



**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

Е.Ж. Сапожникова

АВИАЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

**Учебно-методическое пособие
по выполнению контрольной работы**

*для студентов III курса
направления 25.03.02
заочной формы обучения*

**Москва
2017**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

Кафедра электротехники и авиационного электрооборудования

Е.Ж. Сапожникова

АВИАЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

**Учебно-методическое пособие
по выполнению контрольной работы**

*для студентов III курса
направления 25.03.02
заочной формы обучения*

Москва-2017

ББК 0562.2

С19

Рецензент канд. техн. наук, доц. А.А. Савелов

Сапожникова Е.Ж.

С19 **Авиационные электрические машины: учебно-методическое пособие по выполнению контрольной работы.** – М.: МГТУ ГА, 2017. – 40 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Авиационные электрические машины» по Учебному плану для студентов III курса направления 25.03.02 заочной формы обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 24.01.2017 г. и методического совета 24.01.2017 г.

1. Общие указания к выполнению контрольной работы

1.1 Цель выполнения контрольной работы

Контрольная работа по дисциплине «Авиационные электрические машины» включает 4 задачи по разделам: «Авиационные электрические машины постоянного тока», «Авиационные трансформаторы», «Авиационные асинхронные электрические машины», «Авиационные синхронные электрические машины».

Выполнение контрольной работы является важным элементом освоения студентом-заочником учебной дисциплины, так как позволяет применить на практике изученный теоретический материал и закрепить полученные знания.

1.2 Требования к оформлению контрольной работы

Контрольная работа выполняется в отдельной тетради с полями для замечаний рецензента.

Условие каждой задачи необходимо приводить полностью в том виде, как оно сформулировано в задании.

Электрические схемы, таблицы, графики следует выполнять в соответствии с требованиями стандартов ЕСКД с использованием чертежных инструментов (не от руки), допускается применение компьютерной графики. Рисунки и таблицы необходимо пронумеровать, а в тексте поместить ссылки на них.

В случае использования при расчетах компьютерных средств соответствующие распечатки должны быть выполнены на стандартных листах и вложены в работу.

Решение должно выполняться аккуратно с необходимыми пояснениями и промежуточными расчетами. Расчеты выполняются сначала в общем виде, а затем подставляются числовые значения и приводится окончательный результат с указанием единицы измерения.

В конце контрольной работы помещается список использованных литературных источников.

Контрольная работа обязательно подписывается и датируется студентом и сдается на проверку преподавателю. После получения контрольной работы с замечаниями и указаниями преподавателя необходимо внести соответствующие исправления. Все исправленные расчеты, изменения, дополнения выполняются в той же тетради в конце работы.

При сдаче на повторную рецензию не разрешается переписывать заново контрольную работу или отдельные ее части.

1.3 Указания к выбору варианта

Вариант задания выбирается по двум последним цифрам шифра.

Контрольная работа, вариант которой не соответствует указанным требованиям, на проверку не принимается и должна быть выполнена вновь.

1.4 Рекомендуемая литература

- 1) Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. -СПб.: Питер, 2008
- 2) Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. -СПб.: Питер, 2008

2. Содержание контрольной работы

Задача 1. Авиационные электрические машины постоянного тока

1.1) Для авиационного генератора постоянного тока параллельного возбуждения в режиме холостого хода определить:

- ток возбуждения $I_{во}$ и добавочное сопротивление в цепи возбуждения $R_{вд}$ для получения номинального напряжения $U_{ном}$ при частоте вращения n_{min} ;
- величину добавочного сопротивления $R_{вдкр}$, при которой сопротивление цепи возбуждения генератора будет критическим $R_{вкр}$ при n_{min} ;
- напряжение на зажимах генератора при сопротивлении цепи возбуждения $R_{вкр}$ и частоте вращения n_{max} .

1.2) Построить характеристики генератора - внешнюю $U = f(I)$ и регулировочную $I_{в} = f(I)$ - при n_{min} графоаналитическим методом, используя характеристику холостого хода $E = f(I_{в})$, вольт-амперную характеристику цепи возбуждения и характеристический треугольник.

1.3) По внешней характеристике генератора определить номинальное изменение напряжения $\Delta U_{ном, \%}$ при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке. Пояснить причины снижения напряжения, физику процесса «опрокидывания» внешней характеристики.

1.4) С помощью регулировочной характеристики определить изменение тока возбуждения $\Delta I_{в, \%}$ при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке.

Задача 2. Авиационные трансформаторы

2.1) Рассчитать параметры и построить схемы замещения и векторные диаграммы авиационного трансформатора для режимов:

- холостого хода,
- короткого замыкания,
- номинальной нагрузки при $\cos \varphi_2 = 0,8$ ($\varphi_2 > 0$).

2.2) Построить зависимость КПД трансформатора от коэффициента нагрузки $\eta = f(\beta)$ при $\cos \varphi_2 = 0,8$ ($\varphi_2 > 0$). Определить величину $\beta_{(max)}$, при котором значение КПД максимально.

Задача 3. Авиационные асинхронные электрические машины

3.1) Рассчитать параметры и построить схему замещения с вынесенным на зажимы машины намагничивающим контуром для авиационного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

3.2) Рассчитать и построить механическую характеристику асинхронной машины для генераторного, двигательного и тормозного режимов.

3.3) Рассчитать номинальный, максимальный, пусковой моменты и момент холостого хода асинхронного двигателя. Определить кратность пускового момента, перегрузочную способность двигателя.

3.4) Определить изменение пускового и максимального моментов при уменьшении питающего напряжения на 20%.

Задача 4. Авиационные синхронные электрические машины

4.1) Построить векторную диаграмму Потье для авиационного трехфазного синхронного генератора при номинальном токе нагрузки и номинальном коэффициенте мощности.

4.2) Определить номинальный ток возбуждения, угол нагрузки и приращение напряжения генератора при сбросе нагрузки. Пояснить влияние степени насыщения магнитной цепи машины на эти величины.

3 Методические указания к выполнению контрольной работы

3.1 Методические указания к задаче 1

Необходимые теоретические сведения изложены в [1], гл.10.

Исходные данные к задаче 1 приведены в таблице приложения П.1.

Нормализованная характеристика холостого хода авиационного генератора постоянного тока при частоте вращения n_{\min} задана таблицей 3.1

Таблица 3.1

E^* , о.е.	0,075	0,40	0,83	1,00	1,15	1,20	1,25	1,30	1,37	1,44	1,50
I_b^* , о.е.	0	0,50	0,75	1,00	1,30	1,50	1,75	2,00	2,50	3,00	4,00

Порядок решения задачи 1

1.1) Соблюдая стандарты ЕСКД, начертить принципиальную электрическую схему авиационного генератора постоянного тока параллельного возбуждения с добавочным сопротивлением в цепи возбуждения и обмоткой дополнительных полюсов в цепи якоря (при их наличии в соответствии с вариантом задания по таблице П.1). Указать на схеме токи якоря I_a , возбуждения I_b , нагрузки I , напряжение U и ЭДС генератора E .

1.2) Построить характеристику холостого хода генератора, пользуясь данными таблицы 3.1.

Значения в именованных единицах ЭДС (E , В) и тока возбуждения (I_B , А) определяются из выражений для соответствующих величин в относительных единицах (о.е.):

$$E^*, \text{ о.е.} = E / E_0 \quad \text{и} \quad I_{B^*}, \text{ о.е.} = I_B / I_{B0},$$

где I_{B0}, A - ток возбуждения, при котором ЭДС холостого хода генератора

$$E_0 = U_{\text{ном}} \text{ при частоте вращения } n_{\text{min}}.$$

Величину I_{B0} можно определить, исходя из того, что максимальная ЭДС $E_{\text{max}} = 1,5 \cdot U_{\text{ном}}$, соответствующая току возбуждения $I_{B\text{max}} = 4 \cdot I_{B0}$, может быть получена после окончания процесса самовозбуждения при n_{min} и значении

$$R_{\text{вд}} = 0, \text{ т.е. при сопротивлении цепи возбуждения}$$

$$R_B = R_{\text{вт}} + R_{\text{вд}} = R_{\text{вт}},$$

где $R_{\text{вт}} = R_{\text{ов}} \cdot (1 + \alpha \cdot (t_{\text{раб}} - t_{\text{окр}}))$ - сопротивление обмотки возбуждения генератора, приведенное к рабочей температуре $t_{\text{раб}} = 120^\circ\text{C}$;

$R_{\text{ов}}$ - сопротивление обмотки возбуждения при температуре окружающей среды $t_{\text{окр}} = 20^\circ\text{C}$;

$$\alpha = 0,0038 \text{ }^\circ\text{C}^{-1} - \text{температурный коэффициент меди.}$$

$$\text{Таким образом, } E_{\text{max}} = I_{B\text{max}} \cdot R_{\text{вт}} \text{ или } 1,5 \cdot U_{\text{ном}} = 4 \cdot I_{B0} \cdot R_{\text{вт}},$$

$$\text{откуда } I_{B0} = 0,375 \cdot U_{\text{ном}} / R_{\text{вт}}.$$

1.3) Для определения сопротивления $R_{\text{вд}}$, которое необходимо ввести в цепь возбуждения генератора, чтобы получить на его зажимах $E_0 = U_{\text{ном}}$ при n_{min} , требуется построить вольт-амперную характеристику цепи возбуждения, проходящую через точку $[I_{B0}, U_{\text{ном}}]$. В этом случае уравнение вольт-амперной характеристики имеет вид:

$$U_{\text{ном}} = I_{B0} \cdot R_B = I_{B0} \cdot (R_{\text{вт}} + R_{\text{вд}}),$$

$$\text{откуда } R_{\text{вд}} = (U_{\text{ном}} / I_{B0}) - R_{\text{вт}}.$$

1.4) Для определения критического значения добавочного сопротивления в цепи возбуждения генератора $R_{\text{вдкр}}$ при n_{min} необходимо построить вольт-амперную характеристику цепи возбуждения как касательную к начальному участку характеристики холостого хода. Величина $R_{\text{вдкр}}$ определяется аналогично п.1.3.

1.5) Чтобы определить, какое напряжение будет на зажимах генератора, если при сопротивлении цепи возбуждения $R_{\text{вкр}}$ частота вращения повысится до значения n_{max} , необходимо построить характеристику холостого хода для верхнего предела частоты вращения, учитывая что в соответствии с выражением для ЭДС машины постоянного тока $E = c_e \cdot n \cdot \Phi$ при заданной величине потока возбуждения Φ (тока I_B)

$$E_{\text{max}} = E_{\text{min}} \cdot (n_{\text{max}} / n_{\text{min}}).$$

1.6) Методика построения внешней и регулировочной характеристик генератора подробно описана в [1], гл.10, стр.196-207.

Вершина А характеристического треугольника располагается в точке с координатами $[U_{ном}, I_{вном}]$. Номинальный ток возбуждения $I_{вном}$ можно определить по 1-му закону Кирхгофа из схемы рис. 4.1

$$I_{вном} = I_{аном} - I_{ном}$$

Номинальный ток нагрузки равен $I_{ном} = P_{ном} / 30$.

При определении величины катета характеристического треугольника $|AB|$, соответствующего падению напряжения в якорной цепи генератора

$$E_{ном} - U_{ном} = I_{аном} \cdot R_{ца} + \Delta U_{щ} = I_{аном} \cdot (R_{ат} + R_{дпт}) + \Delta U_{щ},$$

необходимо использовать значения сопротивления обмотки якоря $R_{ат}$ и дополнительных полюсов $R_{дпт}$, приведенные к рабочей температуре аналогично $R_{вт}$ ($t_{раб} = 120^\circ\text{C}$).

