МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФГБОУ ВПО
ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Ю.В. Коновалов

РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ДИАГРАММ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Методические указания к практическому занятию

ИЗДАТЕЛЬСТВО
Иркутского государственного технического университета
2015

Для трехфазного синхронного генератора (СГ) с параметрами, представленными в табл. 1, в соответствии со своим вариантом:

1. Построить характеристику холостого хода (ХХ).
2. Построить характеристику короткого замыкания (КЗ).
3. Построить треугольник КЗ.
4. Определить МДС реакции якоря (РЯ) при номинальном режиме.
5. Вычислить синхронные реактивные сопротивления по продольной и поперечной оси для ненасыщенного генератора.
6. Построить диаграмму МДС (диаграмму Потье) для номинального режима.
7. Построить диаграмму ЭДС (диаграмму Блонделя).
8. Построить диаграмму МДС для различных нагрузок.
9. Построить U–образную характеристику генератора при его работе параллельно с сетью бесконечной мощности при активном токе статора $I_a=0,5$ и $I_a = 0$.

Все расчеты и построения выполнять в относительных единицах (о.е.). За базисное значение (за единицу) принимаем: номинальное фазное напряжение при холостом ходе $U_{НФ} = E_0 = 1$, номинальный фазный ток $I_{ФН}=1$, номинальное полное сопротивление $z = \frac{U_H}{I_H} = \frac{E_0}{I_H} = 1$ и ток возбуждения $I_{B0} = 1$, соответствующий по характеристике ХХ номинальному напряжению $U_{НФ} = E_0 = 1$. Далее, если расчет выполнен в именованных единицах (В, А, Ом, Вт и т.д.), то эти единицы проставляются, а если в о.е. – то эти единицы не указываются.

Таблица 1

Исходные данные для расчета

№ варианта	P_H, МВт	U_H, кВ	$cos\ \varphi_H$	*ОКЗ*	$x_{\sigma a}$
0	6,875	6,6	0,8	2	0,11
1	7,5	6,6	0,75	1	0,12
2	8,25	6,6	0,8	0,78	0,14
3	9,4	10,5	0,85	0,2	0,12
4	9,5	10,5	0,75	1,2	0,1
5	11	6,6	0,7	0,88	0,12
6	11,25	3,3	0,8	0,85	0,16
7	16,25	3,3	0,85	1,4	0,15
8	1,75	10,5	0,7	1,25	0,135
9	18,75	10,5	0,8	1,1	0,13
10	19	10,5	0,8	1,25	0,15
11	15	10,5	0,85	1,36	0,25
12	0,59	6,3	0,75	1,4	0,28
13	100	15,75	0,7	1,5	0,2
14	1,5	6,3	0,8	1,45	0,21
15	6	3,1	0,82	1,3	0,18
16	9,2	13	0,8	1,2	0,261
17	32	13,2	0,85	1	0,236
18	3	3,15	0,84	1,1	0,27
19	25	10,5	0,82	0,95	0,18
20	0,204	3,15	0,78	0,9	0,19
21	37	10	0,75	0,8	0,2
22	50	10,5	0,7	0,6	0,15
23	62	13	0,8	0,7	0,11
24	8	6,6	0,73	0,65	0,25
25	1,76	2,3	0,79	0,75	0,2
26	1,5	3,15	0,74	0,55	0,18
27	0,212	0,4	0,82	0,4	0,11
28	12	10,5	0,85	1,2	0,14
29	24	11	0,87	1,35	0,16
30	3,72	6,3	0,8	0,3	0,19

ПРИМЕР РАСЧЕТА И ПОСТРОЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК И ДИАГРАММ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Исходные данные для расчета: P_H = 100 МВт; U_H = 15,75 кВ; $cos\varphi_H$=0,707; *ОКЗ* =1,5; $x_{\sigma a}$ = 0,2; схема соединения обмоток статора – звезда.

1. Построение характеристики ХХ $E_0 = f(I_B)$

При расчетах параметров СГ можно исходить из нормальной характеристики ХХ, полученной как средняя на основании большого количества испытаний машин. Эта характеристика, выраженная в о.е., представлена в табл.2. Характеристика ХХ, построенная по данным этой таблицы представлена на рис. 1.

Таблица 2

Нормальная характеристика ХХ

I_B	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2	2,5
E_0	0	0,29	0,56	0,82	1,0	1,15	1,23	1,27	1,31	1,33

2. Построение характеристики КЗ $I_K = f(I_B)$

Так как характеристика КЗ прямолинейна, то построим её по двум точкам: 1) точка начала координат *O*; 2) точка *M*, соответствующая единичной величине тока возбуждения и ОКЗ.

Для построения характеристика КЗ по величине ОКЗ при единичной величине тока возбуждения, находим I_{BK} – ток возбуждения, соответствующий по характеристике КЗ номинальному току якоря $I_K = I_H$:

так как $ОКЗ = \frac{I_{B0}}{I_{BK}} = \frac{1}{I_{BK}}$, то $I_{BK} = \frac{1}{ОКЗ} = \frac{1}{1,5} = 0,67$. На рис. 1 характеристика КЗ представлена прямой *OM*.

