

Аннотация

Целью выпускной квалификационной работы является проектировка генератора автомобиля с переменным током повышенной мощности с напряжением на выходе в 14 В, с максимальной отдачей тока более 110 А, для осуществления питания бортовой сети легкового автомобиля.

В выпускной квалификационной работе к рассмотрению представлены следующие вопросы: анализ конструкции, электромагнитный расчет, тепловой расчет, вентиляционный расчет.

В пояснительной записке выпускной квалификационной работы содержится 55 листов, и 6 чертежей формата А1.

Abstract

The title of the graduation project is Designing an Alternating Current Generator with Increased Power.

The graduation project consists of an explanatory note on 55 pages, introduction, including 6 figures, 7 tables, the list of 25 references including 5 foreign sources and the graphic part on 6 A1 sheets.

We start with the statement of the problem and then logically pass over to its possible solutions. The main problem of graduation project is increasing the power characteristics of the generator without reducing his resource capacity. The subject of the graduation project is increasing of generator power due to modernization of the diode bridge circuit and changing some data generator. The graduation project may be divided into several logically connected parts which are electromagnetic calculation, thermal calculation and ventilation calculation of the generator. This study examines the relation between the characteristics of the generator and his power parameters. The issues of variation of winding data of the generator, a small increase in the excitation current level and using of insulating materials of high electric strength are highlighted in the project's general part.

The results of the study showed that application of the Larionov diode bridge with modification had a positive impact on increasing of generator power without reducing his resource capacity.

Содержание

Введение.....	5
1 Электромагнитный расчёт.....	8
2 Тепловой расчет.....	49
3 Вентиляционный расчет.....	51
Список использованных источников.....	53

Введение

На практике, ежегодно возрастает нужда в качественной продукции. Это влечет за собой повышение технического уровня и качества выпускаемой продукции.

В связи с этим перед автомобильной промышленностью ставится ряд серьезных задач, основные из них: уменьшение удельного топливного расхода, повышение технического уровня его электрооборудования и повышение ресурса работы составных узлов автомобиля

Постоянно увеличивается установочная мощность бортового электрооборудования, так же возрастает численность силовых проводов и исполнительных электрических механизмов. Довольно активно бортовые системы насыщаются составными частями электронных компонентов, повышается длина электропроводки; из-за этого в системе электроснабжения автомобиля наблюдается явление повышения номинального напряжения бортовой сети. Это влечет за собой изменения конструкций, использующихся материалов у существующих источников электрической энергии. На сегодняшний день на легковых автомобилях семейства ВАЗ мощность генераторов выросла в два раза по сравнению с предшествующими и первыми моделями. Соответственно, в большей степени растет мощность генераторных установок, устанавливаемых на зарубежных моделях.

На практике, каждые десять лет уровень мощности генераторов возрастает примерно на 30-40%. В связи с этим одно из требований к генераторам – это сохранение габаритных размеров при возрастании мощности, что увеличивает удельную максимальную мощность. Тенденция повышения доли мощности генератора, которая отдается на холостом ходу (XX) двигателя, сохранится во времени. Это может потребовать повышения передаточного отношения электропривода.

Конструктив отечественных генераторов должен быть работоспособным при температуре окружающей среды $+100^{\circ}\text{C}$ и быть устойчивым к значительным нагрузкам в отношении вибрации.

Главная направленность развития технологии изготовления регуляторов напряжения в последние десятилетия – это расширение и усовершенствование использования интегральных регуляторов напряжения, которые встроены в генераторные установки. Этот подход к решению данной проблемы сохранится в ближайшем будущем. Следующий этап – функции регулятора напряжения будут передаваться бортовой ЭВМ.

Из-за повышения мощности генераторных установок при неизменных габаритных размерах будет иметь место тенденция повышения тока возбуждения или повышение напряжения.

Увеличение тока возбуждения приводит к необходимости значительной модернизации регуляторов напряжения для увеличения стойкости к высокому уровню тока, который протекает по электронным элементам регулятора тока. При повышении электрической стойкости изоляции обмотки возбуждения снижается надёжность контактно-щёточного узла. Так же электрические параметры генераторной установки с увеличенным значением тока возбуждения имеют установленные максимальные значения параметров, превышение которых при усовершенствовании генераторной установки недопустимы.

Цель дипломного проекта – это проектирование генератора повышенной мощности. Увеличение мощности предложено выполнить за счёт изменения данных обмотки генератора, небольшого увеличения уровня тока возбуждения, использования изоляционных материалов высокой электрической прочности и модернизация схемы выпрямителя, в которой дополнительное плечо питается от «нулевой» точки «звезды».

1 Электромагнитный расчет генератора

1.1 Расчетные данные

1.1.1 Напряжение, которое выпрямляется на нагрузке, В, определяется формулой:

$$U_d = 14.$$

1.1.2 Частота вращения, об/мин., определяется формулой[1. с.27]:

$$n_0 = 800.$$

1.1.3 Скорость вращения в режиме работы, об/мин., определяется формулой:

$$n_p = 2400.$$

1.1.4 Максимальная скорость вращения, об/мин., определяется формулой:

$$n_m = 6000.$$

1.1.5 Максимальное значение тока при нагрузке, А, определяется формулой:

$$i_{dm} = 110.$$

1.1.6 Нагрузочный ток, А, определяется формулой[2. с.48]:

$$I_{dp} = 55.$$

1.1.7 Выпрямленная мощность, Вт, определяется формулой:

$$P_{dp} = U_d \cdot I_{dp} = 14 \cdot 55 = 770. \quad (1.1)$$

1.1.8 Максимальная мощность на выпрямлении, Вт, определяется формулой:

$$P_{dm} = U_d \cdot I_{dm} = 14 \cdot 110 = 1,54 \cdot 10^3. \quad (1.2)$$

1.1.9 Количество фаз генератора, определяется формулой:

$$m = 3.$$

1.1.10 Схема соединения фаз: «Звезда»[3. с.57].

1.1.11 Напряжение на фазе на холостом ходу ($U_{\phi 0}$), В, определяется формулой:

$$U_{\phi 0} = KU \cdot U_d \cdot B = 0,45 \cdot 14 = 6,3, \quad (1.3)$$

где $KU = 0,45$ – коэффициент выпрямления по напряжению.

1.1.12 Максимальный возбуждающий ток, А, определяется формулой:

$$A: I_{\phi m} = 5 [1].$$

1.1.13 Коэффициент, который учитывает долю возбуждающего тока от полного тока в рабочем режиме, определяется формулой[4. с.25]:

$$KIB = 1 + I_{\phi m} / I_{dp} = 1 + 5 / 55 = 1,0636. \quad (1.4)$$

1.1.14 Полный выпрямленный ток в рабочем режиме, А, определяется формулой:

$$I_{\phi p} = KIB \cdot I_{dp} = 1,0636 \cdot 55 = 58,5. \quad (1.5)$$

1.1.15 Ток на фазе в рабочем режиме, А, определяется формулой:

$$I_{\phi p} = KI \cdot I_{\phi p} = 0,74 \cdot 58,5 = 43,2 \quad (1.6)$$

где $KI = 0,74$ – коэффициент выпрямления по току.

1.1.16 Ток на фазе при максимальной нагрузке, А, определяется формулой:

$$I_{\phi m} = KI \cdot I_{dm} \cdot KIB = 0,74 \cdot 110 \cdot 1,036 \quad (1.7)$$

1.1.17 Коэффициент выпрямления схемы по мощности, определяется формулой[5. с.64]:

$$\eta_v = \frac{U_d I_{\phi p}}{m U_{\phi p} I_{\phi p}} = \frac{14 \cdot 58,5}{3 \cdot 8,4 \cdot 43,2} = 0,75, \quad (1.8)$$

где $U_{\phi p} = 8,4$ – напряжение фазы генератора при рабочем токе нагрузки, В.

1.2 Вычисление главных размеров

1.2.1 Синхронное индуктивное сопротивление генератора по продольной оси, Ом, определяется формулой:

$$X_d = \frac{U_{\phi 0} n_m}{K_I K_{IB} I_{dm} n_0} = \frac{6,3 \cdot 6000}{0,74 \cdot 1,06 \cdot 110 \cdot 800} = 0,54. \quad (1.9)$$

1.2.2 Коэффициент C_1 .

Коэффициент C_1 – функция линейной нагрузки AP , определяется формулой:

$$C_1 = 0,64 \cdot K_{IB} \cdot K_{UB} \cdot P_{dp} / AP \cdot \eta_B \cdot U_{\phi_0} = 0,64 \cdot 1,06 \cdot 0,75 \cdot 770 / 0,858 \cdot 6,3. \quad (1.10)$$

где $K_{UB} = U_{\phi_0} / U_{\phi p} = 6,3 / 8,4 = 0,75$ – коэффициент уменьшения напряжения на фазе при ХХ по сравнению с напряжением на фазе.

Расчетные данные C_1 для различных значений AP сведены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1- Коэффициент C_1

AP, А/м	20000	30000	40000	50000	60000
C_1	0,00265	0,00176	0,00133	0,00106	0,00088

1.2.3 Коэффициент C_2 .

Коэффициент C_2 – функция переменных значений AP и индукции в зазоре на холостом ходу (ХХ) при начальной скорости вращения B_{δ_0} , определяется формулой:

$$C_2 = \frac{15U_{\phi_0}^2 A_p \eta_e}{\alpha_i K_{\phi} K_0 K_{UB} K_{IB} n_0 B_{\delta_0} P_{dp}}, \quad (1.11)$$

где $K_0 = 0,866$ – обмоточный коэффициент по первой гармонике;

$\alpha_i = 0,68$ – коэффициент полюсного перекрытия;

$K_{\phi} = 1,11$ – коэффициент формы поля возбуждения.

Значения C_2 при разных величинах AP и B_{δ_0} сведены в таблицу 2.2

1.2.4 Коэффициент C_3 , определяется формулой[6. с.114]:

$$C_3 = \mu_0 \cdot \pi \cdot n_m \sum \lambda / 15q = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 6000 \cdot 0,75 / 15 \cdot 2,33 = 0,00197 \quad (1.12)$$

где $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная проницаемость воздуха, Гн/м;

$q = 2 \frac{1}{3}$ – количество пазовых отверстий на фазу и полюс;

$\sum \lambda = 0,75$ – суммарный коэффициент магнитной проводимости рассеяния фазы статорной обмотки.