Падение напряжения в щеточном контакте принять $\Delta U_{щ} = 2 \text{ В}$.

Внешнюю характеристику строить при постоянном значении сопротивления цепи возбуждения, равном $R_{в} = U_{ном} / I_{вном}$, от точки холостого хода до точки короткого замыкания для 6 - 8 значений тока нагрузки I (тока якоря $I_a = I + I_{в}$), включая значения номинального $I_{аном}$ и критического $I_{акр}$ токов.

Ток короткого замыкания определить аналитически:

$$I_{кз} = (E_{ост} - \Delta U_{щ}) / (R_{ат} + R_{дпт}).$$

Номинальное изменение напряжения при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке

$$\Delta U_{ном, \%} = ((U_0 - U_{ном}) / U_{ном}) \cdot 100\% = (\Delta U_{ном} / U_{ном}) \cdot 100\%.$$

Величину $\Delta U_{ном}$ определить по внешней характеристике.

1.7) Увеличение тока возбуждения при переходе от холостого хода ($I = 0$) к номинальной нагрузке ($I = I_{ном}$) составляет:

$$\Delta I_{в, \%} = ((I_{вном} - I_{во}) / I_{во}) \cdot 100\%$$

3.2 Методические указания к задаче 2

Необходимые теоретические сведения изложены в [1], гл.12-15.

Исходные данные к задаче 2 приведены в таблице приложения П.2.

Порядок решения задачи 2

2.1) Первичной обмоткой трансформатора (присоединенной к питающей сети) считается обмотка высшего напряжения (ВН), вторичной (к зажимам которой подключается нагрузка) - обмотка низшего напряжения (НН).

Для трехфазного трансформатора номинальные первичное и вторичное напряжения - линейные. Группа соединений стандартная - (Y/Y -12).

2.2) Коэффициент трансформации можно считать приближенно равным отношению $K \approx U_{1ном} / U_{2ном}$.

2.3) При расчетах следует учитывать соотношения:

$$S_{1ном} = m \cdot U_1 \cdot I_1 = \sqrt{P_{1ном}^2 + Q_{1ном}^2},$$

$$S_{2НОМ} = m \cdot U_2 \cdot I_2 = \sqrt{P_{2НОМ}^2 + Q_{2НОМ}^2},$$

где m - число фаз;

U_1, U_2 - номинальные первичное и вторичное фазные напряжения;

I_1, I_2 - номинальные первичный и вторичный фазные токи;

$S_{1НОМ}, S_{2НОМ}, P_{1НОМ}, P_{2НОМ}, Q_{1НОМ}, Q_{2НОМ}$ - номинальные полные, активные и реактивные первичные и вторичные мощности соответственно.

Активные и реактивные мощности равны:

$$P_{1НОМ} = P_{2НОМ} + P_0 + P_{кн},$$

где P_0 и $P_{кн}$ - потери холостого хода при номинальном питающем напряжении и номинальные потери короткого замыкания (из таблицы П.2).

$$P_{2НОМ} = S_{2НОМ} \cdot \cos \varphi_2;$$

$$Q_{1НОМ} = Q_{2НОМ}.$$

2.4) По данным опыта *холостого хода* необходимо

- рассчитать сопротивления $r_{10} = r_1 + r_m$ и $x_{10} = x_1 + x_m$;

- определить $\cos \varphi_0$, активную I_{0a} и реактивную I_{0p} составляющие тока холостого хода I_0 .

2.5) По данным опыта *короткого замыкания*

- рассчитать сопротивления $r_k = r_1 + r_2'$ и $x_k = x_1 + x_2'$;

- принять $r_1 = r_2' = r_k / 2$ и $x_1 = x_2' = x_k / 2$.

2.6) Определив параметры трансформатора ($r_1, r_2', x_1, x_2', r_m, x_m$) по данным опытов холостого хода и короткого замыкания, построить схемы замещения для этих режимов и Т-образную схему замещения трансформатора для режима номинальной нагрузки. Указать на схемах первичные и приведенные вторичные токи I_1 и I_2' , напряжения U_1 и U_2' , ЭДС E_1 и E_2' , ток намагничивающего контура I_0 .

2.7) Записать системы уравнений трансформатора в комплексной форме для указанных режимов и построить векторные диаграммы токов и напряжений, являющиеся графическим представлением этих систем уравнений для соответствующего режима работы.

Примечание 3.1 Перед построением векторных диаграмм необходимо выбрать масштабы токов $m_I = \dots \text{ А/мм}$ и напряжений $m_U = \dots \text{ В/мм}$

2.8) Коэффициент нагрузки трансформатора $\beta = I_1 / I_{1НОМ} = I_2 / I_{2НОМ}$.

2.9) КПД трансформатора для заданного значения коэффициента мощности нагрузки рассчитывается по формуле:

$$\eta = 1 - (P_0 + P_{кн} \cdot \beta^2) / (P_{2НОМ} \cdot \beta + P_0 + P_{кн} \cdot \beta^2).$$

Для коэффициента нагрузки принять 6-8 значений в пределах от 0 до 1.

Условием получения максимума КПД трансформатора η_{\max} является равенство его постоянных и переменных потерь $P_0 = P_{кн} \cdot \beta^2$.

Коэффициент нагрузки, при котором КПД достигает максимума, равен

$$\beta_{(MAX)} = \sqrt{P_0 / P_{KH}} .$$

3.3 Методические указания к задаче 3

Для выполнения задания необходимо изучить [2], гл. 6-9.

Исходные данные к задаче 3 приведены в таблицах П.3 и П.4.

Порядок решения задачи 3

3.1) Расчет параметров асинхронного двигателя проводится для одной фазы и может быть выполнен по данным опытов *холостого хода* и *короткого замыкания* аналогично расчету параметров схемы замещения трансформатора.

3.2) Активные сопротивления обмоток машины следует привести к указанным в таблице П.4 температурам, при которых проводились соответствующие опыты

3.3) Соединение обмотки статора - Y

3.4) Потери холостого хода асинхронного двигателя определяются выражением:

$$P_0 = \Delta P_{эл1} + P_0',$$

где $\Delta P_{эл1} = 3 \cdot I_0^2 \cdot R_{1т}$ - электрические потери в обмотке статора при холостом ходе;

$P_0' = \Delta P_{Мг} + \Delta P_{мех}$ - составляющая потерь холостого хода, равная сумме магнитных и механических потерь.

P_0' необходимо разделить на магнитные и механические потери, приняв

$$\Delta P_{мех} \approx (0,4 \dots 0,5) \cdot P_0'.$$

3.5) Параметры уточненной схемы замещения с вынесенным на зажимы сети намагничивающим контуром рассчитываются введением поправочного коэффициента $\sigma_1 = 1 + X_1 / X_m$.

3.6) Начертить схему замещения с соблюдением требований ЕСКД.

3.7) Для расчета механической характеристики асинхронной машины используется соотношение:

$$M = \pm \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2 \cdot R_2' / s}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot ((R_1 + \sigma_1 \cdot R_2' / s)^2 + (X_1 + \sigma_1 \cdot X_2')^2)} ,$$

где $m_1 = 3$ - число фаз обмотки статора;

p - число пар полюсов машины;

U_1 - номинальное напряжение фазы обмотки статора;

f_1 - частота сети;

$s = (n_1 - n_2) / n_1$ - скольжение;

$n_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 / p$ - частота вращения магнитного поля.

Знак «+» соответствует двигательному режиму работы асинхронной машины, знак «-» - генераторному.

Механическую характеристику (16-20 точек, включая 0) рассчитать в пределах изменения скольжения $-2 < S < +2$.

3.8) Номинальный, пусковой и максимальный моменты определяются из приведенного выше соотношения для значений $S = S_{ном}$, $S = 1$, $S = S_{кр}$.

Критическое скольжение для двигательного режима можно определить из выражения: $S_{кр} \approx R_2 / X_k$.

3.9) Кратность пускового момента $K_p = M_p / M_{ном}$,
перегрузочная способность $K_m = M_{max} / M_{ном}$.

3.10) Для определения изменения электромагнитного момента асинхронного двигателя при уменьшении питающего напряжения следует учитывать его пропорциональность величине $(U_1)^2$.

3.4. Методические указания к задаче 4

Для выполнения задания необходимо изучить [2], гл.14-16.

Исходные данные к задаче 4 приведены в таблице П.5.

Нормализованная характеристика холостого хода авиационного явнополюсного трехфазного синхронного генератора задана таблицей 3.2.

Таблица 3.2

E^* , о.е.	0	0,29	0,58	0,82	1,00	1,15	1,25	1,27	1,32	1,41	1,45	1,50
I_B^* , о.е.	0	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,50	3,00	3,50

Порядок решения задачи 4

4.1) В теории синхронных электрических машин принято использовать значения величин и параметров в относительных единицах (о.е.), получаемых делением величины на ее базисное значение, например U^* , о.е. = U / U_B . За базисные величины чаще всего принимаются соответствующие номинальные.

4.2) По данным таблицы 3.2 построить характеристику холостого хода синхронного генератора.

Используя соотношение ОКЗ $= I_{ко*} = 1/x_{d*} = 1 / (x_{ad*} + x_{\sigma a*})$, определить ненасыщенное значение индуктивного сопротивления продольной реакции якоря $x_{ad*_{\infty}}$.

4.3) Несмотря на то, что теоретически векторная диаграмма Потье верна только для неявнополюсных синхронных машин, на практике исследование с

ее помощью явнополюсных синхронных машин дает достаточно точные результаты.

4.4) Для учета насыщения магнитной цепи машины векторную диаграмму Потье необходимо совместить с характеристикой холостого хода машины, выбрав соответствующие масштабы напряжения и тока (или МДС) возбуждения.

Примечание 3.2. Для трехфазного синхронного генератора векторная диаграмма строится для одной фазы.

4.5) Порядок построения векторной диаграммы :

- по заданным $U_* = 1$, $I_* = 1$ и $\cos\varphi$ строят векторы \dot{U}_* и \dot{I}_* , направляя вектор напряжения по оси ординат характеристики холостого хода;

- в соответствии с выражением $\dot{E}_{\delta*} = \dot{U}_* + \dot{I}_* \cdot r_{a*} + j \dot{I}_* \cdot x_{\sigma a*}$ с учетом известных сопротивлений $x_{\sigma a*}$, r_{a*} строят ЭДС воздушного зазора $\dot{E}_{\delta*}$. Угол между векторами \dot{U}_* и $\dot{E}_{\delta*}$ равен γ ;

- ЭДС воздушного зазора $E_{\delta*}$ индуцируется результирующим магнитным потоком воздушного зазора и определяет поэтому степень насыщения магнитной цепи машины в заданном режиме работы. Величину $E_{\delta*}$ сносят на ось ординат и по характеристике холостого хода определяют соответствующую ей МДС возбуждения $F_{в\delta*}$;

- вектор $(-F_{в\delta*}')$ направляют по оси абсцисс характеристики холостого хода;

- при построении диаграммы Потье реакция якоря синхронной машины не раскладывается на составляющие по осям d и q , поэтому полную МДС реакции якоря принимаем равной МДС реакции якоря по продольной оси и приводим к масштабу МДС возбуждения в соответствии с выражением

$$F'_a = F'_{ad} = K_{ad} \cdot F_a.$$

В относительных единицах, учитывая, что при $I_* = 1$ о.е. МДС якоря также будет $F_{a*} = 1$ о.е., получим $F'_{a*} = F'_{ad*} = K_{ad} \cdot 1 = K_{ad}$.