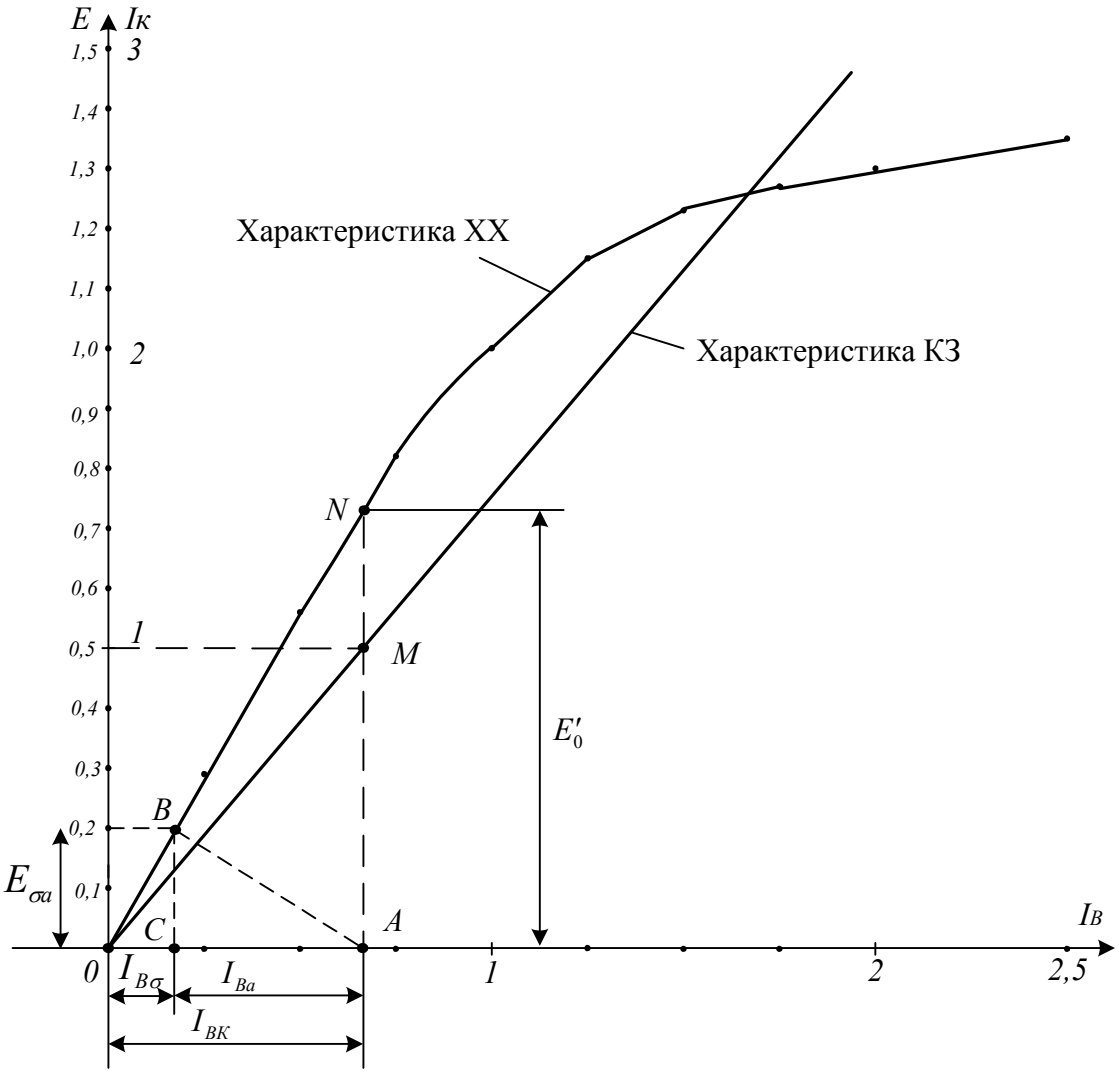

Рис. 1. Характеристики ХХ и КЗ и треугольник КЗ синхронного генератора

3. Построение треугольника КЗ

На рис. 1 точку *M* для тока $I_K = I_H = 1$ сносим на ось абсцисс – получаем точку *A*. ЭДС рассеяния, выраженную в о.е.: $E_{\sigma a}=I_H \cdot x_{\sigma a}=1\cdot 0,2=0,2$, откладываем на оси ординат и сносим на характеристику ХХ – получаем точку *B*. Из точки *B* опускаем перпендикуляр на ось абсцисс – получаем точку *C*. ΔCBA – треугольник КЗ.

4. Определение МДС реакции якоря при номинальном режиме

МДС реакции якоря в масштабе тока возбуждения определяется отрезком [*CA*] на рис. 1.