Таблица 1.2- Коэффициент C2

Значение индукции $B_{\delta 0}$, Тл	Значение линейной нагрузки AP , А/м				
	20000	30000	40000	50000	60000
0,4	17,3	25,95	34,6	43,25	51,9
0,6	11,5	17,3	23,07	28,83	34,6
0,8	8,65	12,97	17,3	21,63	25,95
1,0	6,92	10,38	13,84	17,3	20,76
1,2	5,76	8,65	11,53	14,42	17,3

1.2.5 Коэффициент $C4$, определяется формулой:

$$C4 = \mu_0 \cdot m \cdot K_{20} \cdot K_d \cdot n_m / 30 \delta P \cdot K\delta \cdot K\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 3 \cdot 0,8662 \cdot 0,92 \cdot 6000 / 30 \cdot 0,00035 \cdot 1,5 \cdot 1,6 = 0,51, \quad (1.13)$$

где $K\mu = 1,6$ – коэффициент насыщения магнитной цепи генератора;

$\delta P = 0,00035$ – рабочая зона воздушного зазора, м;

$K_d = 0,92$ – коэффициент продольной реакции якоря (РЯ);

$K\delta = 1,5$ – коэффициент воздушного зазора.

1.2.6 Количество витков фазы, следующих друг за другом последовательно.

Количество витков фазы генератора w_ϕ , следуемых друг за другом, можно определить по различным значениям $B_{\delta 0}$ и AP . Значения для коэффициентов $C1$ и $C2$ берутся из таблиц 2.1 и 2.2:

$$w_\phi = \frac{X_d - C_2 C_3}{C_1 C_2 C_4} = \frac{0,54 - 0,00197 \cdot C_2}{0,51 \cdot C_1 C_2}.$$

(1.14)

Результаты вычислений w_ϕ сведены в таблицу 2.3.

Таблица 1.3- Количество витков фазы, следующих друг за другом

Значение индукции $B_{\delta 0}$, Тл	Значение линейной нагрузки AP , А/м				
	20000	30000	40000	50000	60000
0,4	76,08	75,64	74,34	73,89	73,44
0,6	115,19	114,56	113,42	112,88	112,17
0,8	153,62	153,53	153,48	153,37	153,31
1,0	192,39	192,38	192,28	192,22	192,17
1,2	231,43	231,31	231,27	231,24	231,11

1.2.7 Конструктивные показатели

$D_i = C_1 \cdot W_{\phi}$ – диаметральный размер расточки статора;

$\lambda_i = I_i / D_i$ – конструктивный коэффициент;

$l_i = C_2 \cdot W_{2\phi}$ – длина пакета статора.

Результаты вычислений при всевозможных значениях $B_{\delta 0}$ и AP приведены в таблице 1.4.

1.2.8 Выбор рабочих вариантов

Основной критерий для выбора главных размеров – соответствие величины конструктивного коэффициента λ_i рекомендованным значениям: $\lambda_i = 0,3 \dots 0,55$.

При $\lambda_i = 0,35$, $B_{\delta 0} = 0,4$ Тл и $AP = 30000$ А/м имеем (из таблицы 2.4):

количество витков в фазе $W_{\phi} = 70$;

длина пакета статора $l_i = 0,033$ м;

диаметральный размер расточки $D_i = 0,102$ м.

1.2.9 Наружный диаметральный размер ротора, м, определяется формулой [7. с.25]:

$$D_p = D_i - 2\delta = 0,102 - 2 \cdot 0,00035 = 0,1032. \quad (1.15)$$

1.2.10 Диаметральный размер втулки ротора, м, определяется формулой:

$$D_{\text{вт}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_i \cdot D_i \cdot l_i \cdot \sigma_{\text{вт}} \cdot B_{\delta 0}}{B_{\text{вт}}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,68 \cdot 0,1013 \cdot 0,033 \cdot 1,5 \cdot 0,5}{1,6}} = 0,0548, \quad (1.16)$$

где $B_{\text{вт}} = 1,6$ – магнитная индукция во втулке, Тл;

$\sigma_{\text{вт}} = 1,5$ – коэффициент рассеяния втулки;

$\alpha_i = 0,68$ – коэффициент полюсного перекрытия.

1.2.11 Высота сборочного кольца полюсной системы, м, определяется формулой:

$$h_k = \frac{\alpha_i \cdot l_i \cdot B_{\delta 0} \cdot \sigma_k}{C_n \cdot B_k} = \frac{0,68 \cdot 0,033 \cdot 0,5 \cdot 1,275}{1,1 \cdot 1,5} = 0,0121, \quad (1.17)$$

где $\sigma_k = 0,85 \cdot \sigma_{\text{вт}} = 0,85 \cdot 1,5 = 1,275$ – коэффициент рассеяния сборочного кольца; $B_k = 1,5$ Тл – индукция в сборочном кольце.

Таблица 1.4- Конструктивные показатели

Значение линейной нагрузки AP , А/м	Значение индукции $B_{\delta 0}$, Тл	Конструктивные показатели		
		Диаметральный размер расточки D_i , м	Длина пакета l_i , м	Значение коэффициента λ_i
20000	0,4	0.2012	0.0298	0.148
	0,6	0.3051	0.00869	0.028
	0,8	0.4054	0.00369	0.009
	1,0	0.5098	0.00187	0.003
	1,2	0.6132	0.00107	0.001
30000	0,4	0.102	0.033	0.34
	0,6	0.2016	0.01331	0.066
	0,8	0.2702	0.00554	0.021
	1,0	0.3386	0.00281	0.008
	1,2	0.4071	0.00162	0.004

Продолжение таблицы 1.4

40000	0,4	0.0988	0.0626	0.633
	0,6	0.1508	0.01806	0.119
	0,8	0.2041	0.00739	0.036
	1,0	0.2557	0.00375	0.014
	1,2	0.3075	0.00216	0.007
50000	0,4	0.0783	0.07924	1.012
	0,6	0.1196	0.02298	0.192
	0,8	0.1625	0.00924	0.056
	1,0	0.2037	0.00469	0.023
	1,2	0.2451	0.0027	0.011
60000	0,4	0.0646	0.0962	1.489
	0,6	0.0987	0.02758	0.279
	0,8	0.1349	0.01108	0.082
	1,0	0.1691	0.00563	0.033
	1,2	0.2033	0.00324	0.016

1.2.12 Радиальная высота основания полюса, м, определяется формулой:

$$h_p = h_k = 0,0121.$$

1.2.13 Максимально допустимый радиальный размер цилиндрической части окна обмотки возбуждения, м, определяется формулой, [18. с.187]:

$$b_k = (D_p - D_{вт}) / 2 - h_p = (0,102 - 0,0548) / 2 - 0,0121 = 0,0115. \quad (1.18)$$

1.2.14 Значение длины витка обмотки возбуждения, м, определяется формулой [8. с.96]:

$$l_{oc} = \pi \cdot (D_{вт} + b_k) = 3,14 \cdot (0,0548 + 0,0115) = 0,208. \quad (1.19)$$

1.2.15 Угол наклона внутренней поверхности полюса: $\beta = 16^\circ$.

1.2.16 Минимальное значение напряжения, которое необходимо для подпитки обмотки возбуждения, В, определяется формулой:

$$U_{d\min} = K_m U_d - \Delta U_p = 0,9 \cdot 14 - 1,5 = 11,1, \quad (1.20)$$

где $K_m = 0,9$ - коэффициент снижения напряжения на выходе генератора;
 $\Delta U_p = 1,5$ В - падение напряжения транзисторных регуляторов.

1.2.17 Максимально значение сопротивления для обмоток возбуждения в горячем состоянии, Ом, определяется формулой[9. с.127]:

$$R_{\text{вт}} = U_{d\min} / I_{\text{вт}} = 11,1 / 3,5 = 3,17. \quad (1.21)$$

1.2.18 Значение сопротивления обмотки возбуждения в холодном состоянии, Ом, определяется формулой:

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{вт}} / (1 + 0,004\nu) = 3,17 / (1 + 0,004 \cdot 75^\circ) = 2,43, \quad (1.22)$$

где $\nu = 75^\circ\text{C}$ – превышение температуры обмотки возбуждения над температурой окружающего воздуха.

1.2.19 Сечение меди обмотки возбуждения, м^2 , определяется формулой:

$$q_{\text{об}} = I_{\text{вт}} / j_B = 3,5 / 7 \cdot 10^6 = 5 \cdot 10^{-7}, \quad (1.23)$$

где $j_B = 7 \cdot 10^6$ – плотность тока в обмотке возбуждения, $\text{А}/\text{м}^2$.

Принимаем $q_{\text{об}} = 5,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$ [3].

1.2.20 Количество витков обмотки возбуждения, определяется формулой:

$$W_B = R_{\text{вх}} q_{\text{об}} / \rho \cdot l_{\text{оц}} = 2,43 \cdot 5,2 \cdot 10^{-7} / 1,75 \cdot 10^{-8} \cdot 0,208 = 347,1, \quad (1.24)$$

где $\rho = 1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ – удельное сопротивление провода, при $\nu = 20^\circ\text{C}$ для меди.

Принимаем $W_B = 347$ витков.

1.2.21 Площадь межполюсного окна, которая необходима для расположения обмотки возбуждения, м^2 , определяется формулой[10. с.102]:

$$S_{\text{об}} = q_{\text{об}} W_B / k_{32} = 5,2 \cdot 10^{-7} \cdot 347 / 0,6 = 3,007 \cdot 10^{-4}, \quad (1.25)$$

где $k_{32} = 0,6$ – коэффициент заполнения площади окна медью обмотки возбуждения.

1.2.22 Длина втулки ротора, м, определяется формулой:

$$l_{вт} = S_{об} / b_k = 3,007 \cdot 10^{-4} / 0,0115 = 0,036. \quad (1.26)$$

1.2.23 Масса провода обмотки возбуждения, кг, определяется формулой:

$$MB = \gamma_B \cdot q_{об} \cdot l_{оц} \cdot W_B = 8,9 \cdot 103 \cdot 5,2 \cdot 10^{-7} \cdot 0,208 \cdot 347 = 0,334, \quad (1.27)$$

где $\gamma_B = 8,9 \cdot 103$ – удельная масса материала провода обмотки возбуждения, кг/м³.