- прибавляя к вектору $(-F_{в\delta*}')$ вектор F'_{a*} под углом $(90^\circ + \varphi + \gamma)$, получают вектор МДС возбуждения $(-F_{вн*})$, который сносят на ось абсцисс и получают величину $F_{вн*}$ (ток возбуждения $I_{вн*}$);

- по характеристике холостого хода определяют значение ЭДС холостого хода E_{0*} , соответствующее току возбуждения $I_{вн*}$ (или $F_{вн*}$, так как в относительных единицах $I_{вн*} = F_{вн*}$), и повышение напряжения при сбросе нагрузки $\Delta U_* = E_{0*} - U_*$;

- значение ЭДС E_{H*} для тока $I_{вн*}$ с учетом степени насыщения машины определяют по спрямленной насыщенной характеристике холостого хода, проходящей через точку с координатами $[F_{вδ*}, E_{δ*}]$;

- для построения вектора \dot{E}_{H*} к концу $\dot{E}_{δ*}$ прибавляют вектор $j\dot{I}_* \cdot x_{ad*}$.

При этом следует использовать насыщенное значение индуктивного сопротивления продольной реакции якоря

$$x_{ad*} = x_{ad*\infty} / k_{\mu d},$$

где $k_{\mu d} = E_{δ*\infty} / E_{δ*}$ - коэффициент насыщения по продольной оси.

Величины $E_{δ*\infty}$ и $E_{δ*}$ определяются из векторной диаграммы.

Результирующий вектор \dot{E}_{H*} правильно построенной векторной диаграммы опережает вектор суммарной МДС ($-F_{вн*}$) на 90° , длина вектора E_{H*} (его модуль) совпадает с величиной, определенной по характеристике холостого хода.

Угол, на который вектор \dot{E}_{H*} опережает вектор \dot{U}_* называется углом нагрузки θ .

4.6) На полученной векторной диаграмме Потье необходимо провести дополнительные построения, используя ненасыщенное значение индуктивного сопротивления продольной реакции якоря $x_{ad*\infty}$. Целью этих построений является определение влияния степени насыщения магнитной цепи машины на ток возбуждения и угол нагрузки генератора.

4. Примеры решения задач

Задача 1. Авиационные электрические машины постоянного тока

Технические данные генератора постоянного тока параллельного возбуждения:

Номинальная мощность $P_{ном} = 6000$ Вт;

Номинальное напряжение $U_{ном} = 28,5$ В;

Частота вращения $n = 4000-6000$ об/мин;

Номинальный ток якоря $I_{аном} = 218$ А;

Сопротивление обмотки якоря (при температуре 20°C) $R_a = 0,01$ Ом;

Сопротивление обмотки возбуждения (при температуре 20°C)

$R_{ов} = 1,29$ Ом;

Сопротивление обмотки дополнительных полюсов

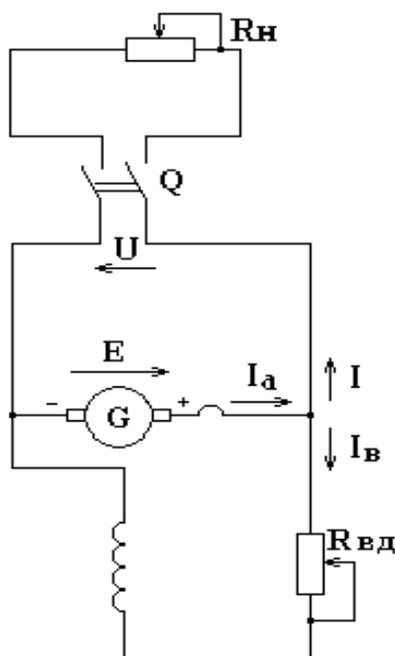
(при температуре 20°C) $R_{дп} = 0,0045$ Ом;

Число полюсов (основных / дополнительных) - 4/4.

Характеристики холостого хода в именованных единицах - Таблица 4.1

I_B, A	0	3,00	4,50	6,00	7,80	9,00	10,5	12,0	15,0	18,0	24,0	Примечание
E_{min}, B	2,14	15,6	23,6	28,5	32,8	34,2	35,7	37,1	39,1	41,0	42,8	$n = n_{min}$
E_{max}, B	3,20	23,4	35,4	42,8	49,2	51,3	53,6	55,7	58,7	61,5	64,2	$n = n_{max}$

1.1)

1.2) Сопротивления обмоток генератора, приведенные к рабочей температуре ($t_{раб} = 120^\circ C$):

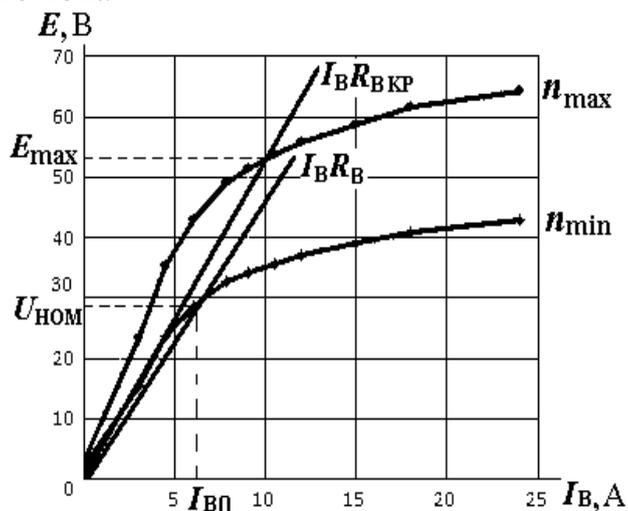
$$R_{вт} = R_{ов} \cdot (1 + \alpha \cdot (t_{раб} - t_{окр})) = \\ = 1,29 \cdot (1 + 0,0038(120 - 20)) = 1,78 \text{ Ом},$$

$$R_{ат} = R_a \cdot (1 + \alpha \cdot (t_{раб} - t_{окр})) = \\ = 0,01 \cdot (1 + 0,0038(120 - 20)) = 0,0138 \text{ Ом},$$

$$R_{дпт} = R_{дп} \cdot (1 + \alpha \cdot (t_{раб} - t_{окр})) = \\ = 0,0045 \cdot (1 + 0,0038(120 - 20)) = \\ = 0,0062 \text{ Ом}$$

$$\text{Ток возбуждения } I_{во} = 0,375 \cdot U_{ном} / R_{вт} = \\ = 0,375 \cdot 28,5 / 1,78 = 6 \text{ А}$$

Рис. 4.1 Принципиальная электрическая схема генератора постоянного тока

Рис. 4.2. Характеристики холостого хода генератора $E = f(I_B)$ при $n_{min} = 4000$ об/мин и $n_{max} = 6000$ об/мин

1.3) Построив вольт-амперную характеристику цепи возбуждения генератора $I_B \cdot R_B$, проходящую через точку $[I_{B0}, U_{ном}]$, определяем

$$R_{вд} = (U_{ном} / I_{B0}) - R_{вт} = (28,5 / 6) - 1,78 = 2,97 \text{ Ом}$$

1.4) Критическое значение $R_{вдкр}$, при котором невозможно самовозбуждение генератора с минимальной частотой вращения, определяется по вольт-амперной характеристике $I_B \cdot R_{вдкр}$, касательной к начальному участку характеристики холостого хода при n_{min} :

$$R_{вдкр} = (22,8 / 4,5) - 1,78 = 3,29 \text{ Ом}$$

1.5) При этом, если частота вращения генератора повысится до n_{max} , напряжение на его зажимах будет равно $E_{max} = 52,5 \text{ В}$ (Соответствующее построение показано на рис 4.2).

1.6) В соответствии с методикой, подробно описанной в [1], строим внешнюю характеристику генератора $U = f(I_a)$ при $R_B = U_{ном} / I_{Bном} = \text{const}$ и $n_{min} = \text{const}$.

Примечание 4.1. Так как ток якоря генератора превышает его ток возбуждения более чем в 10 раз, можно принять $I_a = I + I_B \approx I$.

На рис.4.3 построена характеристика холостого хода $E = f(I_B)$ при n_{min} и вольт-амперная характеристика цепи возбуждения для

$$\begin{aligned} R_B &= U_{ном} / I_{Bном} = U_{ном} / (I_{аном} - I_{ном}) = U_{ном} / (I_{аном} - P_{ном} / 30) = \\ &= 28,5 / (218 - 6000/30) = 1,58 \text{ Ом}, \\ I_{Bном} &= 218 - 200 = 18 \text{ А} \end{aligned}$$

Катет характеристического треугольника

$$|AB| = I_{аном} \cdot R_{ца} + \Delta U_{щ} = I_{аном} \cdot (R_{ат} + R_{дпт}) + \Delta U_{щ} = 218 \cdot (0,0138 + 0,0062) + 2 = 6,4 \text{ В}$$

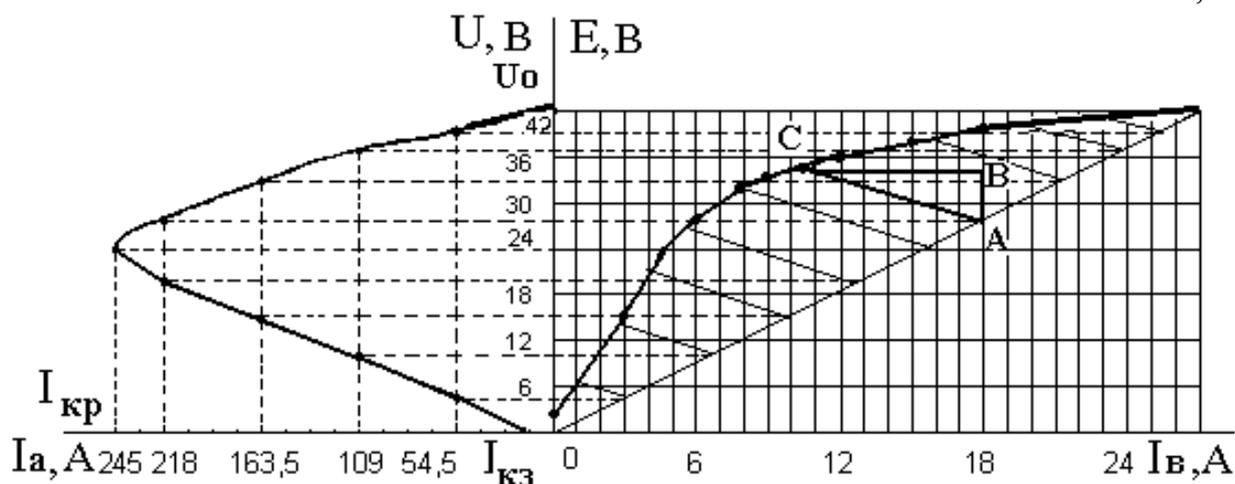


Рис. 4.3 Построение внешней характеристики генератора постоянного тока параллельного возбуждения с помощью характеристики холостого хода и характеристического треугольника

Критический ток якоря генератора определен построением:

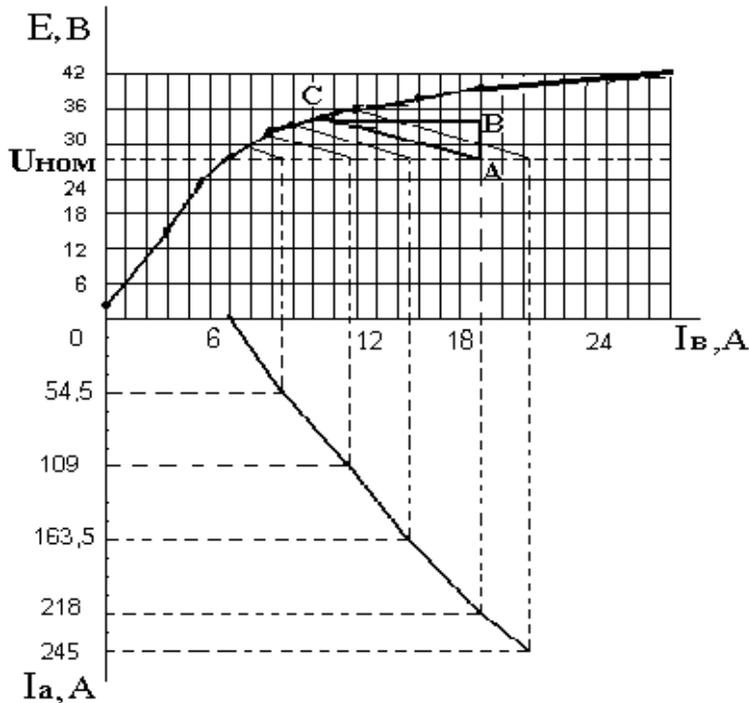
$$I_{акр} = 1,125 \cdot I_{аном} = 1,125 \cdot 218 = 245 \text{ А}$$

Ток короткого замыкания равен

$$I_{кз} = (E_{ост} - \Delta U_{щ}) / (R_{ат} + R_{дпт}) = (2,14 - 2) / (0,0138 + 0,0062) = 7 \text{ А}$$

Номинальное изменение напряжения при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке

$$\begin{aligned} \Delta U_{ном}\% &= ((U_0 - U_{ном}) / U_{ном}) \cdot 100\% = (\Delta U_{ном} / U_{ном}) \cdot 100\% = \\ &= ((42,8 - 28,5) / 28,5) \cdot 100\% = (14,3 / 28,5) \cdot 100\% = 0,5 \cdot 100\% = 50\% \end{aligned}$$



1.7) Регулировочная характеристика генератора $I_b = f(I_a)$, построенная при $U_{ном} = \text{const}$ и $n_{\text{min}} = \text{const}$, приведена на рис. 4.4.

Увеличение тока возбуждения при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке:

$$\begin{aligned} \Delta I_b\% &= ((I_{вном} - I_{во}) / I_{во}) \cdot 100\% = \\ &= ((18 - 6) / 6) \cdot 100\% = 200\% \end{aligned}$$

Рис. 4.4 Построение регулировочной характеристики

Задача 2. Авиационные трансформаторы

Технические данные трансформатора:

Номинальная мощность $S_{2ном} = 600 \text{ ВА}$,

Частота $f_1 = 400 \text{ Гц}$,

Число фаз $m = 3$,

Группа соединений -12,

Номинальное высшее напряжение $U_{1ном} = 200 \text{ В}$,

Номинальное низшее напряжение $U_{2ном} = 36 \text{ В}$,

Номинальное напряжение короткого замыкания $U_{кн,\%} = 6,2\%$,

Ток холостого хода $I_0,\% = 8\%$,

Потери холостого хода $P_0 = 30 \text{ Вт}$,

Номинальные потери короткого замыкания $P_{кн} = 36 \text{ Вт}$.

2.1) Для трехфазного трансформатора линейные напряжения

$$U_{1л} = U_{1ном} = 200 \text{ В}; \quad U_{2л} = U_{2ном} = 36 \text{ В}.$$

Тогда фазные напряжения будут равны

$$U_1 = U_{1ном} / \sqrt{3} = 200 / 1,73 = 115,5 \text{ В}; \quad U_2 = U_{2ном} / \sqrt{3} = 36 / 1,73 = 21 \text{ В}$$

2.2) Коэффициент трансформации $K = U_{1л} / U_{2л} = 200 / 36 = 5,55$

2.3) Рассчитаем номинальные активные и реактивные первичные и вторичные мощности и полную мощность первичной обмотки:

$$P_{2ном} = S_{2ном} \cdot \cos \varphi_2 = 600 \cdot 0,8 = 480 \text{ Вт};$$

$$Q_{2ном} = \sqrt{S_{2ном}^2 - P_{2ном}^2} = \sqrt{600^2 - 480^2} = 360 \text{ вар};$$

$$P_{1ном} = P_{2ном} + P_0 + P_{кн} = 480 + 30 + 36 = 546 \text{ Вт};$$

$$Q_{1ном} = Q_{2ном} = 360 \text{ вар};$$

$$S_{1ном} = \sqrt{P_{1ном}^2 + Q_{1ном}^2} = \sqrt{546^2 + 360^2} = 654 \text{ ВА}$$

Фазные первичный и вторичный токи:

$$I_1 = S_{1ном} / (\sqrt{3} \cdot U_{1ном}) = 654 / (\sqrt{3} \cdot 200) = 1,9 \text{ А};$$

$$I_2 = S_{2ном} / (\sqrt{3} \cdot U_{2ном}) = 600 / (\sqrt{3} \cdot 36) = 9,6 \text{ А}$$

$$\text{Ток холостого хода } I_0 = 0,08 \cdot I_1 = 0,08 \cdot 1,9 = 0,15 \text{ А}$$

$$\text{Напряжение короткого замыкания } U_{кн} = 0,062 \cdot U_1 = 0,062 \cdot 115,5 = 7,15 \text{ В}$$

2.4) По данным опыта *холостого хода* рассчитаем сопротивления:

$$z_{10} = U_1 / I_0 = 115,5 / 0,15 = 770 \text{ Ом};$$

$$r_{10} = r_1 + r_m = P_0 / 3 \cdot I_0^2 = 30 / 3 \cdot 0,15^2 = 444 \text{ Ом};$$

$$x_{10} = x_1 + x_m = \sqrt{z_{10}^2 - r_{10}^2} = \sqrt{770^2 - 444^2} = 629 \text{ Ом};$$

$$\text{Коэффициент мощности } \cos \varphi_0 = P_0 / 3 \cdot I_0 \cdot U_1 = 30 / 3 \cdot 0,15 \cdot 115,5 = 0,577$$

Активная и реактивная составляющие тока холостого хода I_0 :

$$I_{0a} = I_0 \cdot \cos \varphi_0 = 0,15 \cdot 0,577 = 0,087 \text{ А};$$

$$I_{0p} = I_0 \cdot \sin \varphi_0 = 0,15 \cdot 0,817 = 0,123 \text{ А}$$

2.5) По данным опыта *короткого замыкания* рассчитаем сопротивления:

$$z_k = U_{кн} / I_1 = 7,15 / 1,9 = 3,77 \text{ Ом};$$

$$r_k = r_1 + r'_2 = P_{кн} / 3 \cdot I_1^2 = 36 / 3 \cdot 1,9^2 = 3,24 \text{ Ом};$$

$$x_k = x_1 + x'_2 = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{3,77^2 - 3,24^2} = 1,92 \text{ Ом};$$

$$r_1 = r'_2 = r_k / 2 = 3,24 / 2 = 1,62 \text{ Ом};$$

$$x_1 = x'_2 = x_k / 2 = 1,92 / 2 = 0,96 \text{ Ом};$$

$$r_m = r_{10} - r_1 = 444 - 1,62 = 442,4 \text{ Ом};$$

$$x_m = x_{10} - x_1 = 629 - 0,96 = 628 \text{ Ом}$$

2.6) Рассчитанные сопротивления являются параметрами схем замещения трансформатора, приведенных на рис. 4.5, 4.7, 4.9.

В режиме *холостого хода* работа трансформатора описывается системой уравнений в комплексной форме, которой соответствует схема замещения (рис. 4.5)

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 \cdot (r_1 + jx_1)$$

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{0p} + \dot{I}_{0a}$$

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_0 \cdot (r_m + jx_m)$$

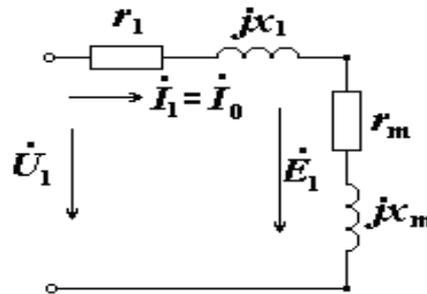


Рис.4.5 Схема замещения трансформатора в режиме холостого хода

2.7) Для построения векторной диаграммы, представляющей собой изображение в виде векторов уравнений приведенной выше системы, необходимо рассчитать модули (длины) этих векторов:

$$E_1 = I_0 \cdot \sqrt{r_m^2 + x_m^2} = 0,15 \cdot \sqrt{442,4^2 + 628^2} = 0,15 \cdot 768 = 115 \text{ В},$$

$$I_0 \cdot r_1 = 0,15 \cdot 1,62 = 0,24 \text{ В}, \quad I_0 \cdot x_1 = 0,15 \cdot 0,96 = 0,14 \text{ В}$$

Перед построением векторной диаграммы необходимо выбрать масштабы для напряжений ($m_U = \dots \text{ В/мм}$) и токов ($m_I = \dots \text{ А/мм}$).

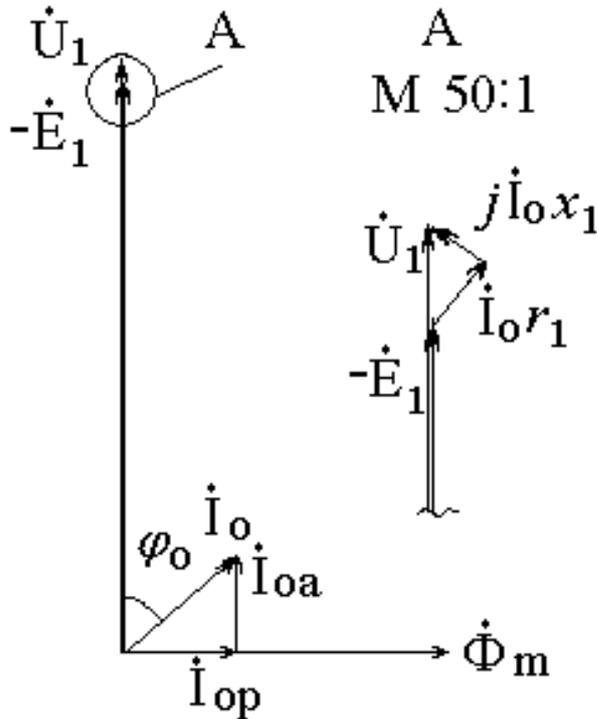


Рис 4.6 Векторная диаграмма трансформатора в режиме холостого хода

Однако из-за того, что падения напряжения на активном сопротивлении $I_0 \cdot r_1$ и индуктивном сопротивлении рассеяния $I_0 \cdot x_1$ первичной обмотки значительно меньше, чем ЭДС и напряжение E_1 и U_1 , не представляется возможным построить соответствующие векторы в одном масштабе.

Из векторной диаграммы на рис. 4.6 видно, что $U_1 \approx E_1$, а для построения векторов $I_0 \cdot r_1$ и $j I_0 \cdot x_1$ необходимо сделать выноску и изобразить их в увеличенном масштабе. Порядок построения векторной диаграммы подробно описан в рекомендованной литературе.

Примечание 4.2. Для трехфазного трансформатора схемы замещения и векторные диаграммы строятся для одной фазы.