5. Вычисление синхронных реактивных сопротивлений x_d и x_q

Продолжая перпендикуляр на рис. 1 от точки A до пересечения с характеристикой ХХ – получим т. N. Отрезок [AN] соответствует ЭДС $E'_0 = 0{,}73$. По этой ЭДС определяем синхронное реактивное сопротивление по продольной оси $x_d = \frac{E'_0}{I_H} = \frac{0{,}73}{1} = 0{,}73$. Синхронное реактивное сопротивление по поперечной оси можно принять равным $x_q = 0{,}64 \cdot x_d = 0{,}64 \cdot 0{,}73 = 0{,}47$.

6. Построение диаграммы МДС (диаграммы Потье)

Активным сопротивлением обмотки статора, ввиду его малости, пренебрегаем. На рис. 2 строим такую же характеристику ХХ, как на рис. 1. На этом же рисунке совместим вектор $U_{H\Phi} = 1$ с положительным направлением оси ординат. Проводим вектор тока I_H под углом $\varphi_H = arcos(\varphi_H) = arccos(0{,}707) = 45^0$ к вектору напряжения $U_{H\Phi}$. Под углом 90^0 к току I_H проводим прямую через конец вектора напряжения $U_{H\Phi}$. По этой линии от конца вектора $U_{H\Phi}$ откладываем вектор ЭДС рассеяния обмотки якоря $E_{\sigma a} = 0{,}2$ – получаем точку B.

Соединяя точку B с точкой начала координат O – получаем вектор индуктируемой в генераторе ЭДС E_δ. Поворачивая этот вектор до совмещения его с осью ординат – получаем точку B'. Сносим точку B' на характеристику ХХ в точку B''. Из точки B'' опускаем перпендикуляр на ось абсцисс до точки A. Отрезок [OA] является величиной тока возбуждения $I_{B\delta}$, необходимого для создания ЭДС E_δ.

Для учета РЯ воспользуемся диаграммой рис.1. Отрезок [CA] является МДС реакции якоря в масштабе тока возбуждения $I_{Ba} = 0{,}48$. Для получения полного тока возбуждения I_{B0} сложим геометрически векторы $I_{B\delta}$ и I_{Ba}, где угол $\varphi' = \varphi_H + \theta = 45^0 + 7^0 = 52^0$ (угол θ – это угол нагрузки – угол сдвига между напряжением на зажимах машины U_H и ЭДС, индуктируемой в

генераторе E_δ). Описав дугу радиусом OC до пересечения с осью абсцисс в точке D, получим ток возбуждения I_{B0} = [OD]. При сбросе нагрузки этот ток возбуждения создаст ЭДС E_0 = [DH].