1.2.24 Масса провода статорной обмотки, кг, определяется формулой[11. с.156]:

$$M_{1M} = m \cdot W_{\phi} \cdot q_{я} \cdot 110 \cdot \gamma_{я} = 3 \cdot 70 \cdot 2,0 \cdot 10^{-6} \cdot 0,10403 \cdot 8,9 \cdot 103 = 0,388, \quad (1.28)$$

где $q_{я} = KIB \cdot (I_{зм} - I_{ВМ}) / j_{я}$ – сечение эффективного проводника якорной обмотки, мм² ;

$I_{ГМ} = KIB \cdot I_{dm}$ – максимальное значение тока в генераторе, А;

$j_{я} = 30 \cdot 106$ – значение плотности тока в статорной обмотке, А/м²;

$110 = 2(l_i + 0,25\pi(b_z + t))$ – среднее значение длины витка секции обмотки якоря, м;

$b_z = B_{\delta 0} \cdot t / B_z$ – значение ширины статорного зубца, мм;

$t = \pi \cdot D_i / z$ – зубцовое деление статора, мм;

$z = 2prtq$ – количество статорных зубцов;

$B_z = 1,5$ – индукция в статорном зубце при начальной скорости вращения,

Тл;

$K_c = 0,95$ – коэффициент заполнения пакета сталью;

$V_{я} = 8,9 \cdot 103$ – удельная масса материала провода, кг/м³.

$$q_{я} = 1,0671 \cdot (117,3 - 3,5) / 30 \cdot 106 = 2,004 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2,$$

$$I_{зм} = 1,0671 \cdot 110 = 117,3 \text{ А},$$

$$110 = 2(0,033 + 0,25 \cdot \pi \cdot (0,00656 + 0,0187)) = 0,10403 \text{ м},$$

$$b_z = 0,5 \cdot 0,0177 / 1,5 \cdot 0,95 = 0,00656 \text{ м},$$

$$t = \pi \cdot 0,120 / 18 = 0,0187\text{м},$$

$$z = 2 \cdot 6 \cdot 3 \cdot 2,33 = 42.$$

Принимаем $q_n = 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ [3].

1.2.25 Объем активной части статора, м^3 , определяется формулой[12. с.204]:

$$V_1 = [(0,25\pi(D_{н2} - D_{z2}) + z_{h_z}z_{b_z})] = [0,25\pi(1,1462 - 0,1212) + 18 \cdot 0,0095 \cdot 0,00656] \cdot 0,033 = 2,09 \cdot 10^{-4}, \quad (1.29)$$

где $D_{н} = 1,33D_i = 0,146$ – значение наружного диаметального размера статора, м;

$D_z = D_i + 2h_z = 0,121$ – диаметр по дну статорных пазов, м;

$h_z = 0,0095$ – высота статорного зубца.

1.2.26 Объем активной части индуктора, м^3 , определяется формулой:

$$V_2 = 0,25\pi D_{p2}(1_{вг} + 2h_k) = 0,25 \cdot \pi \cdot 0,10132 \cdot (0,036 + 2 \cdot 0,0121) = 4,84 \cdot 10^{-4}. \quad (1.30)$$

1.2.27 Суммарный активный объем, занимаемый статором и индуктором, м^3 , определяется формулой:

$$V_{\Sigma} = V_1 + V_2 = 2,09 \cdot 10^{-4} + 4,84 \cdot 10^{-4} = 6,93 \cdot 10^{-4}. \quad (1.31)$$

1.2.28 Суммарная масса активных частей, кг, определяется формулой:

$$M_{\Sigma} = K_c \cdot \gamma_{ст} \cdot V_{\Sigma} = 0,95 \cdot 78 \cdot 103 \cdot 6,93 \cdot 10^{-4} = 4,135. \quad (1.32)$$

1.3 Расчет обмотки статора

1.3.1 Частота ЭДС в режиме начала отдачи тока, Гц, определяется формулой:

$$f_0 = p_{n0} / 60 = 6 \cdot 800 / 60 = 80. \quad (1.33)$$

1.3.2 Поток в рабочем зазоре на ХХ, Вб, определяется формулой[13. с.45]:

$$\Phi_{\delta 0} = \alpha_i \cdot \tau \cdot l_i \cdot B_{\delta 0} = 0,68 \cdot 0,027 \cdot 0,033 \cdot 0,5 = 3,03 \cdot 10^{-4}, \quad (1.34)$$

где $\tau = \pi D_i / 2p = 0,027$ – полюсное деление, м.

1.3.2 Обмоточный коэффициент по основной гармонике $K_0 = 0,866$.

Шаг обмотки $y = z / (2p) = 42 / 6 = 7$. Принимаем $y = 7$.

Количество витков фазы обмотки статора, следующих друг за другом последовательно, определяется формулой:

$$W_{\phi} = U_{\phi 0} / 4K_0 K_{\phi} f_0 \Phi_{\delta 0} = 6,3 / 4 \cdot 4 \cdot 0,866 \cdot 1,11 \cdot 80 \cdot 3,03 \cdot 10^{-4} = 69,82, \quad (1.35)$$

где $K_{\phi} = 1,11$ – коэффициент формы поля возбуждения[21].

Принимаем $W_{\phi} = 70$ витков.

1.3.5 Количество проводников в пазовом отверстии статора, определяется формулой:

$$U_n = 2 \cdot W_{\phi} \cdot m \cdot a / z = 2 \cdot 70 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 42 = 10, \quad (1.36)$$

где $a = 1$ – количество параллельных ветвей обмотки.

1.3.6 Площадь поперечного сечения эффективного проводника обмотки, m^2 , определяется формулой:

$$q_a = I_{\text{фм}} / (\alpha \cdot j_a) = 86,28 / (1 \cdot 30 \cdot 106) = 2,87 \cdot 10^{-6}, \quad (1.37)$$

где $j_a = 30 \cdot 106$ – плотность тока в статорной обмотке, A/m^2 .

1.3.7 Диаметр голого провода статорной обмотки, м, определяется формулой [3],:

$$d_a = 2(\sqrt{q_a / \pi}) = 1,06 \cdot 10^{-3}. \quad (1.38)$$

1.3.8 Диаметральный размер изолированного провода статорной обмотки, м, определяется формулой [3]:

$$d_{\text{а.и.}} = d_a + 2 \cdot \Delta_{\text{из}} = 1,06 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 4,25 \cdot 10^{-5} = 1,12 \cdot 10^{-3}, \quad (1.39)$$

где $\Delta_{\text{из}} = 4,25 \cdot 10^{-5}$ – односторонняя изоляция, м.

1.3.9 Потребная площадь статорного паза, m^2 , определяется формулой:

$$S_{\text{II}} = U_{\text{II}} \cdot q \alpha / K_{\text{зп}} = 10 \cdot 2,87 \cdot 10^{-6} / 0,4 = 62 \cdot 10^{-4}, \quad (1.40)$$

где $K_{\text{зп}} = 0,4$ – коэффициент заполнения паза медью обмотки.

1.3.10 Значение ширины статорного зубца, м, определяется формулой:

$$b_z = B_{\delta 0} t_z / (K_c B_{z0}) = 0,5 \cdot 0,027 / 0,95 \cdot 1,6 = 0,008, \quad (1.41)$$

где $t_z = \pi D_i / (2p) = \pi \cdot 0,102 / (2 \cdot 6) = 0,027$ – зубцовое деление, м, определяется формулой;

$B_{z0} = 1,6$ – индукция в статорных зубцах при начальной скорости вращения $n0$, Тл;

$K_c = 0,95$ – коэффициент заполнения пакета сталью.

Статор собираем из листов электротехнической стали марки 1311.

1.3.11 Размеры открытого паза. Значение ширины паза на статорной поверхности, м, определяется формулой:

$$b_{uz} = t_z / b_z = 0,027 - 0,0088 = 0,0182. \quad (1.42)$$

Значение ширины статорной катушки в изоляции, м, определяется формулой:

$$b_{к.из} = 0,5b_{uz} - \Delta_{из.п} = 0,5 \cdot 0,0182 - 0,0003 = 0,0088, \quad (1.43)$$

где $\Delta_{из.п} = 0,0003$ – толщина изоляции паза, м.

Значение ширины статорной катушки по меди, м, определяется формулой:

$$b_{к.м} = b_{к.из} - 2\Delta_{из.к} = 0,0088 - 2 \cdot 0,0005 = 0,0078, \quad (1.44)$$

где $\Delta_{из.к} = 0,0005$ – толщина изоляции катушки, включая изоляцию провода, м.

Количество рядов провода в катушке, определяется формулой:

$$n_k = b_{к.м} / d_{а.из} = 0,0078 / 1,12 \cdot 10^{-3} = 0,782. \quad (1.45)$$

Принимаем $n_k = 1$.

Количество витков в статорной катушке, определяется формулой:

$$W_k = mW_\phi = 3 \cdot 70 / 42 = 5 \quad (1.46)$$

Принимаем $W_k = 5$.

Количество проводников катушки в одном ряду, определяется формулой:

$$n_{pk} = W_k / n_k = 5 / 1 = 5. \quad (1.47)$$

Принимаем $n_{pk} = 5$.

Высота катушки, м:

$$h_{KT} = n_{P.Kd} a_{из} + 2 \Delta_{из.к} = 5 \cdot 1,12 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,0005 = 6,39 \cdot 10^{-3}. \quad (1.48)$$

Высота паза, м:

$$h_{II} \approx h_z = h_{KT} \cdot 2 \Delta_{из.п} + h_{кл} + h_{ш} = 6,39 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,0003 + 0,002 + 0,001 = 9,99 \cdot 10^{-3}. \quad (1.49)$$

Значение ширины паза, м:

$$b_{п2} = \pi(D_i + 2h_{п1})/z - bZ = (3,14 \cdot 0,102 + 2 \cdot 0,0099)/42 - 0,0088 = 0,0213. \quad (1.50)$$

1.3.12 Уточненный коэффициент заполнения паза, определяется формулой, определяется формулой:

$$K_{зп} = U_{п} \cdot q_A / S_{пр} = 45 \cdot 1,44 \cdot 10^{-6} / 0,197 \cdot 10^{-3}, \quad (1.51)$$

где $S_{пр} = 0,5(b_{п1} + b_{п2})h_{п} = 0,19710^{-3} \text{ м}^2$.

$$K_{зп} = 0,328.$$

1.3.13 Среднее значение длины лобовой части секции статора для обмотки с мягкими секциями и $q = 2,33$, м, определяется формулой:

$$l_{АЛ} = 2b_z + b_{к.из} + 0,01 = 2 \cdot 0,0088 + \pi \cdot 0,0088 + 0,01 = 0,05523 \quad (1.52)$$

1.3.14 Среднее значение длины витка секции статорной обмотки, м, определяется формулой[14. с.143]:

$$l_{А.СР} = 2(l_{АЛ} + l_1) = 2(0,0552 + 0,033) = 0,1764. \quad (1.53)$$

1.3.15 Вылет лобовой части секции статорной обмотки, м, определяется формулой:

$$l_{ВЛ} = K_2 \tau_y = 0,5 \cdot 0,0275 = 0,0137, \quad (1.54)$$

где $\tau_y = (\pi \cdot D_i + h_{п1}) / (2p) = 0,0275 \text{ м}$;

$K_2 = 0,5$ – для неизолированных лобовых частей.

