателя..... 16
2.6. Схема замещения синхронных машин..... 19
2.6.1. Схема замещения синхронного неявнополюсного генератора..... 19
2.6.2. Схема замещения и векторная диаграмма синхронного явнополюсного двигателя..... 20
2.6.3. Основные характеристики синхронного генератора..... 21

3. МЕТОДИКА И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТА УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА..... 26

4. ПРИМЕР РАСЧЕТА..... 27
4.1. Исходные данные..... 27
4.2. Расчет параметров схем замещения элементов..... 28
4.3. Расчет сопротивления связи между шинами генераторного напряжения и шинами узла нагрузки..... 31
4.4. Расчет номинального режима потребителей узла при напряжении узла $U_{\text{у}} = 1$ о.е. 32
4.5. Расчет суммарной мощности узла..... 34
4.6. Расчет режима питающей сети..... 35

5. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ..... 36

6. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ..... 39

Библиографический список..... 42
Приложение. Пример оформления титульного листа курсового проекта..... 43

Учебное издание

Автор **Новиков Николай Николаевич**

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ТРАНСФОРМАТОРОВ

Методические указания

Компьютерный набор **Е.В. Осипова, Н.Н. Новиков**

Подписано в печать 15.05.2020
Бумага Плоская печать Усл.п.л. 4
Тираж

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»
620002 г. Екатеринбург, ул. Мира, 19
ЗАО «Наука-Сервис»