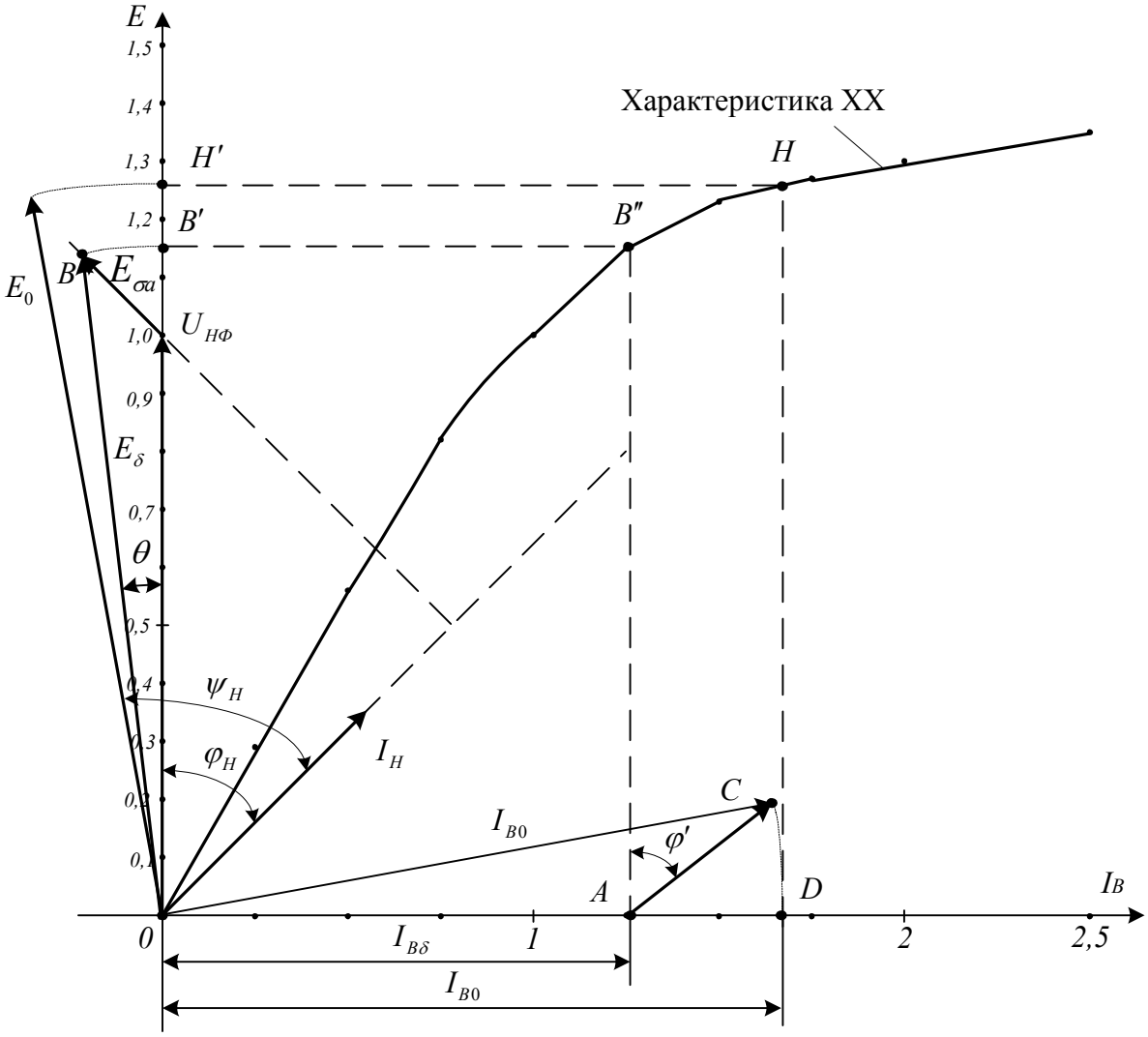

Рис. 2. Диаграмма МДС (диаграмма Потье) для номинального режима синхронного генератора

Для нахождения угла ψ_H – угла между током нагрузки I_H и индуктируемой ЭДС E_0, делаем дополнительные построения. Точку H с характеристики ХХ сносим на ось ординат – получаем точку H'. Поворачиваем вектор E_0 = [OH'] вокруг точки O под углом 90^0 к вектору I_{B0} = [OC]. Угол между ЭДС E_0 и током I_H есть искомый угол $\psi_H = 56^0$.

7. Построение диаграммы ЭДС (диаграммы Блонделя)

Для построения диаграммы ЭДС нужно определить продольную и поперечную составляющие тока I_H по ортогональным осям d и q (ось d направлена вдоль оси полюсов явно выраженного ротора, а ось q – поперёк):

$$I_d = I_H \cdot \sin \psi_H = 1 \cdot \sin(56^0) = 0{,}829;$$

$$I_q = I_H \cdot \cos \psi_H = 1 \cdot \cos(56^0) = 0{,}559.$$

Составляющие полной ЭДС реакции якоря E_a по продольной и поперечной осям: $E_d = I_d \cdot x_d = 0{,}829 \cdot 0{,}73 = 0{,}605;$

$$E_q = I_q \cdot x_q = 0{,}559 \cdot 0{,}47 = 0{,}263.$$

Силовые линии магнитного поля возбуждения (Φ_B) и МДС обмотки возбуждения (F_B) направлены вдоль оси d. А индуктируемая этим полем ЭДС E_0 отстает от этого поля (и от оси d) на 90^0, следовательно индуктируемая ЭДС E_0 направлена по оси q.

По найденным величинам строим диаграмму ЭДС (рис. 3). При построении учитывать, что вектор E_d опережает на 90^0 вектор тока I_d, а вектор E_q – на 90^0 вектор тока I_q.

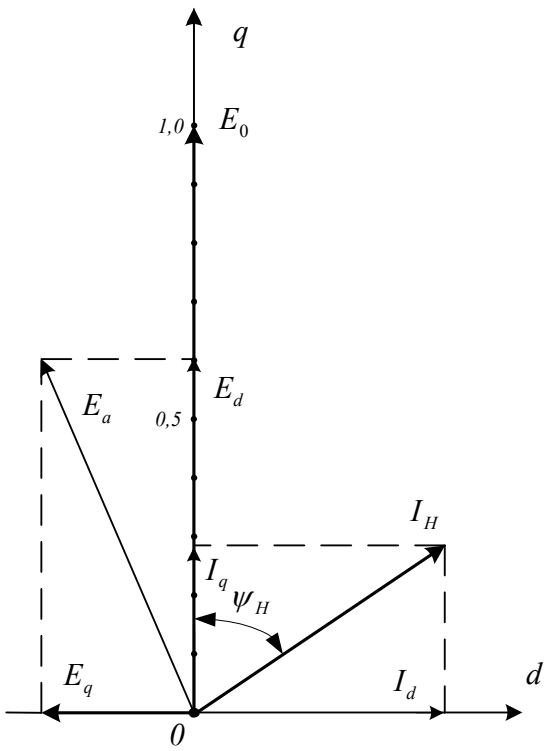

Рис. 3. Диаграмма ЭДС (диаграмма Блонделя) для номинального режима синхронного генератора