1.4 Определение проводимостей рассеяния ротора

Исходя из схемы замещения магнитной цепи, общий поток рассеяния индуктора разделяют на некоторые составляющие. Тип конфигурации магнитной цепи и ее размеры определяют величины этих.

1.4.1 Магнитная проводимость межполюсного рассеяния, Гн, определяется формулой[15. с.127]:

$$G_{\sigma p} = \mu_0 D_p \lambda_{\sigma p} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,1013 \cdot 0,7 = 2,753 \cdot 10^{-7} = 2,753 \cdot 10^{-7}, \quad (1.55)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная проводимость воздуха, Гн/м;

$\lambda_{оп} = 0,7$ – коэффициент удельной магнитной проводимости междуполюсного рассеяния (находим по рис.4 [2] при $\alpha_i = 0,7$ и $\lambda_p = 0,45$, здесь $\lambda_p = l_p/D_p = 0,0169/0,1013 = 0,167$ – относительная длина полюса;

$l_p = 0,5 l_{вт} / \cos \beta = 0,5 \cdot 0,036 / \cos 16^\circ = 0,0169$ – находим по эскизу магнитной системы генератора на рисунке 1.1.

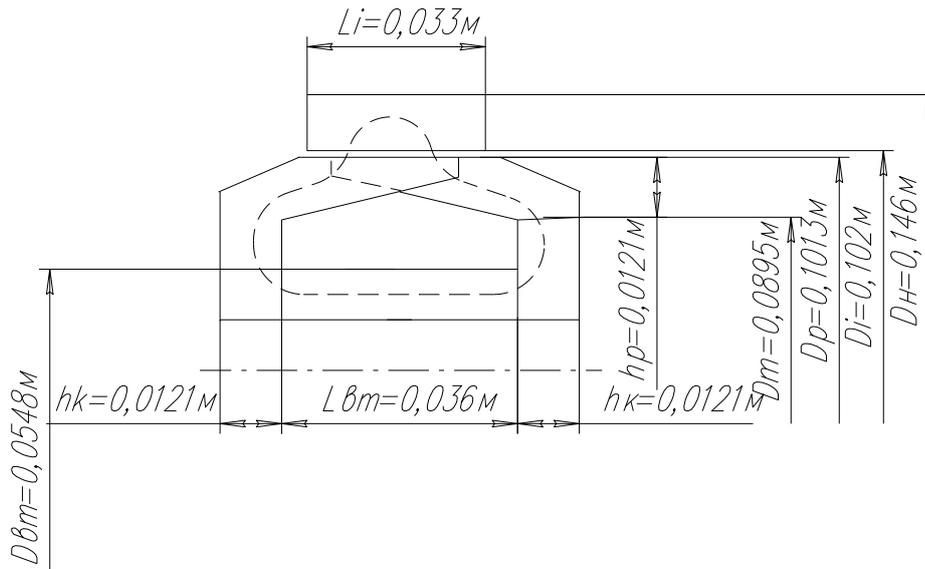


Рисунок 1.1- Эскиз магнитной цепи генератора

1.4.2 Магнитная проводимость поля рассеяния поперек статорных листов, G_n , определяется формулой:

$$G_{сн} = \mu_0 D_p \lambda_{сн} = 4 \cdot 10^{-7} \cdot 0,1013 \cdot 1,142 = 1,454 \cdot 10^{-7}, \quad (1.56)$$

где

$$\lambda_{сн} = \frac{1}{p} \left(Q_0(W_0; \alpha_m) - \frac{2\beta_1}{\pi + 2\beta_1} Q_0(W_S; \alpha_m) - \frac{\pi}{\pi + 2\beta_1} Q_0(W_m; \alpha_m) \right) = ;$$

$$= \frac{1}{6} \left(10 - \frac{2 \cdot 16^\circ}{\pi + 2 \cdot 16^\circ} 3,7 - \frac{\pi}{\pi + 2 \cdot 16^\circ} 2,9 \right) = 1,142$$

$$W_0 = \pi (2 - \alpha_m) / 4p\delta_D = \pi(2 - 1,1) / 4 \cdot 6 \cdot 0,00345 = 34,098;$$

$$W_S = W_0 / (\pi \lambda_p / 2 \delta_D - 1) = 34,098 / (\pi 0,167 / 2 \cdot 0,00345 - 1) = 0,455;$$

$$W_m = \frac{W_0}{\frac{(\pi + 2\beta_1)\lambda_{ny}}{2\delta_D \cos \beta_1} + \frac{\pi\lambda_p}{2\delta_D} + 1} =$$

$$= \frac{34,098}{\frac{\pi + 2 \cdot 16^\circ}{2 \cdot 0,00345 \cdot \cos 16^\circ} \cdot 0,0597 + \frac{\pi \cdot 0,167}{2 \cdot 0,00345} + 1} = 0,266$$

$\alpha_m = b_{pmax} / \tau = 0,029 / 0,027 = 1,1$ – максимальное значение коэффициента полюсного перекрытия;

$b_{pmax} = 0,029$ – максимальное значение ширины полюса, м;

$\delta_D = \delta D_p = 0,00035 / 0,1013 = 0,00345$ – значение относительной величины рабочего зазора;

$\lambda_{ny} = l_{пц} / D_p = 0,006 / 0,1013 = 0,0597$ – значение относительной длины скоса

затылка полюса, м;

$l_{пц} = 0,5 \cdot h_k = 0,5 \cdot 0,0121 = 0,006$ – значение длины скоса затылка полюса, м;

$\beta_1 = 16^\circ$ – значение угла скоса затылка полюса;

Необходимые функции $Q_0(W; \alpha_m)$ определяем исходя из рис.6 [2]:

$$Q_0(W_0; \alpha_m) = 10 ; Q_0(W_s; \alpha_m) = 3,7 ; Q_0(W_m; \alpha_m) = 2,9 .$$

1.4.3 Магнитная проводимость внешнего рассеяния ротора вокруг машины по воздуху, Гн, определяется формулой:

$$G_{овн} = \mu_0 D_p \lambda_{овн} / p = 4 \cdot 10^{-7} \cdot 0,1013 \cdot 1,049 / 6 = 2,225 \cdot 10^{-8} , \quad (1.57)$$

где $\lambda_{овн} = \frac{\ln \left(\frac{2}{\lambda_u} \right)}{2 \left(-\lambda_u / \pi \right)} = \frac{\ln \left(2 / 0,561 \right)}{2 \left(-0,561 / \pi \right)} = 1,049$ – коэффициент удельной

магнитной проводимости внешнего рассеяния;

$\lambda_u = l_{и} / D_p = 0,036 / 0,1013 = 0,561$ – значение относительной длины индуктора, м;

$l_{и} = l_{вТ} + 2h_k = 0,036 + 2 \cdot 0,0121 = 0,057$ – значение длины индуктора, м.

1.4.4 Магнитная проводимость рассеяния катушки возбуждения, Гн, определяется формулой:

$$G_{\sigma k} = \mu_0 D_P \lambda_{\sigma k} / p = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,1013 \cdot 4,423 / 6 = 9,385 \cdot 10^{-8},$$

(1.58)

где $\lambda_{\sigma k} = \pi(2D_{K2} - D_K D_{BT} - D_{BT2}) / (D_P l_{BT}) =$ — коэффициент
 $\pi(2 \cdot 0,0772 - 0,077 \cdot 0,0548 - 0,05482) / (0,1013 \cdot 0,036) = 4,42$

удельной магнитной проводимости катушки;

$D_K = D_{BT} + 2 \cdot b = 0,0548 + 2 \cdot 0,0115 = 0,077$ — диаметральный размер катушки,
 м;

$b = S_{OB} / l_{BT} = 4,155 \cdot 10^{-4} / 0,036 = 0,0115$ — высота катушки, м.

1.4.5 Магнитная проводимость аксиального рассеяния, G_n , определяется формулой:

$$\lambda_{\sigma a} = \pi(D_m - D_K) / 4D_P l_{BT} = 0, \text{ т.к. } D_m = D_K, G_{\sigma a} = \mu_0 D_P \lambda_{\sigma a} / p = 0. \quad (1.59)$$

1.5 Расчет характеристики ХХ

Расчеты производятся на пару полюсов при изменении ЭДС фазы в в некоторых границах (0,25...1,25) $U_{\phi 0}$ и скорости вращения n , которая близка к начальной, так как значение максимальной загрузки магнитной цепи соответствует n_0 об/мин. Скорость вращения принимаем: $n = 1200$ об/мин.

1.5.1 Значение магнитного потока в воздушном зазоре, Вб, определяется формулой

$$\Phi_{\delta} = 60U_{\phi 0} / (4,44p / (W_{\phi})) = 60 \cdot 6,3 / (4,44 \cdot 6 \cdot 1200 \cdot 0,866 \cdot 70) = 2,6 \cdot 10^{-4}. \quad (1.60)$$

1.5.2 Площадь воздушного зазора, m^2 , определяется формулой[16. с.98]:

$$S_{\delta} = 0,5l_i (b_{pmax} + b_{pmin}) = 0,5 \cdot 0,509(0,029 + 0,007) = 5,94 \cdot 10^{-4}, \quad (1.61)$$

где $b_{pmin} = 0,007$ — минимальное значение ширины полюса, м.