Опыт *короткого замыкания* трансформатора проводится при пониженном напряжении, при котором по обмоткам трансформатора протекают токи, не превышающие номинальные значения. Током намагничивающего контура I_0 при этом можно пренебречь. Работа трансформатора в режиме короткого замыкания описывается уравнением:

$$\dot{U}_{1K} = \dot{I}_{1K} \cdot (r_1 + jx_1) + (-\dot{I}'_{2K}) \cdot (r'_2 + jx'_2)$$

Так как $\dot{I}_{1K} = -\dot{I}'_{2K} = \dot{I}_K$, то

$$\dot{U}_{1K} = \dot{I}_K \cdot (r_1 + r'_2) + j \dot{I}_K \cdot (x_1 + x'_2) = \dot{I}_K \cdot r_K + j \dot{I}_K \cdot x_K$$

Если опыт короткого замыкания проводится при напряжении $U_{1K} = U_{кн}$, тогда

$$\dot{U}_{кн} = \dot{U}_{ка} + \dot{U}_{кр},$$

где $U_{ка} = I_K \cdot r_K = U_{кн} \cdot \cos \varphi_K = 1,9 \cdot 3,24 = 7,16 \cdot 0,88 = 6,32$ В,

$U_{кр} = I_K \cdot x_K = U_{кн} \cdot \sin \varphi_K = 1,9 \cdot 1,92 = 7,16 \cdot 0,47 = 3,37$ В

Ниже приведены схема замещения и векторная диаграмма трансформатора в режиме короткого замыкания.

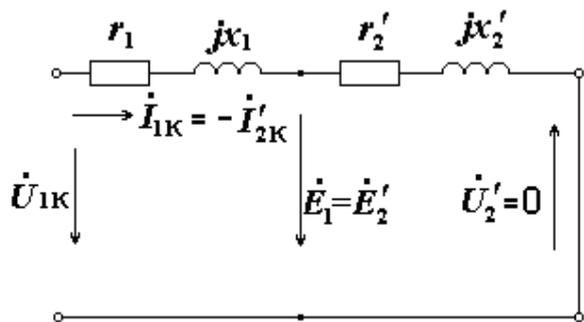


Рис. 4.7 Схема замещения трансформатора в режиме короткого замыкания

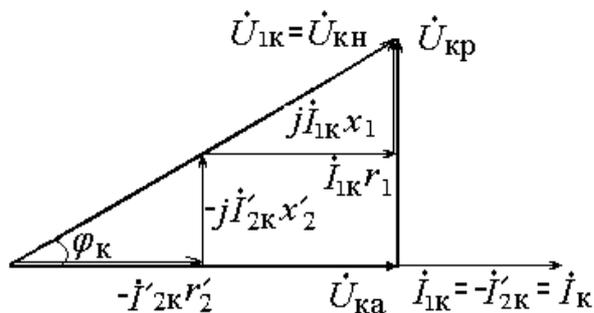


Рис. 4.8 Векторная диаграмма для режима короткого замыкания

Примечание 4.3. Векторные диаграммы для режимов холостого хода и короткого замыкания построены в разных масштабах, так как $U_{кн} \ll U_{ном}$.

Перед построением векторной диаграммы в режиме номинальной активно - индуктивной нагрузки при $\cos \varphi_2 = 0,8$ ($\varphi_2 = 37^\circ$) произведем расчеты необходимых величин:

$$U_2' = K \cdot U_2 = 5,55 \cdot 21 = 115,3 \text{ В,}$$

$$I_2' = I_2 / K = 9,62 / 5,55 = 1,73 \text{ А,}$$

$$I_2' \cdot r_2' = 1,73 \cdot 1,62 = 2,8 \text{ В,} \quad I_1 \cdot r_1 = 1,9 \cdot 1,62 = 3,1 \text{ В,}$$

$$I_2' \cdot x_2' = 1,73 \cdot 0,96 = 1,6 \text{ В,} \quad I_1 \cdot x_1 = 1,9 \cdot 0,96 = 1,8 \text{ В}$$

Система уравнений приведенного трансформатора в режиме нагрузки имеет вид:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \cdot (r_1 + jx_1)$$

$$\dot{E}_2' = \dot{U}_2' + \dot{I}_2' \cdot (r_2' + jx_2')$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2')$$

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$$

Этой системе уравнений соответствует Т-образная схема замещения

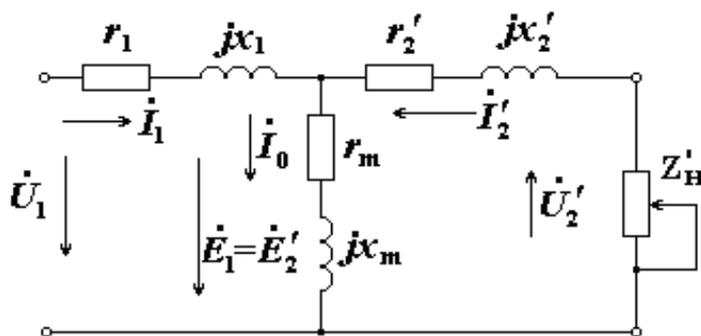


Рис.4.9 Схема замещения приведенного трансформатора для режима нагрузки

Построение векторной диаграммы (рис. 4.10) начинаем с изображения в выбранных масштабах векторов \dot{U}'_2 и \dot{i}'_2 с углом между ними φ_2 . Далее в соответствии с приведенными выше уравнениями строим векторы $\dot{U}'_2, \dot{E}'_2, -\dot{E}_1, \dot{I}_1, \dot{U}_1$.

Примечание 4.4. Масштаб напряжения принят такой же, как и при построении векторной диаграммы для режима холостого хода, масштаб тока – больше.

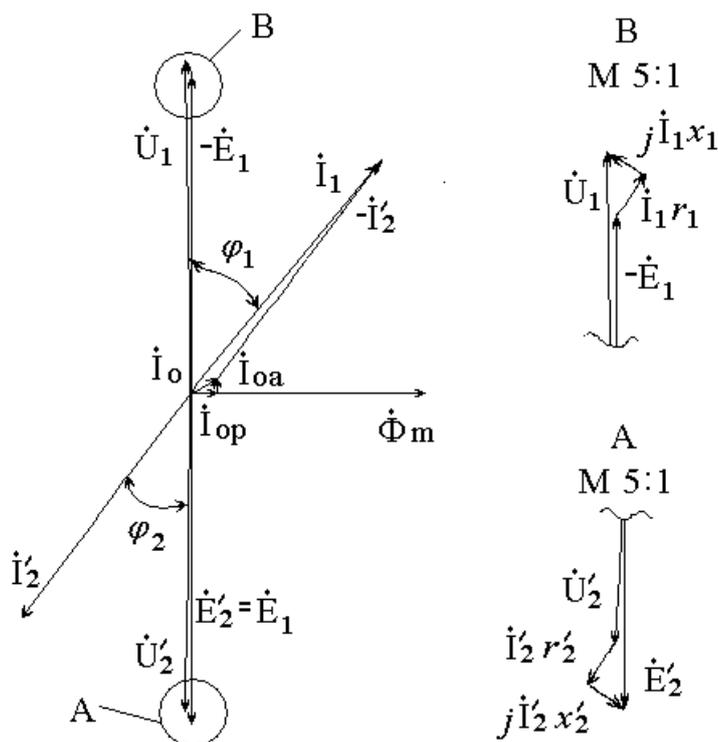


Рис. 4.10 Векторная диаграмма трансформатора при номинальной нагрузке

2.8) Значения КПД трансформатора, рассчитанные по формуле

$$\eta = 1 - (P_0 + P_{KH} \cdot \beta^2) / (P_{2ном} \cdot \beta + P_0 + P_{KH} \cdot \beta^2),$$

занесены в таблицу 4.2, характеристика $\eta = f(\beta)$ при $\cos \varphi_2 = 0,8$ представлена на рис. 4.11.

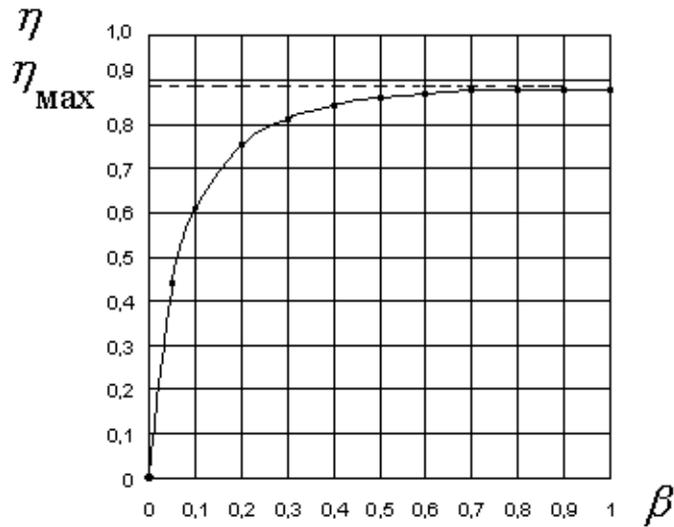
Величина коэффициента нагрузки, при котором КПД достигает максимума

$$\beta_{(MAX)} = \sqrt{P_0 / P_{KH}} = \sqrt{30 / 36} = 0,9,$$

при этом $\eta_{max} = 0,88$

Таблица 4.2

β	η
0	0
0,05	0,444
0,1	0,613
0,2	0,753
0,3	0,812
0,4	0,843
0,5	0,860
0,6	0,870
0,7	0,876
0,8	0,879
0,9	0,880
1,0	0,879

Рис. 4.11 Зависимость $\eta = f(\beta)$ при $\cos \varphi_2 = 0,8$ *Задача 3. Асинхронные электрические машины*

Технические данные трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

Номинальная мощность $P_{2\text{ном}} = 500$ Вт;

Номинальное линейное напряжение $U_{1\text{л}} = 200$ В;

Частота $f_1 = 400$ Гц;

Номинальная частота вращения $n_2 = 5800$ об/мин;

Номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,7$;

Номинальный КПД $\eta = 0,73$;

Активное сопротивление фазы обмотки статора $R_1 = 1,57$ Ом (при температуре 20°C);

Данные опыта холостого хода:

Ток холостого хода $I_0 = 2,2$ А;

Потери холостого хода $P_0 = 270$ Вт;

Температура обмоток $t_0 = 60$ °С;

Данные опыта короткого замыкания:

Ток короткого замыкания $I_k = 3,6$ А;

Потери короткого замыкания $P_k = 152$ Вт;

Напряжение короткого замыкания (фазное) $U_k = 32$ В;

Температура обмоток $t_k = 120^\circ\text{C}$.