8. Построение диаграммы МДС для различных нагрузок

Задаемся различными реактивными токами I_p = 0; 0,5; 0,75; и 1 при постоянной активной составляющей I_a = 0,5. По активной и реактивной составляющим тока определяем полный ток:

$$I_0 = \sqrt{I_a^{\ 2} + I_{p0}^{\ 2}} = \sqrt{0{,}5^2 + 0^2} = 0{,}5;$$

$$I_1 = \sqrt{I_a^{\ 2} + I_{p1}^{\ 2}} = \sqrt{0{,}5^2 + 0{,}5^2} = 0{,}71;$$

$$I_2 = \sqrt{I_a^{\ 2} + I_{p2}^{\ 2}} = \sqrt{0{,}5^2 + 0{,}75^2} = 0{,}91;$$

$$I_3 = \sqrt{I_a^{\ 2} + I_{p3}^{\ 2}} = \sqrt{0{,}5^2 + 1^2} = 1{,}12.$$

Коэффициент мощности и соответствующие углы равны:

$\cos\varphi_0 = \dfrac{I_a}{I_0} = \dfrac{0{,}5}{0{,}5} = 1;$ нагрузка чисто активная $\varphi_0 = 0$;

$\cos\varphi_1 = \dfrac{I_a}{I_1} = \dfrac{0{,}5}{0{,}71} = 0{,}704;$ $\varphi_1 = arcos\ (0{,}704) = 45^0$;

$\cos\varphi_2 = \dfrac{I_a}{I_2} = \dfrac{0{,}5}{0{,}91} = 0{,}55;$ $\varphi_2 = arcos\ (0{,}55) = 57^0$;

$\cos\varphi_3 = \dfrac{I_a}{I_3} = \dfrac{0{,}5}{1{,}12} = 0{,}45;$ $\varphi_3 = arcos\ (0{,}45) = 63^0$.

Зная эти величины, строим диаграмму МДС (рис. 4). Диаграмма строится в о.е. При чисто активной нагрузке (I_a = 0,5) полный ток I_0 совпадает с вектором напряжения $U_{НФ}$ и равен $I_0 = I_a$ = 0,5. Т.к. $I_a = const$, то концы векторов полного тока опираются на прямую, проходящую параллельно оси абсцисс через точку *C*. Под углами φ_1, φ_2, φ_3 проводим прямые для отстающего тока (вектор результирующего тока отстаёт от напряжения). Для опережающего тока произвольно задаёмся двумя значениями углов $\varphi_4 = -30^0$ и $\varphi_5 = -45^0$ и проводим линии. На этих линиях из начала координат до пересечения с прямой, проведенной через точку *C*,

откладываем вектора полных токов I_1, I_2, I_3, I_4, I_5. Значение токов I_4 и I_5 вычисляем по заданным углам:

$$I_4 = \frac{I_a}{\cos(\varphi_4)} = \frac{0,5}{\cos(-30^0)} = 0,57;$$

$$I_5 = \frac{I_a}{\cos(\varphi_5)} = \frac{0,5}{\cos(-45^0)} = 0,71.$$

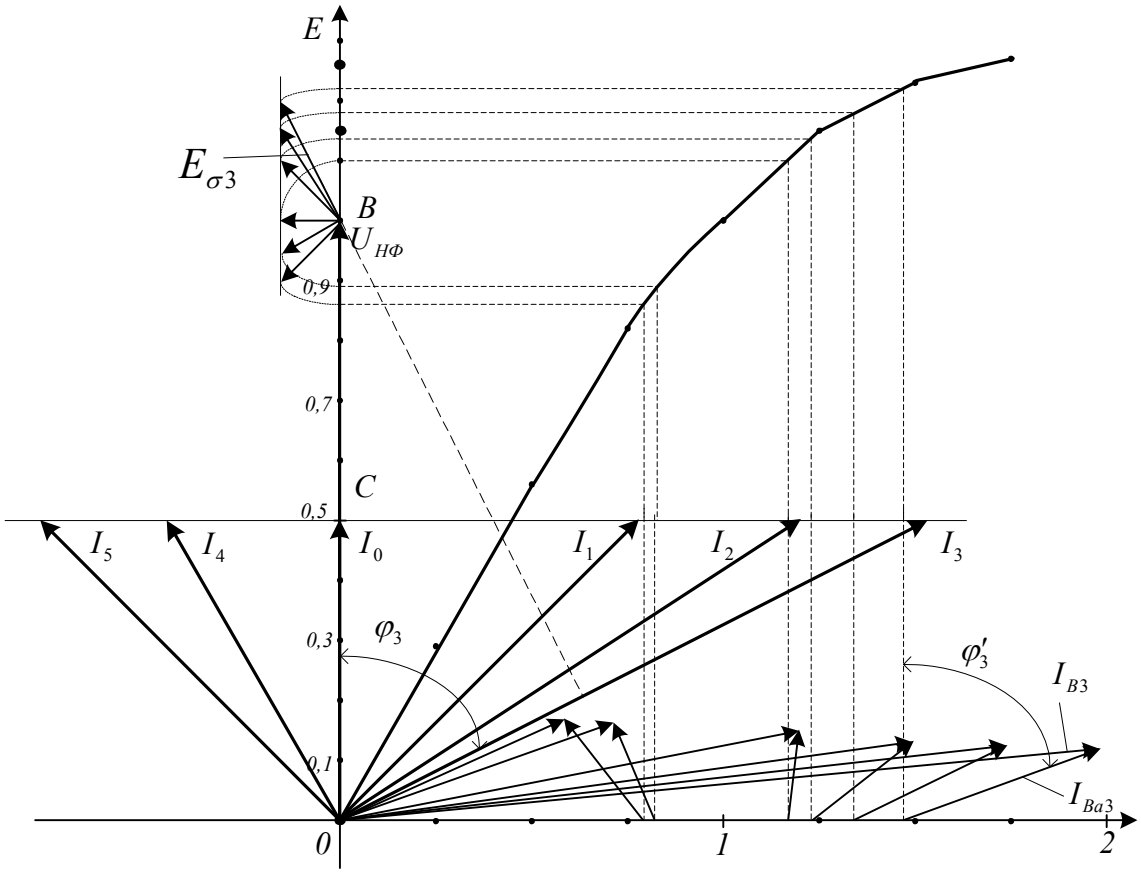

Рис. 4. Диаграмма МДС синхронного генератора для различных нагрузок

Находим значения ЭДС рассеяния для каждого тока нагрузки:

$$E_{\sigma 0} = I_0 \cdot x_{\sigma a} = 0,5 \cdot 0,2 = 0,1;$$

$$E_{\sigma 1} = I_1 \cdot x_{\sigma a} = 0,71 \cdot 0,2 = 0,14;$$

$$E_{\sigma 2} = I_2 \cdot x_{\sigma a} = 0,91 \cdot 0,2 = 0,18;$$

$$E_{\sigma 3} = I_3 \cdot x_{\sigma a} = 1,12 \cdot 0,2 = 0,22;$$

$$E_{\sigma 4} = I_4 \cdot x_{\sigma a} = 0,57 \cdot 0,2 = 0,11;$$

$$E_{\sigma 5} = I_5 \cdot x_{\sigma a} = 0{,}71 \cdot 0{,}2 = 0{,}14.$$

Вектора, соответствующие этим ЭДС, откладываем от конца вектора напряжения $U_{НФ}$ (точки B) под прямым углом к векторам соответствующих полных токов.

Частичные значения МДС реакции якоря в масштабе тока возбуждения находим по формуле $I_{Bai} = I_{Ba} \cdot I_i$, где I_{Ba} = 0,48 получено графически из рис. 1. В результате расчета для различных полных токов частичные значения МДС реакции якоря в масштабе тока возбуждения равны:

$$I_{Ba0} = I_{Ba} \cdot I_0 = 0{,}48 \cdot 0{,}5 = 0{,}24;$$

$$I_{Ba1} = I_{Ba} \cdot I_1 = 0{,}48 \cdot 0{,}71 = 0{,}34;$$

$$I_{Ba2} = I_{Ba} \cdot I_2 = 0{,}48 \cdot 0{,}91 = 0{,}44;$$

$$I_{Ba3} = I_{Ba} \cdot I_3 = 0{,}48 \cdot 1{,}12 = 0{,}54;$$

$$I_{Ba4} = I_{Ba} \cdot I_4 = 0{,}48 \cdot 0{,}57 = 0{,}27;$$

$$I_{Ba5} = I_{Ba} \cdot I_5 = 0{,}48 \cdot 0{,}71 = 0{,}34.$$

Далее, концы векторов $E_{\sigma i}$ поворачиваем вокруг точки B до пересечения с осью ординат. Точки, полученные на оси ординат, сносим на характеристику ХХ и из них опускаем перпендикуляры до пересечения с осью абсцисс. Из этих полученных точек под углом $\varphi' = \varphi + \theta$ откладываем в масштабе тока возбуждения частичные значения МДС реакции якоря. Замыкающий вектор даст необходимый ток возбуждения при определённой нагрузке:

$$\varphi_0' = \varphi_0 + \theta = 0 + 7^0 = 7^0; \qquad I_{B0} = 1{,}2;$$

$$\varphi_1' = \varphi_1 + \theta = 45^0 + 7^0 = 52^0; \quad I_{B1} = 1{,}52;$$

$$\varphi_2' = \varphi_2 + \theta = 57^0 + 7^0 = 64^0; \quad I_{B2} = 1{,}76;$$

$$\varphi_3' = \varphi_3 + \theta = 63^0 + 7^0 = 70^0; \quad I_{B3} = 2;$$

$$\varphi_4' = \varphi_4 + \theta = -30^0 + 7^0 = -23^0; \quad I_{B4} = 0{,}78;$$

$$\varphi_5' = \varphi_5 + \theta = -45^0 + 7^0 = -38^0; \quad I_{B5} = 0{,}64.$$

На диаграмме МДС (рис. 4) углы (φ_3, φ_3') и векторы ($E_{\sigma 3}$, I_{Ba3}, I_{B3}) показаны только для режима № 3.