1.5.3 Индукция в воздушном зазоре, Тл, определяется формулой:

$$B_{\delta} = \Phi_{\delta} / S_{\delta} = 2,6 \cdot 10^{-4} / 5,94 \cdot 10^{-4} = 0,4377. \quad (1.62)$$

1.5.4 Магнитное напряжение воздушного зазора, А, определяется формулой:

$$F_{\delta} = 1,6K_{\delta} B_{\delta} \cdot 106 = 1,6 \cdot 0,00035 \cdot 1,616 \cdot 0,4377 \cdot 106 = 396,07, \quad (1.63)$$

$$K_{\delta} = \frac{t_z + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_z}{b_{\text{ш}}}}{t_z - b_{\text{ш}} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_z}{b_{\text{ш}}}} = \frac{0,027 + \frac{5 \cdot 0,00035 \cdot 0,027}{0,0182}}{0,027 - 0,0182 + \frac{5 \cdot 0,00035 \cdot 0,027}{0,0182}} = 1,616$$

где

коэффициент воздушного зазора.

1.5.5 Индукция в статорном зубце, Тл, определяется формулой[16. с.53]:

$$B_z = B_{\delta} t_z / K_{\text{с}} b_z = 0,4377 \cdot 0,027 / 0,95 \cdot 0,0088 = 1,413 . \quad (1.64)$$

1.5.6 Магнитное напряжение статорных зубцов, А, определяется формулой:

$$F_z = 2h_z H_z = 2 \cdot 0,0095 \cdot 690 = 13,11 , \quad (1.65)$$

где $H_z = 690$ – удельное магнитное напряжение статорных зубцов, А/м (находим по таблице П-11 [3]).

1.5.7 Индукция в статорном ярме, Тл, определяется формулой:

$$B_j = \Phi_{\delta} / (2S_j) = 0,00026 / 2 \cdot 3,8 \cdot 10^{-4} = 0,342 , \quad (1.66)$$

где $S_j = [0,5(D_H - D_i) - h_z] l_i K_{\text{с}} = [0,5 \cdot (0,146 - 0,102) - 0,0095] \cdot 0,033 \cdot 0,95 = 3,8 \cdot 10^{-4}$ – площадь поперечного сечения ярма, м².

1.5.8 Магнитное напряжение статорного ярма, А, определяется формулой:

$$F_j = l_j H_j = 0,035 \cdot 450 = 15,75 , \quad (1.67)$$

где $H_j = 450$ – удельное магнитное напряжение статорного ярма, А/м (находим по таблице П-11 [3]);

$$l_j = \pi(D_H - h_j) / 2p = (0,146 - 0,012) / 2 \cdot 6 = 0,035 \text{ м};$$

$$h_j = 0,5(D_H - D_i) - h_z = 0,5(0,146 - 0,102) - 0,0095 = 0,012 \text{ – высота ярма, м.}$$

1.5.9 Поток рассеяния наконечников полюса, Вб, определяется формулой:

$$\Phi_{\sigma p} = U_{11} G_{\sigma p} = 424,92 \cdot 0,89 \cdot 10^{-7} = 372,01 \cdot 10^{-7} , \quad (1.68)$$

где $U_{11} = F_{\delta} + F_z + F_j = 396,07 + 13,1 + 15,75 = 424,92$ – магнитное напряжение на статоре, А.

1.5.10 Поток в сечении полюса, Вб, определяется формулой[17. с.86]:

$$\Phi_p = \Phi_{\delta} + \Phi_{\sigma p} = 0,00026 + 0,000037 = 0,000297 . \quad (1.69)$$

1.5.11 Индукция в сечении полюса, Тл, определяется формулой:

$$B_p = \Phi_p / S_p = 0,000297 / 0,00035 = 0,84857, \quad (1.70)$$

где $S_p = 0,5(D_p - D_m) b_{p\max} = 0,5(0,1013 - 0,077) \cdot 0,029 = 0,00035 \text{ м}^2$.

1.5.12 Магнитное напряжение полюса, А, определяется формулой:

$$F_p = 2l_p H_p = 2 \cdot 0,017 \cdot 820 = 27,88, \quad (1.71)$$

где $l_p = 0,5l_{BT} / \cos \beta = 0,5 \cdot 0,036 / \cos 16^\circ = 0,017$ – среднее значение длины магнитной силовой линии в полюсе, м;

$H_p = 820$ – удельное магнитное напряжение полюса, А/м (находим исходя из таблицы для стали 10 [4]).

1.5.13 Поток рассеяния изгиба наконечника полюса, Вб, определяется формулой:

$$\Phi_{\sigma\gamma} = U_{22} G_{\sigma\gamma} = 445,87 \cdot 1,454 \cdot 10^{-7} = 445 \cdot 10^{-7}, \quad (1.72)$$

где $U_{22} = U_{11} + F_p = 417,99 + 27,88 = 445,87$ – магнитное напряжение рассеивающей поверхности, А.

1.5.14 Поток изгиба наконечника полюса, Вб, определяется формулой:

$$\Phi_{\text{изг.р}} = \Phi_p + \Phi_{\sigma\gamma} = 0,000297 + 0,0000445 = 0,000341. \quad (1.73)$$

1.5.15 Индукция в сечении изгиба наконечника полюса, Тл, определяется формулой:

$$B_{\text{изг.р}} = \Phi_{\text{изг.р}} / S_{\text{изг.р}} = 3,41 \cdot 10^{-4} / 5,042 \cdot 10^{-4} = 0,676, \quad (1.74)$$

где

$$S_{\text{изг.р}} = b_{p\max} \sqrt{\left(\frac{D_p - D_m}{2}\right)^2 + h_K^2} = 0,029 \sqrt{\left(\frac{0,1013 - 0,077}{2}\right)^2 + 0,0121^2} = 5,042 \cdot 10^{-4} -$$

площадь сечения, м².

1.5.16 Магнитное напряжение изгиба наконечника полюса, А, определяется формулой:

$$F_{\text{изг.р}} = 2l_{\text{изг.р}} H_{\text{изг.р}} = 2 \cdot 0,009533 \cdot 660 = 12,58, \quad (1.75)$$

где $l_{\text{изг.р}} = \pi \cdot h_K / 4 = \pi \cdot 0,0121 / 4 = 0,009533$ – средняя длина магнитной силовой линии на участке изгиба наконечника полюса, м;

$H_{\text{изг.р}} = 660$ – удельное магнитное напряжение поля на участке изгиба наконечника плюса, А/м (находим по таблице для стали 10 [4]).

1.5.17 Поток внешнего рассеяния, Вб, определяется формулой:

$$\Phi_{\text{овн}} = U_{33} G_{\text{овн}} = 458,45 \cdot 2,225 \cdot 10^{-8} = 1,02 \cdot 10^{-5}, \quad (1.76)$$

где $U_{33} = U_{22} + F_{\text{изг.р}} = 445,87 + 12,58 = 458,45$ – магнитное напряжение рассеивающей поверхности, А.

1.5.18 Поток сборочного кольца, Вб, определяется формулой:

$$\Phi_{\text{к}} = \Phi_{\text{изг.р}} + \Phi_{\text{овн}} = 0,000341 + 0,0000102 = 0,000351. \quad (1.77)$$

1.5.19 Индукция сборочного кольца, Тл, определяется формулой:

$$B_K = \Phi_K / S_K = 0,000351 / 0,0003483 = 1,008, \quad (1.78)$$

где $S_K = \pi \cdot D_{BT} \cdot h_K / p = 0,0548 \cdot 0,0121 / 6 = 0,0003483$ – сечение сборочного кольца, м², определяется формулой.

1.5.20 Магнитное напряжение сборочного кольца, А, определяется формулой:

$$F_K = 2l_K H_K = 2 \cdot 0,011 \cdot 995 = 21,89, \quad (1.79)$$

где $l_K = 0,5(D_m - D_{BT}) = 0,5 \cdot (0,077 - 0,0548) = 0,011$ – среднее значение длины магнитной силовой линии в кольце, м;

$H_K = 695$ – удельное магнитное напряжение в сборочном кольце А (находим по таблице для стали 10 [4]).

1.5.21 Поток рассеяния катушки возбуждения и аксиальный поток рассеяния, Вб, определяется формулой:

$$\Phi_{\sigma K} + \Phi_{\sigma a} = U_{44} (G_{\sigma K} + G_{\sigma a}) = 480,34 \cdot (9,358 \cdot 10^{-8} + 0) = 4,495 \cdot 10^{-5}, \quad (1.80)$$

где $U_{44} = U_{33} + F_K = 458,45 + 21,89 = 480,34$ – магнитное напряжение рассеивающих поверхностей, А.

1.5.22 Поток во втулке, Вб, определяется формулой:

$$\Phi_{BT} = \Phi_K + \Phi_{\sigma K} + \Phi_{\sigma a} = 0,000351 + 0,00004495 = 39,59 \cdot 10^{-5}. \quad (1.81)$$

1.5.23 Индукция изгиба во втулке, Тл, определяется формулой:

$$B_{изг.вТ} = \Phi_{BT} / S_{изг.вТ} = 0,0003959 / 0,0008602 = 0,4602, \quad (1.82)$$

где

$$S_{изг.вТ} = \pi D_{вт} \frac{\sqrt{D_{вт}^2 + 4h_K^2}}{2p} = \pi 0,0548 \frac{\sqrt{0,0548^2 + 4 \cdot 0,0121^2}}{2 \cdot 6} = 8,62 \cdot 10^{-4} \quad \text{– сечение}$$

изгиба втулки, м².

1.5.24 Магнитное напряжение изгиба втулки, А, определяется формулой:

$$F_{изг.вТ} = 2l_{изг.вТ} \cdot H_{изг.вТ} = 2 \cdot 0,015 \cdot 368 = 11,04, \quad (1.83)$$

$$\text{где } l_{изг.вТ} = \frac{\sqrt{D_{вт}^2 + 4h_K^2}}{4} = \frac{\sqrt{0,0548^2 + 4 \cdot 0,0121^2}}{4} = 0,015 \quad \text{–}$$

средняя длина магнитной силовой линии на участке изгиба втулки, м;

$H_{изг.вт} = 368$ – удельная напряженность магнитного поля на участке изгиба втулки, А/м (находим исходя из таблицы для стали 10[4]).

1.5.25 Индукция в стыке втулки с полюсной системой, Тл, определяется формулой:

$$B_{СТ} = \Phi_{ВТ} / S_{СТ} = 0,0003959 / 0,000392 = 1,006 = 1,006, \quad (1.84)$$

где $S_{СТ} = \pi D_{ВТ2} / 4p = \pi \cdot 0,05482 / 4 \cdot 6 = 0,0003932$ – площадь стыка, м².