3.1) Для расчета параметров схемы замещения определим:

-номинальную потребляемую мощность

$$P_{1\text{НОМ}} = P_{2\text{НОМ}} / \eta = 500 / 0,73 = 685 \text{ Вт};$$

- номинальное фазное напряжение

$$U_1 = U_{1\text{НОМ}} / \sqrt{3} = 200 / 1,73 = 115,5 \text{ В};$$

- номинальный ток фазы обмотки статора

$$I_1 = P_{1\text{НОМ}} / 3 \cdot U_1 \cdot \cos \varphi = 685 / 3 \cdot 115,5 \cdot 0,7 = 2,82 \text{ А};$$

3.2) По данным опыта *холостого хода* рассчитаем:

- электрические потери в обмотке статора

$$\Delta P_{1\text{эл}} = 3 \cdot I_0^2 \cdot R_{1\text{т0}} = 3 \cdot 2,2^2 \cdot 1,8 = 26 \text{ Вт},$$

где $R_{1\text{т0}} = (1 + 0,0038 \cdot (60 - 20)) = 1,57 \cdot (1 + 0,0038 \cdot 40) = 1,8 \text{ Ом}$ -

активное сопротивление фазы обмотки статора, приведенное к температуре опыта холостого хода;

- сумму магнитных и механических потерь

$$P'_0 = P_0 - \Delta P_{1\text{эл}} = 270 - 26 = 244 \text{ Вт};$$

примем $\Delta P_{\text{мех}} = 0,45 P'_0 = 0,45 \cdot 244 = 110 \text{ Вт}$,

тогда $\Delta P_{\text{МГ}} = P'_0 - \Delta P_{\text{мех}} = 244 - 110 = 134 \text{ Вт}$;

- активное сопротивление намагничивающего контура схемы замещения

$$R_m = \Delta P_{\text{МГ}} / (3 \cdot I_0^2) = 134 / (3 \cdot 2,2^2) = 9,2 \text{ Ом};$$

- активное сопротивление вынесенного на зажимы машины намагничивающего контура схемы замещения

$$R_{10} = R_{1\text{т0}} + R_m = 9,2 + 1,8 = 11 \text{ Ом};$$

- полное сопротивление вынесенного на зажимы машины намагничивающего контура

$$Z_{10} = U_1 / I_0 = 115,5 / 2,2 = 52,5 \text{ Ом};$$

- реактивное сопротивление вынесенного на зажимы машины намагничивающего контура

$$X_{10} = X_1 + X_m = \sqrt{Z_{10}^2 - R_{10}^2} = \sqrt{52,5^2 - 11^2} = 51,3 \text{ Ом}$$

3.3) По данным опыта *короткого замыкания* рассчитаем:

- активное сопротивление фазы обмотки статора, приведенное к температуре опыта короткого замыкания

$$R_{1\text{тк}} = (1 + 0,0038 \cdot (120 - 20)) = 1,57 \cdot (1 + 0,0038 \cdot 100) = 2,17 \text{ Ом};$$

- полное сопротивление короткого замыкания

$$Z_k = U_k / I_k = 32 / 3,6 = 8,9 \text{ Ом};$$

- активное сопротивление короткого замыкания

$$R_k = R_{1\text{тк}} + R'_2 = P_k / (3 \cdot I_k^2) = 152 / (3 \cdot 3,6^2) = 3,9 \text{ Ом};$$

- приведенное активное сопротивление обмотки ротора

$$R'_2 = R_k - R_{1\text{тк}} = 3,9 - 2,17 = 1,73 \text{ Ом};$$

- реактивное сопротивление короткого замыкания

$$X_k = X_1 + X'_2 = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{8,9^2 - 3,9^2} = 8 \text{ Ом};$$

- индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора и приведенное индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора

$$X_l = X'_2 = X_k / 2 = 802 = 4 \text{ Ом};$$

- индуктивное сопротивление намагничивающего контура

$$X_m = X_{10} - X_l = 51,3 - 4 = 47,3 \text{ Ом}$$

3.4) Поправочный коэффициент

$$\sigma_1 = 1 + X_l / X_m = 1 + 4 / 47,3 = 1,08$$

3.5) Схема замещения фазы обмотки статора трехфазного асинхронного двигателя с вынесенным на зажимы намагничивающим контуром представлена на рис. 4.12

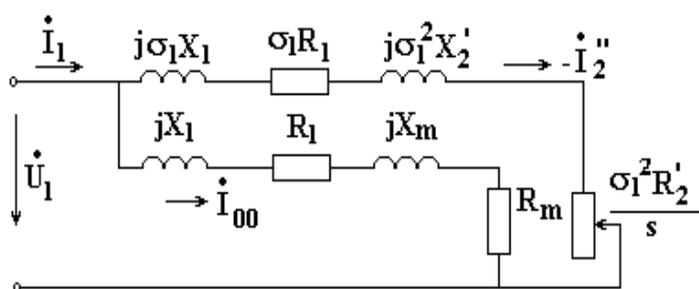


Рис. 4.12 Уточненная Г-образная схема замещения асинхронной машины

Численные значения параметров схемы замещения:

$$R_1 = 2,17 \text{ Ом}, \quad X_l = 4 \text{ Ом},$$

$$R'_2 = 1,73 \text{ Ом}, \quad X'_2 = 4 \text{ Ом},$$

$$R_m = 9,2 \text{ Ом}, \quad X_m = 47,3 \text{ Ом},$$

$$\sigma_1 R_1 = 2,9 \text{ Ом}, \quad \sigma_1 X_l = 4,32 \text{ Ом},$$

$$\sigma_1^2 R'_2 = 2 \text{ Ом},$$

$$\sigma_1^2 X'_2 = 4,67 \text{ Ом}$$

3.6) Механическая характеристика асинхронной машины (зависимость электромагнитного момента M от скольжения s при $U_1 = const$ и $f_1 = const$) рассчитана в соответствии с выражением

$$M = \pm \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2 \cdot R'_2 / s}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot ((R_1 + \sigma_1 \cdot R'_2 / s)^2 + (X_1 + \sigma_1 \cdot X'_2)^2)}$$

для режимов работы машины:

- генераторного при $-2 < s \leq 0$,

- двигательного при $s_0 < s \leq 1$,

где (s_0 – скольжение холостого хода двигателя),

- электромагнитного тормоза $1 < s < 2$.

Результаты расчета сведены в таблицу 4.3, механическая характеристика показана на рис. 4.13

s	$M, \text{Нм}$	s	$M, \text{Нм}$
0,00	0,00	0,014	0,43
-0,03	-1,09	0,033	0,94
-0,06	-2,00	0,06	1,54
-0,08	-2,63	0,08	1,89
-0,10	-3,19	0,10	2,16
-0,12	-3,65	0,12	2,37
-0,16	-4,27	0,16	2,61
-0,22	-4,54	0,22	2,71
-0,40	-3,62	0,40	2,35
-0,60	-2,60	0,60	1,87
-0,80	-1,97	0,80	1,53
-1,00	-1,58	1,00	1,28
-1,20	-1,31	1,20	1,10
-1,40	-1,12	1,40	0,96
-1,60	-0,97	1,60	0,85
-1,80	-0,86	1,80	0,76
-2,00	-0,77	2,00	0,69

3.7) По механической характеристике определим значения электромагнитного момента для скольжений

а) номинального $S_{\text{ном}} = (n_1 - n_2) / n_1 = (6000 - 5800) / 6000 = 0,033$,

где $n_1 = (60 \cdot f_1) / p = (60 \cdot 400) / 4 = 6000$ об/мин – частота вращения магнитного поля статора,

$p = 4$ – число пар полюсов,

- номинальный момент $M_{\text{ном}} = 0,94$ Нм

б) критического $S_{\text{кр}} \approx R'_2 / X_{\text{к}} = 1,73 / 8 = 0,22$

- максимальный момент $M_{\text{мах}} = 2,71$ Нм

в) $S = 1$

- пусковой момент $M_{\text{п}} = 1,28$ Нм

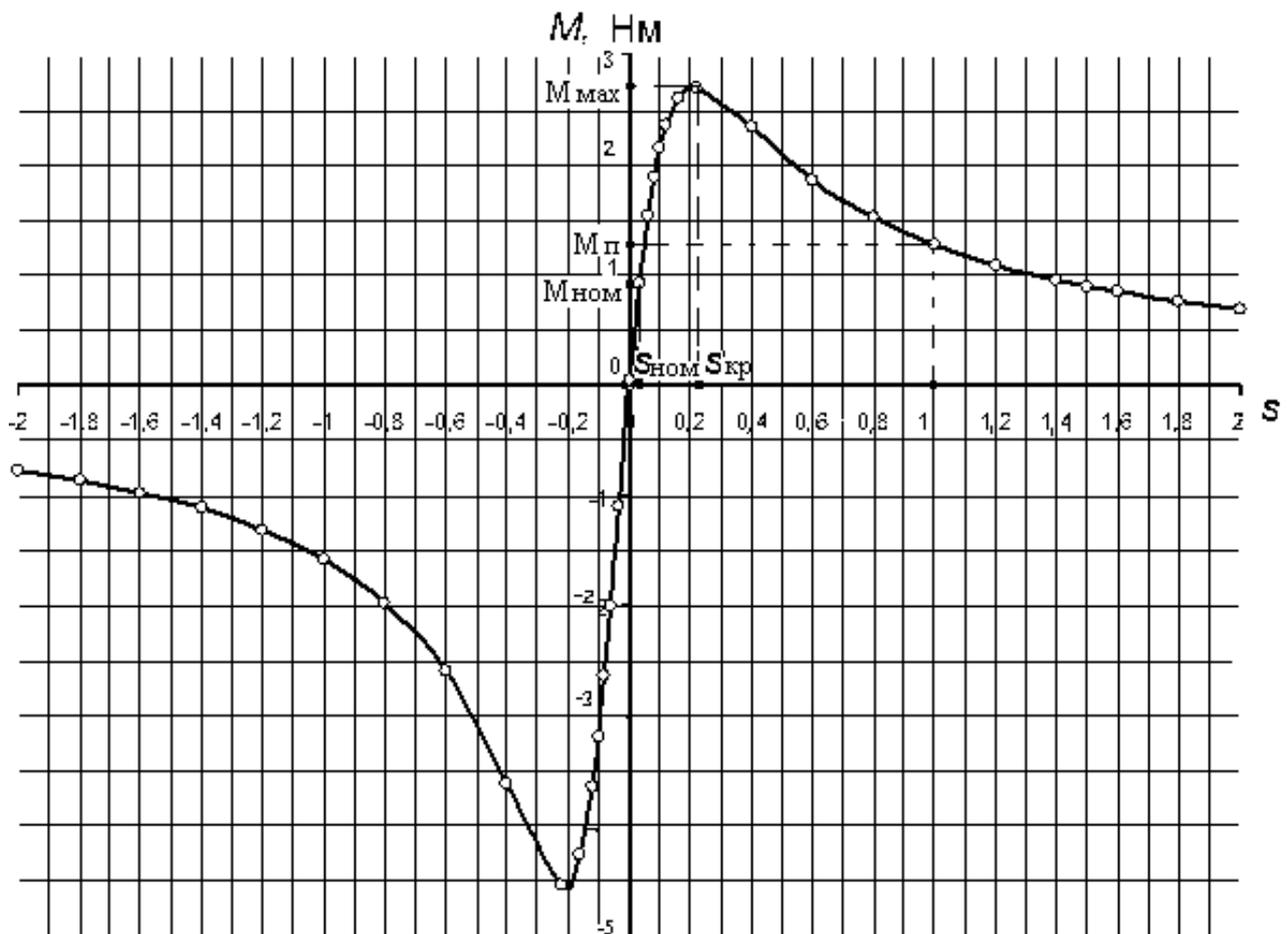


Рис. 4.13 Механическая характеристика асинхронной машины

Момент холостого хода рассчитаем, исходя из соотношения

$$M_0 = P_0 / \Omega_1 = 270 / 628 = 0,43 \text{ Нм},$$

где $\Omega_1 = (2 \cdot \pi \cdot f_1) / p = (2 \cdot \pi \cdot 400) / 4 = 628 \text{ рад/с}$ - угловая скорость поля