9. Построение U–образной характеристики генератора при активном токе статора $I_a = 0,5$ и $I_a = 0$

По рассчитанным токам нагрузки (п.8) и соответствующим токам возбуждения, полученным в результате построения (рис. 4), составим таблицу 3 для построения U–образной характеристики при $I_a = 0,5$. Соответствующая характеристика построена на рис. 5.

Таблица 3

Данные для построения U–образной характеристики для $I_a = 0,5$

Порядковый номер режима	5	4	0	1	2	3
I, А	0,71	0,57	0,5	0,71	0,91	1,12
I_B, А	0,64	0,78	1,2	1,52	1,76	2

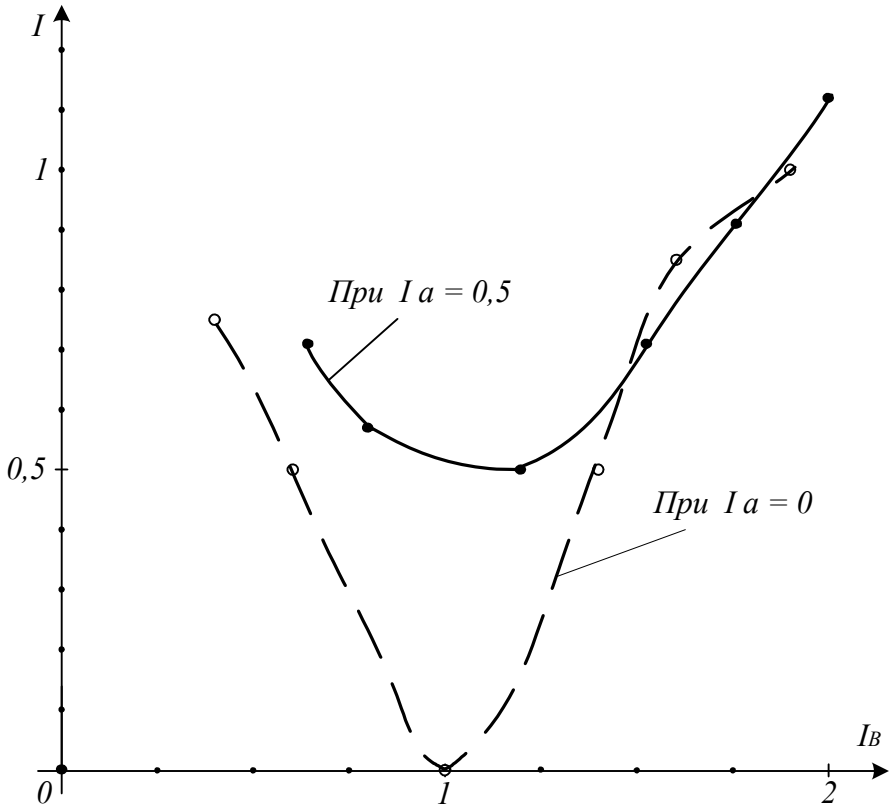

Рис. 5. U–образные характеристики синхронного генератора

Построение U–образной характеристики генератора при $I_a = 0$

Мощность является чисто реактивной ($cos\varphi$ = 0, φ = 90^0) поэтому реактивные токи нагрузки I_p и соответствующие токи возбуждения I_{B0}, I_{B1}, I_{B2}, I_{B3}, I_{B4}, I_{B5} откладываются по оси абсцисс (рис. 6). При отстающем токе нагрузки (I_{B1}, I_{B2}, I_{B3}) соответствующие составляющие ($I_{B\delta}$ и I_{Ba}) складываются, а при опережающем (I_{B4}, I_{B5}) – составляющие $I_{B\delta}$ и I_{Ba} вычитаются. ЭДС рассеяния $E_{\sigma a}$ при отстающем токе откладывается вверх от точки B, а при опережающем – вниз.

Для построения диаграммы МДС при $I_a=0$ реактивные токи для отстающих токов нагрузки примем те же: I_p = 0; 0,5; 0,75, а для опережающих: I_p = 0,5 и 0,75. Так как $I_a = 0$, то полные токи равны реактивным. Находим значения ЭДС рассеяния для каждого тока нагрузки:

$I_0=0$; $E_{\sigma 0} = I_0 \cdot x_{\sigma a} = 0 \cdot 0{,}2 = 0;$

$I_1=0{,}5$; $E_{\sigma 1} = I_1 \cdot x_{\sigma a} = 0{,}5 \cdot 0{,}2 = 0{,}1;$

$I_2=0{,}75$; $E_{\sigma 2} = I_2 \cdot x_{\sigma a} = 0{,}75 \cdot 0{,}2 = 0{,}15;$

$I_3=1$; $E_{\sigma 3} = I_3 \cdot x_{\sigma a} = 1 \cdot 0{,}2 = 0{,}2;$

$I_4=0{,}5$; $E_{\sigma 4} = I_4 \cdot x_{\sigma a} = 0{,}5 \cdot 0{,}2 = 0{,}1;$