1.5.26 Магнитное напряжение стыка, А, определяется формулой:

$$F_{СТ} = 1,6 \cdot 106 \cdot \delta_{СТ} B_{СТ} = 1,6 \cdot 106 \cdot 0,05 \cdot 10^{-3} \cdot 1,006 = 80,48, \quad (1.85)$$

где $\delta_{СТ} = 0,05 \cdot 10^{-3}$ – зазор в стыке, м.

1.5.27 Индукция во втулке, Тл, определяется формулой:

$$B_{ВТ} = \Phi_{ВТ} / S_{ВТ} = 0,0003959 / 0,0008 = 1,006, \quad (1.86)$$

где $S_{ВТ} = D_{ВТ2} / 4p = 0,05482 / 4 \cdot 6 = 0,0003932$ – расчетное сечение втулки, м².

1.5.28 Магнитное напряжение во втулке, А, определяется формулой:

$$F_{ВТ} = l_{ВТ} H_{ВТ} = 0,036 \cdot 965 = 34,74, \quad (1.87)$$

где $H_{ВТ} = 965$ – удельное напряжение удельного поля втулки, А/м (находим исходя из таблицы для стали 10 [4]).

1.5.29 Общая намагничивающая сила обмотки возбуждения, А, определяется формулой:

$$F_{В} = U_{44} + F_{изг.вт} + F_{СТ} + F_{ВТ} = 480,34 + 11,14 + 80,48 + 34,74 = 606,6. \quad (1.88)$$

Данные вычислений для других значений $U_{\phi 0}$ сведены в таблицу 1.5. На основе результатов вычислений было произведено построение характеристики ХХ (рисунок 1.2).

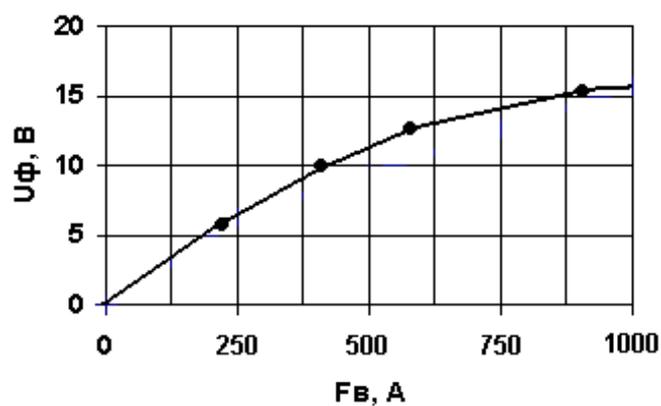


Рисунок 1.2 - Характеристика XX

Таблица 1.5- Вычисление характеристики XX

Значение расчетной величины	ед. изм.	$0,5U_{\phi 0}$	$0,75U_{\phi 0}$	$U_{\phi 0}$	$1,25U_{\phi 0}$
1 ЭДС фазы	В	3,15	4,72	6,3	7,87
2 $\Phi_{\delta} = 60U_{\phi 0} / 4,44p,4 \cdot W_{\phi}$	Вб	0.00005	0.00014	0.00026	0.00045
3 $B_{\delta} = \Phi_{\delta} / S_{\delta}$	Тл	0.2174	0.3298	0.4377	0.5561
4 $F_{\delta} = 1,6K_{\delta} \delta B_{\delta} 10^6$	А	148.12	273.42	396.07	530.81
5 $B_z = B_{\delta} t_z / K_c b_z$	Тл	0.879	1.081	1.413	1.727
6 $F_z = 2h_z H_z$	А	6.61	8.47	13.11	23.87
7 Удельное магнитное напряжение, H_z	А/м	265	390	690	1020
8 $B_j = \Phi_{\delta} / 2S_j$	Тл	0.089	0.118	0.342	0.568
9 $F_j = l_j H_j$	А	3.27	5.04	8.82	12.21
10 Удельное магнитное напряжение, H_j	А/м	230	315	450	720
11 $\Phi_{\sigma p} = U_{11} G_{\sigma p}$	Вб	$1.13 \cdot 10^{-5}$	$2.14 \cdot 10^{-5}$	$3.72 \cdot 10^{-5}$	$4.97 \cdot 10^{-5}$
12 $U_{11} = F_{\delta} + F_z + F_j$	А	158	286,93	424,92	566,89

Продолжение таблицы 1.5

13 $\Phi_p = \Phi_\delta + \Phi_{\sigma p}$	Вб	$6.13 \cdot 10^{-5}$	$16.1 \cdot 10^{-5}$	$29.7 \cdot 10^{-5}$	$49.9 \cdot 10^{-5}$
14 $B_p = \Phi_p / S_p$	Тл	0,175	0,46	0,848	1,425
15 $F_p = 2l_p H_p$	А	9,89	14,96	27,88	51,68
16 Удельное магнитное напряжение, H_p	А/м	290	440	820	1520
17 $\Phi_{\sigma я} = U_{22} G_{\sigma я}$	Вб	$1.67 \cdot 10^{-5}$	$3.02 \cdot 10^{-5}$	$4.45 \cdot 10^{-5}$	$6.18 \cdot 10^{-5}$
18 $U_{22} = U_{11} + F_p$	А	167,89	301,89	445,87	618,57
19 $\Phi_{изг.р} = \Phi_p + \Phi_{\sigma я}$	Вб	$0,78 \cdot 10^{-4}$	$1,912 \cdot 10^{-4}$	$3,41 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$
27 $F_k = 2l_k H_k$	А	10,45	13,97	21,89	40,92
28 Удельное магнитное напряжение, H_k	А/м	475	635	995	1860
29 $\Phi_{\sigma к} + \Phi_{\sigma а} = U_{44} (G_{\sigma к} + G_{\sigma а})$	Вб	$1.747 \cdot 10^{-5}$	$3.057 \cdot 10^{-5}$	$4.495 \cdot 10^{-5}$	$6.352 \cdot 10^{-5}$
30 $U_{44} = U_{33} + F_k$	А	186,15	325,77	480,34	676,84
31 $\Phi_{вт} = \Phi_k + \Phi_{\sigma к} + \Phi_{\sigma а}$	Вб	$9,93 \cdot 10^{-5}$	$22,8 \cdot 10^{-5}$	$39,59 \cdot 10^{-5}$	$63,7 \cdot 10^{-5}$
32 $B_{изг.вт} = \Phi_{вт} / S_{изг.вт}$	Тл	0,1154	0,265	0,4602	0,7405
33 $F_{изг.вт} = 2l_{изг.вт} H_{изг.вт}$	А	9,15	9,75	11,04	12,3
34 Удельное магнитное напряжение, $H_{изг.вт}$	А/м	305	325	368	410
35 $B_{ст} = \Phi_{вт} / S_{ст}$	Тл	0,252	0,579	1,006	1,62
36 $F_{ст} = 1,6 \cdot 10^6 \delta_{ст} B_{ст}$	А	20,16	46,32	80,48	129,6
37 $B_{вт} = \Phi_{вт} / S_{вт}$	Тл	0,252	0,579	1,006	1,62

Продолжение таблицы 1.5

38 $F_{\text{ВТ}} = I_{\text{ВТ}} N_{\text{ВТ}}$	А	12,6	23,04	34,74	79,2
39 Удельное магнитное напряжение, $N_{\text{ВТ}}$	А/ м	350	640	965	2200
40 $F_{\text{В}} = U_{44} + F_{\text{ИЗГ.ВТ}} + F_{\text{СТ}} + F_{\text{ВТ}}$	А	228,06	404,88	606,6	897,94

1.6 Вычисление обмотки возбуждения

1.6.1 Максимально допустимое значение сопротивления обмотки возбуждения в состоянии нагревания, Ом, определяется формулой:

$$R_{\text{ВТ}} = (U_{\text{д}} - U_{\text{д}} - \Delta U_{\text{р}}) / I_{\text{ВМ}} = (14 - 2,8 - 1,5) / 3,5 = 2,77. \quad (1.89)$$

1.6.2 Значение сопротивления обмотки возбуждения при нормальных условиях, Ом, определяется формулой:

$$R_{\text{ВХ}} = R_{\text{ВТ}} / K_{\text{р}} = 2,77 / 1,22 = 2,27, \quad (1.90)$$

где $K_{\text{р}} = 1 + 0,004(t - 20) = 1 + 0,004(75 - 20) = 1,22$ – коэффициент увеличения сопротивления обмотки в нагретом состоянии;

$t = 75^{\circ}\text{C}$ – значение рабочей температуры обмотки.

1.6.3 Площадь межполюсного окна для обмотки возбуждения, м^2 , определяется формулой:

$$S_{\text{В}} = 0,5 I_{\text{ВТ}} (D_{\text{м}} - D_{\text{ВТ}}) = 0,5 \cdot 0,036 (0,077 - 0,0548) = 0,0003996. \quad (1.91)$$

1.6.4 Среднее значение длины витка в обмотке возбуждения, м, определяется формулой:

$$l_{\text{ВСР}} = 0,6 \cdot \pi (D_{\text{м}} + D_{\text{ВТ}}) = 0,6 \cdot \pi (0,077 + 0,0548) = 0,248.$$

(1.92)

1.6.5 Площадь сечения проводника в обмотке возбуждения, м^2 , определяется формулой:

$$q_{\text{В}} = (\rho \cdot K_{32} I_{\text{ВСР}} S_{\text{В}} / R_{\text{ВХ}}) 1/2 = (1,7510 \cdot 8 \cdot 0,5 \cdot 0,248 \cdot 0,00039 / 2,27) 1/2 = 3,98 \cdot 10^{-7} \quad (1.93)$$

Выбираем провод марки ПЭТВ с $q_{\text{В}} = 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ [3].

1.6.6 Диаметральный размер голого провода обмотки возбуждения, м, определяется формулой:

$$d_B = 2\sqrt{\frac{q_B}{\pi}} = 2\sqrt{\frac{0,4 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 0,402 \cdot 10^{-3} \text{ [3]}. \quad (1.94)$$

1.6.7. Диаметральный размер провода с изоляцией, м, определяется формулой:

$$d_{B,из} = 0,065 \cdot 10^{-3} + d_B = 0,065 \cdot 10^{-3} + 0,402 \cdot 10^{-3} = 0,469 \cdot 10^{-3} \text{ [3]}.$$

1.6.8 Уточненный расчет сопротивления обмотки возбуждения, Ом, определяется формулой:

$$R_{BX} = K_{32} I_{BCP} S_B / q_{B2} = 1,7510 \cdot 8 \cdot 0,5 \cdot 0,248 \cdot 0,00039 / (0,4 \cdot 10^{-6}) \cdot 2 = 2,28. \quad (1.95)$$

1.6.9 Количество витков в обмотке возбуждения, определяется формулой:

$$W_B = q_B R_{BX} / I_{BCP} = 0,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2,28 / 1,7510 \cdot 8 \cdot 0,248 = 341,67. \quad (1.96)$$

Принимаем $W_B = 342$ витков.