По механической характеристике определим $s_0 = 0,014$

3.8) Кратность пускового момента $K_{п} = M_{п} / M_{ном} = 1,28 / 0,94 = 1,36$,
перегрузочная способность $K_M = M_{max} / M_{ном} = 2,71 / 0,94 = 2,9$

3.9) При уменьшении питающего напряжения на 20% ,то есть до $(0,8 \cdot U_{1ном})$, получим

пусковой момент $1,28 \cdot (0,8)^2 = 1,28 \cdot 0,64 = 0,82 \text{ Нм}$

максимальный момент $2,71 \cdot (0,8)^2 = 2,71 \cdot 0,64 = 1,73 \text{ Нм}$

Задача 4. Авиационные синхронные электрические машины

Технические данные трехфазного явнополюсного синхронного генератора:

Номинальная мощность $S_{ном} = 60 \text{ кВА}$,

Номинальное линейное напряжение $U_{лл} = 208 \text{ В}$,

Соединение обмотки якоря – Y,

Номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,8$,

Номинальная частота вращения $n = 8000$ об/мин,

Номинальная частота $f = 400$ Гц,

Активное сопротивление фазы обмотки якоря $r_{a*} = 0,02$ о.е.,

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки якоря $x_{\sigma a*} = 0,03$ о.е.,

Отношение короткого замыкания ОКЗ = 0,69,

Коэффициент приведения МДС якоря по продольной оси $K_{ad} = 0,85$

4.1) В качестве базиса выберем следующие номинальные величины:

$$U_B = U_H = U_{\text{ЛНОМ}} / \sqrt{3} = 208 / \sqrt{3} = 120 \text{ В},$$

$$S_B = S_{\text{НОМ}} = 60000 \text{ ВА},$$

$$I_B = I_H = S_{\text{НОМ}} / (3 \cdot U_H) = 60000 / (3 \cdot 120) = 166,7 \text{ А},$$

$$Z_B = U_B / I_B = 120 / 166,7 = 0,72 \text{ Ом},$$

$$\omega_B = \omega_{\text{НОМ}} = 2\pi \cdot f_{\text{НОМ}} = 2\pi \cdot 400 = 2513 \text{ рад/с}$$

4.2) По данным таблицы 3.2 строим характеристику холостого хода синхронного генератора в относительных единицах (кривая 1 на рис. 4.14).

На этом же рисунке построены спрямленная насыщенная (прямая 2), спрямленная ненасыщенная (прямая 3) характеристики холостого хода и характеристика короткого замыкания (прямая 4) также в относительных единицах (о.е.)

С помощью этих характеристик определим $x_{ad*_{\infty}}$ - ненасыщенное значение индуктивного сопротивления продольной реакции якоря.

Прямая 2 построена через точку с координатами $[I_{B0*}, (E_{\delta*} = U_{H*})]$, прямая 3 как касательная к начальному участку характеристики 1 и проходит через точку с координатами $[I_{B0*}, E_{\delta*_{\infty}}]$.

Полученное таким образом ненасыщенное значение ЭДС воздушного зазора $E_{\delta*_{\infty}} = 1,15$ о.е. позволяет определить коэффициент насыщения магнитной цепи синхронного генератора по продольной оси

$$k_{\mu d} = E_{\delta*_{\infty}} / E_{\delta*} = 1,15 / 1 = 1,15$$

Характеристика короткого замыкания (прямая 4) построена через точку с координатами $[I_{B0*}, I_{k0*}]$, где ток $I_{k0*} = \text{ОКЗ} = 0,69$ о.е.

Учитывая соотношение

$$\text{ОКЗ} = 1/x_{d*} = 1/(x_{ad*} + x_{\sigma a*}),$$

определяем насыщенное значение индуктивного сопротивления продольной реакции якоря

$$x_{ad*} = x_{d*} - x_{\sigma a*} = 1 / \text{OKЗ} - x_{\sigma a*} = 1 / 0,69 - 0,03 = 1,45 - 0,03 = 1,42 \text{ о.е.}$$

Тогда ненасыщенное значение индуктивного сопротивления продольной реакции якоря будет

$$x_{ad*_{\infty}} = x_{ad*} \cdot k_{\mu d} = 1,42 \cdot 1,15 = 1,63 \text{ о.е.}$$

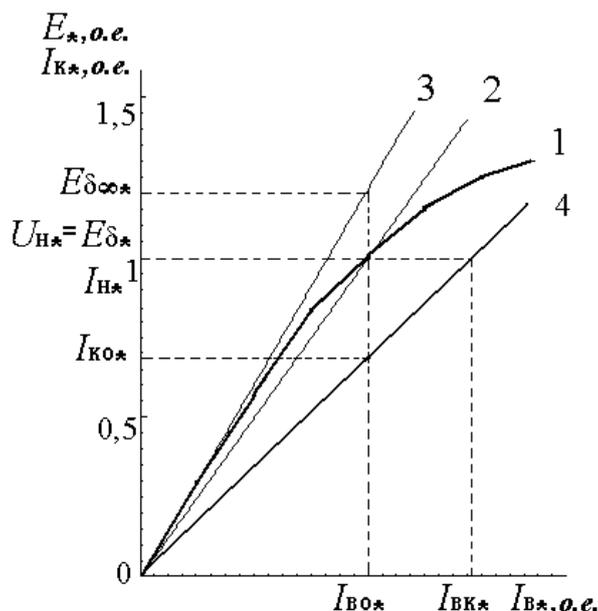


Рис. 4.14 Характеристики холостого хода $E_* = f(I_{в*})$ и короткого замыкания $I_{к*} = f(I_{в*})$

4.3) В соответствии с описанной ранее методикой строим векторную диаграмму Потье (рис.4.15).

Исходными данными для построения векторной диаграммы являются

$$U_* = 1 \text{ о.е.}, \quad I_* = 1 \text{ о.е.}, \quad \cos \varphi = 0,8 \quad (\varphi = 37^\circ)$$

Рассчитаем некоторые величины, необходимые для построения:

$$I_* \cdot r_{a*} = 1 \cdot 0,02 = 0,02 \text{ о.е.}, \quad I_* \cdot x_{\sigma a*} = 1 \cdot 0,03 = 0,03 \text{ о.е.},$$

$$E_{\delta*} = 1,2 \text{ о.е.}, \quad E_{\delta*_{\infty}} = 1,5 \text{ о.е. (из рис 4.15),}$$

$k_{\mu d} = E_{\delta*_{\infty}} / E_{\delta*} = 1,5 / 1,2 = 1,25$ (коэффициент насыщения больше, чем при коротком замыкании, так как $E_{\delta*} = 1,2 > 1$),

$$x_{ad*} = x_{ad*_{\infty}} / k_{\mu d} = 1,63 / 1,25 = 1,3 \text{ о.е.},$$

$$I_* \cdot x_{ad*} = 1 \cdot 1,3 = 1,3 \text{ о.е.},$$

$$F'_{a*} = F'_{ad*} = K_{ad} \cdot F_{a*} = 0,85 \cdot 1 = 0,85 \text{ о.е.}$$

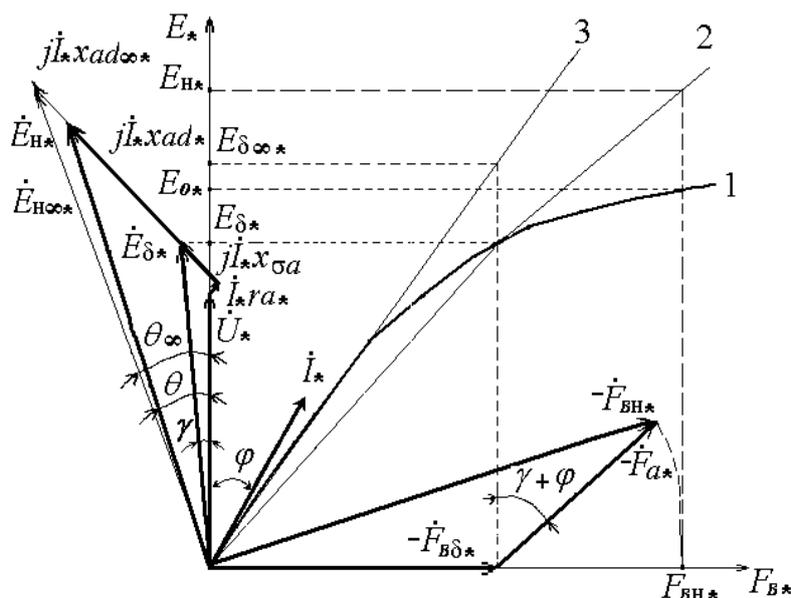


Рис 4.15 Векторная диаграмма Потье трехфазного синхронного генератора

В результате построения векторной диаграммы Потье получили

- номинальный ток возбуждения $I_{вн*} = F_{вн*} = 1,9$ о.е.,
- ЭДС холостого хода $E_{0*} = 1,17$ о.е. ($E_0 = 1,17 \cdot 120 = 140$ В),
- ЭДС генератора в режиме номинальной нагрузки $E_{н*} = 1,71$ о.е., ($E_n = 1,71 \cdot 120 = 205$ В),
- угол нагрузки $\theta = 18^\circ$,
- приращение напряжения при сбросе нагрузки

$$\Delta U_* = E_{0*} - U_* = 1,17 - 1 = 0,17 \text{ о.е.}, (\Delta U = E_0 - U = 140 - 120 = 20 \text{ В})$$

Произведем дополнительные построения с использованием ненасыщенного значения индуктивного сопротивления продольной реакции якоря $x_{ad*_{\infty}} = 1,63$ о.е и $I_* \cdot x_{ad*_{\infty}} = 1 \cdot 1,63 = 1,63$ о.е. и определим $E_{н*_{\infty}} = 1,88$ о.е., ($E_{н\infty} = 1,88 \cdot 120 = 226$ В)

По спрямленной насыщенной характеристике холостого хода (прямая 2 на рис. 4.15) найдем $I_{вн*_{\infty}} = F_{вн*_{\infty}} = 1,96$ о.е.

Как видно, обе эти величины возросли по сравнению с определенными ранее с учетом насыщения. Угол нагрузки также увеличился до $\theta_{\infty} = 20,5^\circ$.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что использование при построении векторной диаграммы ненасыщенных значений параметров генератора вносит погрешности в определяемые с помощью диаграммы величины, характеризующие его работу.

Так, например, найденный неточно ток возбуждения, используемый в дальнейшем для настройки регулятора напряжения, может вызвать неверное функционирование регулятора и, как следствие, ухудшение качества электроэнергии, вырабатываемой генератором.