$I_5=0{,}75$; $E_{\sigma 5} = I_5 \cdot x_{\sigma a} = 0{,}75 \cdot 0{,}2 = 0{,}15.$

Частичные значения МДС реакции якоря в масштабе тока возбуждения для тех же токов нагрузки равны: $I_{Ba0} = I_{Ba} \cdot I_0 = 0{,}48 \cdot 0 = 0;$

$$I_{Ba1} = I_{Ba} \cdot I_1 = 0{,}48 \cdot 0{,}5 = 0{,}24;$$

$$I_{Ba2} = I_{Ba} \cdot I_2 = 0{,}48 \cdot 0{,}75 = 0{,}36;$$

$$I_{Ba3} = I_{Ba} \cdot I_3 = 0{,}48 \cdot 1 = 0{,}48;$$

$$I_{Ba4} = I_{Ba} \cdot I_4 = 0{,}48 \cdot 0{,}5 = 0{,}24;$$

$$I_{Ba5} = I_{Ba} \cdot I_5 = 0{,}48 \cdot 0{,}75 = 0{,}36.$$

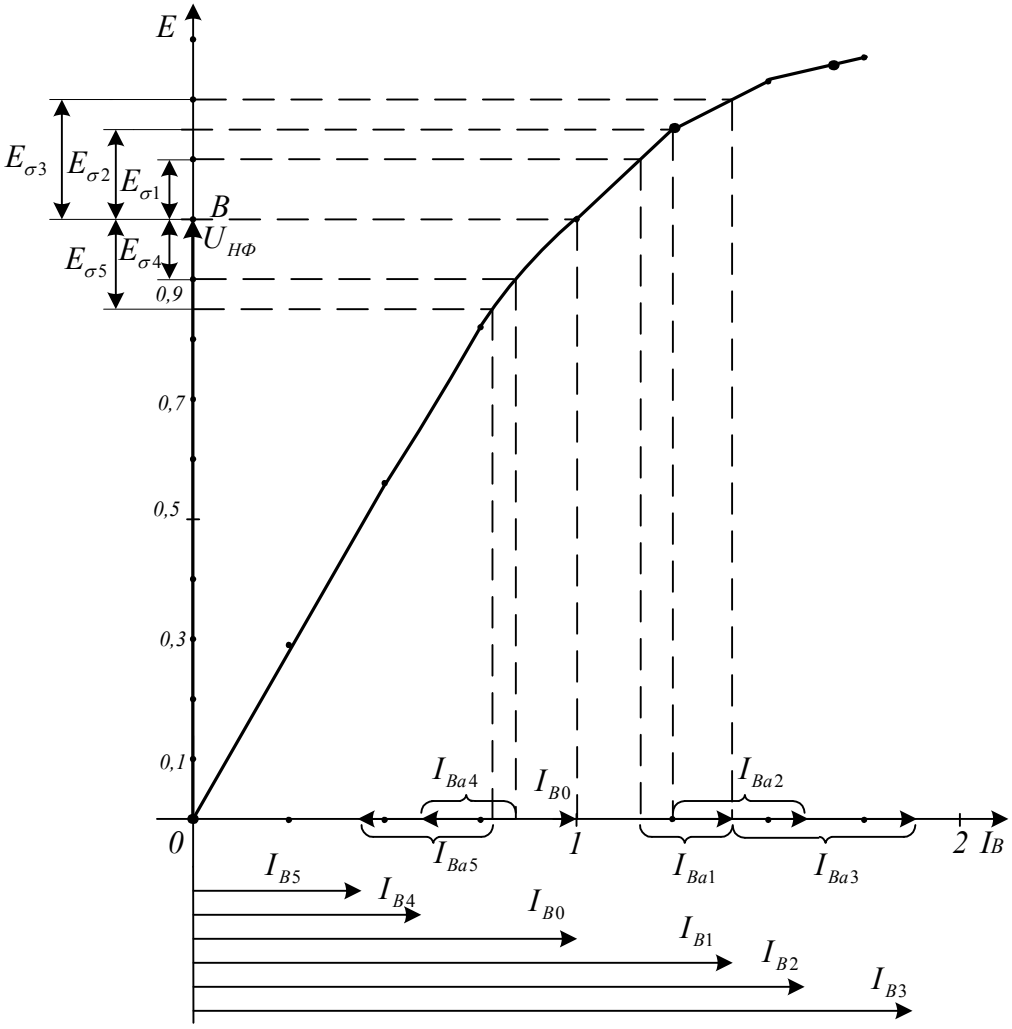

Рис. 6. Диаграмма МДС синхронного генератора при I_a=0

По токам нагрузки и соответствующим токам возбуждения, полученным в результате построения (рис. 6), составим таблицу 4 для построения U–образной характеристики при $I_a=0$. Соответствующая характеристика также построена на рис. 5.

Таблица 4

Данные для построения U–образной характеристики для I_a=0

Порядковый номер режима	5	4	0	1	2	3
I, А	0,75	0,5	0	0,5	0,75	1
I_B, А	0,4	0,6	1,0	1,4	1,6	1,9