1.6.10 Максимально возможное значение величины намагничивающей силы в обмотке возбуждения, А, определяется формулой:

$$F_{Bm} = I_{Bm} W_B = 3,5 \cdot 341,67 = 1195. \quad (1.97)$$

Плотность тока в обмотке возбуждения, А/м², определяется формулой:

$$j_B = I_{Bm} / q_B = 3,5 / 0,4 \cdot 10^{-6} = 8,75 \cdot 10^6. \quad (1.98)$$

Данная величина не превышает допустимых значений [2].

1.7 Расчет токоскоростной (ТС) характеристики

При вычислении ТС характеристики $I_d = f(n)$ при $U_d = \text{const}$, $I_B = I_{Bm}$ применяется векторная диаграмма ЭДС для активной нагрузки и характеристика ХХ.

Для вычисления задаемся несколькими значениями выпрямляемого тока I_d в установленных границах от 0 до I_{dm} . Вычисление производим при двух значениях скорости вращения n_1 . Примем $I_d = I_{dm} = 110 \text{ А}$, $n_1 = 6000 \text{ об/мин}$.

1.7.1 Полный ток на выходе, А, определяется формулой:

$$I_r = I_d + I_{Bm} = 110 + 3,5 = 113,5. \quad (1.99)$$

1.7.2 Ток на фазе, который соответствует принятому значению выпрямляемого тока, А, определяется формулой:

$$I_{\phi i} = K_i I_r = 0,74 \cdot 113,5 = 83,99, \quad (1.100)$$

где $K_i = 0,74$ – коэффициент преобразования тока в схеме выпрямления.

1.7.3 Напряжение генератора на фазе, В:

$$U_{\phi} = 8,5 \text{ В.}$$

Напряжения на фазе $U_{\phi i}$ определяются по экспериментальным кривым рис. 3 [1].

1.7.4 Активное сопротивление фазы статорной обмотки, Ом, определяется формулой:

$$r_{at} = \rho_{at} \cdot l_{acp} W_{\phi} / (qa\alpha) = 2,135 \cdot 10^{-8} \cdot 0,1764 \cdot 70 / 1,4410 \cdot 6 \cdot 2 = 0,01765, \quad (1.101)$$

где $\rho_{at} = (1 + 0,004(t - 20)) = 1,75 \cdot 10^{-8} (1 + 0,004(75 - 20)) = 2,135 \cdot 10^{-8}$ – удельное сопротивление эффективного проводника обмотки в условиях рабочей температуры, Ом·м.

1.7.5 Коэффициент удельной магнитной проводимости пазового рассеяния, определяется формулой:

$$\lambda_n = \frac{2}{3} \frac{h_{km}}{b_{ш} + b_{n2}} + \frac{h_4}{b_{ш}} = \frac{2}{3} \frac{0,0078}{0,0182 + 0,0213} + \frac{0,0035}{0,0182} = 0,3239, \quad (1.102)$$

где $h_4 = \Delta_{изк} + h_{кл} + h_{ш} = 0,0005 + 0,002 + 0,0001 = 0,0035$ м.

1.7.6 Коэффициент удельной магнитной проводимости лобового рассеяния, определяется формулой:

$$\lambda_l = 0,9q \frac{l_{ал} - 0,64\tau}{l_i} = 0,9 \cdot 2,33 \frac{0,05523 - 0,64 \cdot 0,027}{0,033} = 0,5175. \quad (1.103)$$

1.7.7 Коэффициент удельной магнитной проводимости рассеяния высших гармоник, определяется формулой:

$$\lambda_z = \frac{t_z}{9,5\delta K_{\delta}} \cdot \frac{2\alpha_i}{1 + K_q} \xi_{1M} = \frac{0,027}{9,5 \cdot 0,00035 \cdot 1,5} \cdot \frac{2 \cdot 0,68}{1 + 0,0832} \cdot 0,252 = 1,713, \quad (1.104)$$

где $\xi_{1M} = K\beta_1(1 - \Delta Z) - 0,25 \cdot K_{02} = 1(1 - 0,28) - 0,25 \cdot 0,8662 = 0,2525$;

$K_q = (K_{q0} + K_{q1})(1 + K_{\delta}) / 2 = (0,44 + 0,1)(1 + 2,08) / 2 = 0,8324$;

ΔZ , K_{q0} , K_{q1} - коэффициенты, которые определяются по рис. 13а, б, в [2].

1.7.8 Суммарный коэффициент удельной магнитной проводимости рассеяния фазы статорной обмотки, определяется формулой:

$$\sum \lambda = \lambda_{\Pi} + \lambda_{\text{Л}} + \lambda_{\text{Z}} = 0,3239 + 0,5175 + 1,713 = 2,55. \quad (1.105)$$

1.7.9 Индуктивное сопротивление рассеяния фазы статорной обмотки, X_s , определяется формулой[24]:

$$X_s = 4 \pi \mu_0 f \cdot l_1 \cdot W_{\Phi} \sum \lambda / (pq) = 4 \pi 10^{-7} \cdot 495 \cdot 0,033 \cdot 70 \cdot 2,25 / 6 \cdot 2,33 = 0,0206, \quad (1.104)$$

где $f = p_n / 60 = 6 \cdot 4950 / 60 = 495$ – частота ЭДС, Гц.

1.7.10 Падение напряжения на активном сопротивлении фазы, U_r , определяется формулой:

$$U_r = I_{\text{фрат}} \cdot R = 83,99 \cdot 0,01765 = 0,75. \quad (1.106)$$

1.7.11 Падение напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния фазы, U_{xs} , определяется формулой:

$$U_{xs} = I_{\text{фкс}} \cdot X_s = 83,99 \cdot 0,0206 = 0,874. \quad (1.107)$$

1.7.12 Составляющая ЭДС поперечной РЯ, совпадающая по направлению с вектором U_r , $E_{\text{ақ}}$, определяется формулой[25]:

$$E_{\text{ақ}} / \cos \psi = (F_{\text{ақ}} / \cos \psi), \quad (1.108)$$

где $E_{\text{ақ}} / \cos \psi$ – намагничивающая сила РЯ, соответствующая ЭДС $E_{\text{ақ}} / \cos \psi$.

$$E_{\text{ақ}} / \cos \psi = F_a K_{\text{ақ}} = 2232,75 \cdot 0,369 = 823,8,$$

где $K_{\text{ақ}} = (\pi \alpha_1 - \sin \pi \alpha_1) / 4 \sin(\pi \alpha_1 / 2) = (\pi \cdot 0,68 - \sin(\pi \cdot 0,68)) / 4 \sin(\pi \cdot 0,68 / 2) = 0,5061$ – коэффициент приведения намагничивающей силы поперечной РЯ к масштабу намагничивающей силы обмотки возбуждения;

$F_a = 0,9 m K_0 W_{\Phi} I_{\Phi} / p = 0,9 \cdot 3 \cdot 0,866 \cdot 70 \cdot 83,99 / 6 = 2232,75$ – намагничивающая сила РЯ, А.

Величина $E_{\text{ақ}} / \cos \psi$ определяется по спрямленной части характеристики ХХ: $E_{\text{ақ}} / \cos \psi = 6,2 \text{ В}$.

Для того, чтобы привести значения данной ЭДС к скорости вращения, производим умножение найденной величины на отношение $n/1200$:
 $E_{aq} / \cos\psi = 6,2 \cdot 5100/1200 = 58,57$ В.

1.7.13 Значение ЭДС в зазоре машины, В, определяется формулой:

$$E_{\delta} = \sqrt{\left(U_{\phi} + U_r \right)^2 + U_{xs}^2} = \sqrt{(15,5 + 0,75)^2 + 0,874^2} = 9,27 \quad (1.109)$$

1.7.14 Угол, который определяет направление вектора внутренней ЭДС машины, эл. град., определяется формулой[23]:

$$\psi = \arctg \frac{E_{aq} + U_{xs}}{U_{\phi} + U_r} = \arctg \frac{14,2 + 0,874}{15,5 + 0,75} = 42,84 \quad (1.110)$$

1.7.15 Угол, который определяет направление вектора E_{δ} , эл. град., определяется формулой:

$$\Theta = \arctg \frac{U_{xs}}{U_{\phi} + U_r} = \arctg \frac{0,874}{15,5 + 0,75} = 3,07 \quad (1.111)$$

1.7.16 Продольная составляющая внутренней ЭДС машины, которая определяется по векторной диаграмме, В, определяется формулой:

$$E_d = E_{\delta} \cos(\psi - \theta) = 9,27 \cos(42,84 - 3,07) = 7,5. \quad (1.112)$$

1.7.17 Продольная составляющая намагничивающей силы РЯ, А, определяется формулой:

$$F_{ad} = F_a \cdot \sin\psi \cdot K_{ad} = 2232,75 \cdot \sin 42,84 \cdot 0,85 = 1069,47, \quad (1.113)$$

где $K_{ad} = 0,85$ – коэффициент приведения намагничивающей силы продольной РЯ к масштабу намагничивающей силы обмотки возбуждения.

1.7.18 Намагничивающая сила обмотки возбуждения, которая соответствует продольной составляющей внутренней ЭДС, А, определяется формулой:

$$F_d = F_B - F_{ad} = 1173,9 - 1069,47 = 104,43. \quad (1.114)$$

1.7.19 Продольная составляющая внутренней ЭДС, которая была определена по характеристике ХХ, В, определяется формулой:

$$E_d = f(Fd) = 2,5. \quad (1.115)$$

Для того, чтобы определить E_d по оси абсцисс откладывается значение E_d . Определение ЭДС производится по характеристике ХХ. Полученное значение ЭДС приводим к расчетной величине: $E_d = 2,5 \cdot 5100/1200 = 9,87$ В.