Продолжение таблицы П.1

Последние цифры шифра	Вариант													
	22/23 72/73	24/25 74/75	26/27 76/77	28/29 78/79	30/31 80/81	32/33 82/83	34/35 84/85	36/37 86/87	38/39 88/89	40/41 90/91	42/43 92/93	44/45 94/95	46/47 96/97	48/49 98/99
1	3000	2500	5000	6000	4000	4500	675	550	770	1700	9000	10000	12000	18000
2	27,5	27,5	28,5	28,5	28,5	28,5	27	27	27	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5
3	109	90	175	210	140	158	25	20,5	28,5	60	315	350	421	630
4	4000- 8000	3800- 5900	4000- 6000	4000- 9000	4000- 9000	4000- 9000	3800- 5900	3800- 5900	4000- 8000	3800- 5900	4000- 9000	4000- 9000	4000- 9000	3800- 9000
5	0,024	0,028	0,0052	0,0115	0,0029	0,0045	0,028	0,023	0,031	0,025	0,00645	0,003	0,00412	0,00263
6	2,2	3,7	3,2	2,2	3,9	3,3	8,7	7,6	8,9	7,3	1,32	1,2	1,25	0,92
7	0,0122	—	0,0117	0,00465	0,011	0,0115	—	—	—	—	0,00267	0,0012	0,0015	0,0011
8	4/4	4/-	4/4	4/4	6/3	6/3	4/-	4/-	4/-	4/-	6/3	6/3	8/4	8/4

Авиационные трансформаторы. Технические данные

Таблица П.2

Номер строки	Две последние цифры шифра	00/01	02/03	04/05	06/07	08/09	10/11	12/13	14/15	16/17	18/19	20/21
		50/51	52/53	54/55	56/57	58/59	60/61	62/63	64/65	66/67	68/69	70/71
	Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Номинальная мощность, $S_{2ном}$, ВА	24	50	75	120	500	2000	150	250	500	1200	1500
2	Частота, f , Гц	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
3	Число фаз, m	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3
4	Номинальное высшее напряжение, $U_{1ном}$, В	120	115	115	300	200	208	200	200	360	200	200
5	Номинальное низшее напряжение, $U_{2ном}$, В	40	28	6,3	115	28	115	36	36	36	36	36
6	Номинальное напряжение короткого замыкания, $U_{кн}$, %	12	9,5	8,5	8	7	6,5	7,5	6,75	6,5	4,5	5,25
7	Ток холостого хода, I_0 , %	20	16	8	5,5	6	4	20	5	6	9,5	6
8	Потери короткого замыкания, $P_{кн}$, Вт	2	3,2	3,9	6	23,8	87	8,3	11	22	32	65
9	Потери холостого хода, P_0 , Вт	2	3	3,4	5	16	63	7,5	5	14	21	45

Продолжение таблицы П.2

Последние цифры шифра	22/23 72/73	24/25 74/75	26/27 76/77	28/29 78/79	30/31 80/81	32/33 82/83	34/35 84/85	36/37 86/87	38/39 88/89	40/41 90/91	42/43 92/93	44/45 94/95	46/47 96/97	48/49 98/99
1	1600	1650	500	1800	1850	1900	2000	2060	2500	2000	2600	3000	6000	15000
2	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
5	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
6	3,4	8,1	6,4	8,35	3,4	3,15	5,2	9	8,5	6,5	8,7	9,35	5,5	3,98
7	4,2	5	10	4	3	3	10	3,5	3	4,8	5	3	2,5	2
8	37	107	28	121	50	40	37	160	150	84	160	110	192	265
9	32	40	24	40	35	27	26	50	40	44	70	43	80	165

Авиационные трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Технические данные

Таблица П.3

Номер строки	Две последние цифры шифра	00/01	02/03	04/05	06/07	08/09	10/11	12/13	14/15	16/17	18/19	20/21
		50/51	52/53	54/55	56/57	58/59	60/61	62/63	64/65	66/67	68/69	70/71
	Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Номинальная мощность, $P_{2ном}$, Вт	25	50	100	200	50	100	200	350	1000	35000	600
2	Номинальное линейное напряжение, U_1 л, В	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
3	Частота, f_1 , Гц	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
4	Номинальная частота вращения, n_2 , об/мин	5810	5820	5860	5880	11400	11460	11480	11500	11500	4608	4300
5	Номинальный коэффициент мощности, $\cos \varphi$	0,6	0,61	0,63	0,65	0,68	0,7	0,72	0,74	0,75	0,8	0,55
6	Номинальный КПД	0,38	0,48	0,55	0,64	0,58	0,6	0,67	0,7	0,78	0,83	0,7
7	Активное сопротивление фазы обмотки статора, r_1 , Ом (при температуре 20°C)	36	19	10	5	23	11	4,8	2,8	0,85	0,023	0,98

Продолжение таблицы П.3

Последние цифры шифра	22/23 72/73	24/25 74/75	26/27 76/77	28/29 78/79	30/31 80/81	32/33 82/83	34/35 84/85	36/37 86/87	38/39 88/89	40/41 90/91	42/43 92/93	44/45 94/95	46/47 96/97	48/49 98/99
1	1100	1500	2250	3000	4000	7060	10000	400	750	5600	9500	3500	5000	7800
2	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
3	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
4	11400	7300	5500	7600	4400	7780	7700	11300	5600	5560	7300	5500	7400	7760
5	0,76	0,76	0,58	0,8	0,62	0,655	0,73	0,72	0,67	0,69	0,62	0,62	0,68	0,74
6	0,8	0,72	0,73	0,76	0,81	0,85	0,81	0,7	0,78	0,76	0,83	0,74	0,77	0,82
7	1,24	0,75	0,22	0,1	0,15	0,19	0,18	1,67	0,87	0,27	0,22	0,14	0,192	0,13

Авиационные трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором.

Данные опытов холостого хода и короткого замыкания

Таблица П.4

Номер строки	Две последние цифры шифра	00/01 50/51	02/03 52/53	04/05 54/55	06/07 56/57	08/09 58/59	10/11 60/61	12/13 62/63	14/15 64/65	16/17 66/67	18/19 68/69	20/21 70/71
	Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Данные опыта холостого хода												
1	Ток холостого хода, I_0 , А	0,2	0,34	0,55	0,9	0,23	0,45	0,8	1,2	3,5	60	3,38
2	Потери холостого хода, P_0 , Вт	7	13	23	323	8	25	40	60	108	1800	135
3	Температура обмоток, °С	50	50	50	35	50	50	50	60	65	50	100
Данные опыта короткого замыкания												
4	Ток короткого замыкания, I_k , А	0,4	0,7	1	1,6	0,5	0,8	1,6	2,5	6	120	6,2
5	Потери короткого замыкания, P_k , Вт	47,5	75	84,5	107	43,5	56	97	148	260	3370	312
6	Напряжение короткого замыкания (фазное), U_k , В	53,6	51	47,4	44,1	44,5	38,2	38,3	29,1	35	21,6	38
7	Температура обмоток, °С	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120

Продолжение таблицы П.4

Последние цифры шифра	22/23	24/25	26/27	28/29	30/31	32/33	34/35	36/37	38/39	40/41	42/43	44/45	46/47	48/49
	72/73	74/75	76/77	78/79	80/81	82/83	84/85	86/87	88/89	90/91	92/93	94/95	96/97	98/99
Номер строки	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Вариант														
Данные опыта холостого хода														
1	3,4	3,8	9	7,95	11,5	22,4	25	1,4	2,75	13,7	13	8,3	8,5	24
2	130	160	560	609	450	575	700	65	93	430	680	630	520	630
3	50	50	50	50	50	50	60	60	60	60	60	65	100	100
Данные опыта короткого замыкания														
4	4,6	6,8	13,5	13,75	15,8	28,5	37	3,1	4,7	21	25	12,15	18,3	39
5	167	286	486	526	750	825	1390	162	220	670	890	380	840	1270
6	30	33	35,6	32	31,8	15,7	21	37	33	18	20,2	33	31	19
7	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120

Авиационные трехфазные явнополусные синхронные генераторы. Технические данные

Таблица П.5

Номер строки	Две последние цифры шифра	00/01 50/51	02/03 52/53	04/05 54/55	06/07 56/57	08/09 58/59	10/11 60/61	12/13 62/63	14/15 64/65	16/17 66/67	18/19 68/69	20/21 70/71
	Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Номинальная мощность, $S_{ном}$, кВА	3,5	7,5	8	10	10	12	16	20	30	30	40
2	Номинальное линейное напряжение, $U_{лном}$, В	208	120	115	208	208	115	115	208	208	200	208
3	Соединение обмотки якоря	Y	Y	Δ	Y	Y	Δ	Δ	Y	Y	Y	Y
4	Номинальный коэффициент мощности, $\cos\varphi_{ном}$	0,8	0,8	0,85	0,8	0,75	0,8	0,85	0,75	0,9	0,75	0,8
5	Номинальная частота вращения, n , об/мин	12000	4000	4000	8000	8000	4000	8000	8000	8000	8000	8000
6	Номинальная частота, f , Гц	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
7	Активное сопротивление фазы обмотки якоря, R_a^* , о.е.	0,04	0,091	0,034	0,033	0,038	0,041	0,048	0,065	0,042	0,03	0,035
8	Индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки якоря, $X_{с\sigma}^*$, о.е.	0,197	0,22	0,086	0,086	0,05	0,1	0,12	0,049	0,15	0,062	0,094
9	Отношение короткого замыкания (ОКЗ)	0,39	0,5	0,52	0,53	0,57	0,54	0,58	0,56	0,6	0,57	0,47
10	Коэффициент приведения МДС якоря по продольной оси, $K_{ад}$	0,842	0,86	0,85	0,86	0,84	0,83	0,82	0,85	0,83	0,84	0,93

Продолжение таблицы П.5

Последние цифры шифра	22/23 72/73	24/25 74/75	26/27 76/77	28/29 78/79	30/31 80/81	32/33 82/83	34/35 84/85	36/37 86/87	38/39 88/89	40/41 90/91	42/43 92/93	44/45 94/95	46/47 96/97	48/49 98/99
1	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
	40	30	50	8	16	60	75	90	100	60	60	60	90	120
2	208	208	208	208	208	208	208	208	208	208	208	208	208	208
3	Y	Y	Δ	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
4	0,85	0,85	0,85	0,8	0,85	0,8	0,9	0,8	0,75	0,85	0,85	0,8	0,85	0,85
5	6000	6000	8000	8000	8000	12000	8000	8000	8000	6000	8000	8000	6000	8000
6	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
7	0,032	0,031	0,041	0,035	0,047	0,053	0,041	0,031	0,023	0,05	0,052	0,051	0,033	0,021
8	0,091	0,09	0,11	0,088	0,13	0,14	0,11	0,098	0,093	0,12	0,15	0,13	0,093	0,091
9	0,54	0,51	0,65	0,53	0,56	0,65	0,68	0,7	0,7	0,67	0,68	0,66	0,71	0,68
10	0,94	0,91	0,8	0,84	0,81	0,83	0,86	0,86	0,84	0,82	0,84	0,81	0,84	0,82

Содержание

	Стр.
1. Общие методические указания к выполнению контрольной работы.....	3
1.1 Цель выполнения контрольной работы.....	3
1.2 Требования к оформлению контрольной работы.....	3
1.3 Указания к выбору варианта.....	3
1.4 Рекомендуемая литература.....	4
2. Содержание контрольной работы.....	4
2.1 Задача 1. Авиационные электрические машины постоянного тока...	4
2.2 Задача 2. Авиационные трансформаторы.....	4
2.3 Задача 3. Авиационные асинхронные электрические машины.....	4
2.4 Задача 4. Авиационные синхронные электрические машины.....	5
3. Методические указания к выполнению контрольной работы.....	5
3.1. Методические указания к задаче 1.....	5
4.2. Методические указания к задаче 2.....	7
4.3. Методические указания к задаче 3.....	8
4.4. Методические указания к задаче 4.....	10
4. Примеры решения задач.....	12
Приложение. Таблицы вариантов заданий.....	29

Подписано в печать 02.03.2017 г.

Печать офсетная
2,32 усл.печ.л.

Формат 60x84/16
Заказ № 1725/142

1,24 уч.-изд. л.
Тираж 70 экз.

*Московский государственный технический университет ГА
125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20
ООО «ИПП «ИНСОФТ»
107140, г. Москва, 3-й Красносельский переулок д.21, стр. 1*