1.7.20 Разница ЭДС, которые были определены по характеристике ХХ и по векторной диаграмме, В, определяется формулой [22]:

$$\Delta E_d = E_d - E_d = 7,5 - 2,5 = 5. \quad (1.116)$$

1.7.21 Скорость вращения, которая соответствует принятой величине нагрузочного тока.

Для того, чтобы определить скорость вращения, которая соответствует току нагрузки I_{di} , находим для данного тока значение величины ΔE_d при скоростях вращения n_i . Берем зависимость $\Delta E_d = f(n_i)$. Пересечение графика с осью абсцисс дает значение, которое соответствует току I_{di} , то есть координату точки ТС характеристики для данного тока: $n = 6000$ об/мин. Расчет осуществляется последовательно для всевозможных величин токов $I_{d1}, I_{d2} \dots I_{di}$, убирается для каждого из токов график $\Delta E_d = f(n_i)$, находится i точек ТС характеристики и осуществляется ее построение (рис. 1.3). Полученные расчетные данные приведены в таблице 1.6.

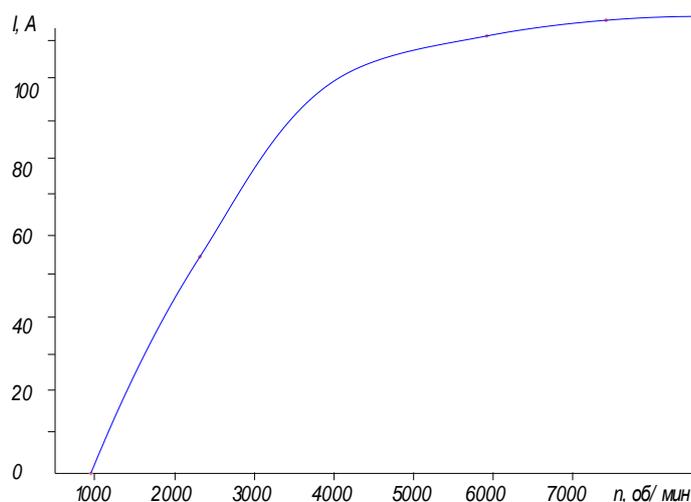


Рисунок 1.3- ТС характеристика генератора

Таблица 1.6- Расчет ТС характеристики

Значение расчетной величины и формула	Ед. изм	I _d , А							
		0		25		75		110	
		n, об/мин							
		750	810	900	960	1350	1500	495	510
$I_r = I_d + I_{вм}$	А	4,75		24,7		74,7		113,5	
$I_{\phi i} = K_i I_r$	А	3,48		18,28		55,28		83,99	
U_{ϕ}	В	6,25		6,8		7,36		8,5	
$f = pn/60$	Гц	75	81	90	96	135	150	495	510
$X_s =$ $4\pi\mu_0 f l_i W_{\phi} \sum \lambda / pq$	Ом	0,44 8	0,48 3	0,537	0,57 3	0,806	0,89 6	2,06	3,04
$U_r = I_{\phi rat}$	В	0,0307		0,161		0,488		0,749	
$U_{xs} = I_{\phi xs}$	В	0,77 9	0,84 2	4,908	5,23 7	22,27	24,7 6	87,4 3	129, 01
$F_a =$ $0,9mK_0 W_{\phi} I_{\phi} / p$	А	91,54		480,85		1454,13		2232,75	
$F_{aq} / \cos\psi =$ $F_a K_{aq}$	А	33,778		177,433		536,57		823,8	
$F_{aq} / \cos\psi$	В	1,5		5,2		10,8		14,2	
$(F_{aq} / \cos\psi) \cdot n / 1200$	В	0,93	1,01	3,9	4,16	12,15	13,5	58,5 6	60,3 5
$E_{\delta} = \sqrt{\left(U_{\phi} + U_r \right)^2 + U_{xs}^2}$	В	12,5 54	12,5 58	14,61	14,7 2	26,95 6	29,0 47	88,9 27	130, 02
$\psi = \arctg \frac{E_{aq} + U_{xs}}{U_{\phi} + U_r}$	эл. гр.	10,3 1	11,3	21,25	37,1 6	65,3	66,8	80,9	83,5

Продолжение таблицы 1.6

$C_{\text{зад}} = \sum_{i=1}^n S_{\text{из}} \cdot (1 + K_{\text{из}})$	эл. гр.	3,54	3,83	19,59	20,8 5	55,73	58,4 7	79,4	82,8 1
$F_{\text{ад}} = F_{\text{а}} \cdot \sin\psi \cdot K_{\text{ад}}$	А	13,9 2	15,2 4	148,1 3	246, 88	1021, 4	105 3,5	186 5,4	188 5,6
$F_{\text{д}} = F_{\text{В}} - F_{\text{ад}}$	А	115 9,9	115 8,6	1025, 7	927, 02	352,4 7	320, 37	108, 45	88,2 7
$E_{\text{д}} = f(F_{\text{д}})$	В	16,2	16,1	15,3	15,0	8,1	7,8	3,5	3,1
$E_{\text{д}} \cdot n/1200$	В	10,1 2	10,8 6	11,47	12	13,6	13,9 2	14,4 3	15,1 2
$\Delta E_{\text{д}} = E_{\text{д}} - E_{\text{д}}$	В	-3,7	-3,6	-1,7	-1,6	6,6	6,9	12	12,4
n	об/ мин	850		950		1450		5100	

1.7.22 Схема выпрямителя с модификацией, дополнительное плечо с двумя диодами

В реальности, в генераторах форма напряжений на фазе отличается от синусоиды и представляет собой гармонический сигнал, т. е. сумму всех синусоид, которые называются составляющими гармоник или гармониками – первой (частота совпадает с частотой напряжения на фазе), и высшими, в основном, третьей (значение частоты в три раза выше, чем у первой). Реальная форма напряжения на фазе в виде сложения двух гармоник (1-ой и 3-ей) представлена на рис. 1.4.

В линейном напряжении, подводимом к выпрямителю, 3-я гармоника отсутствует, т.к. 3-ьи гармоники всех напряжений на фазе совпадают по фазе, т. е. они одновременно достигают одних и тех же значений, взаимно

уравновешивают и взаимно уничтожают друг друга в линейном напряжении. Так, 3-я гармоника в напряжении на фазе присутствует, а в линейном – нет.

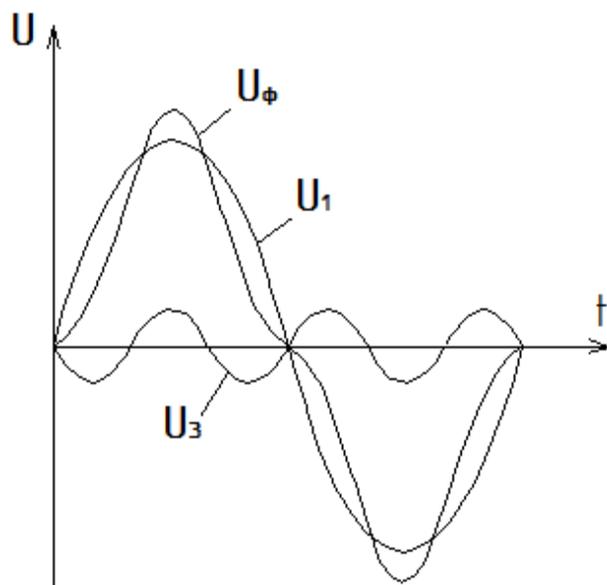


Рисунок 1.4- Напряжение на фазе U_{ϕ} в виде сложения синусоид 1-ой U_1 и 3-ей U_2 гармоник

В схеме выпрямителя «Мост Ларионова» третья гармоника фазного напряжения не используется потребителями. Чтобы использовать эту мощность, в мост Ларионова добавлены два диода, которые подсоединены к нулевой точке обмоток фаз, т. е. к точке, там, где прослеживается действие фазного напряжения. Так, данные диоды выпрямляют только напряжение 3-ей гармоники напряжения на фазе. Действие диодов наиболее ощутимо при возрастании частоты вращения ротора. Для генератора при частоте более 3000 мин⁻¹, при этом обеспечивается гарантированный рост мощности примерно на 10% от мощности обычного моста Ларионова. [14]

С учетом вышесказанного результирующая токоскоростная характеристика генератора с дополнительным плечом Ларионова представлена на рис. 2.5.

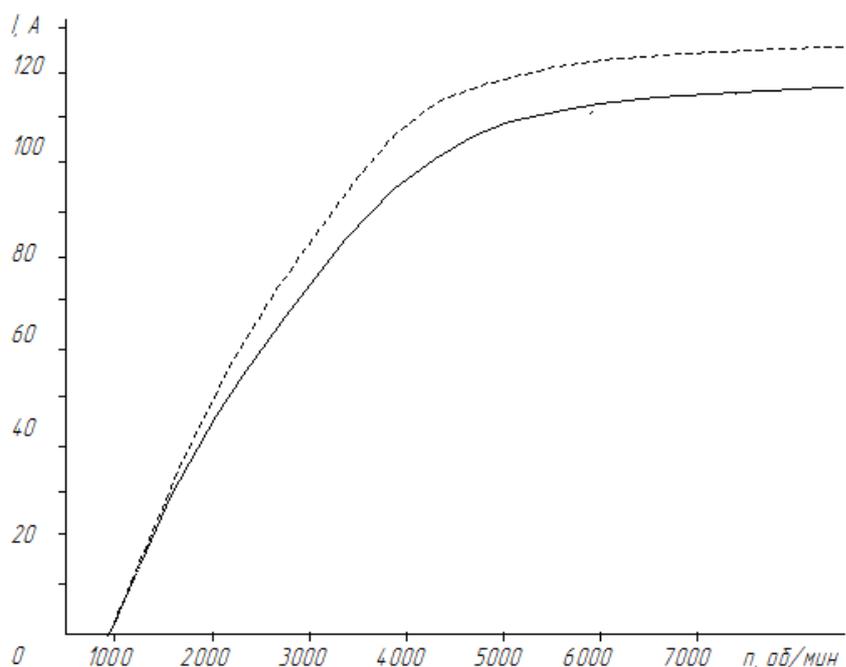


Рисунок 1.5- Суммарная ТС характеристика

1.8 Размеры контактного аппарата

Постоянный ток подпитывает обмотку возбуждения через контактный аппарат кольца-щеток.

1.8.1 Диаметральный размер контактных колец, м, определяется формулой:

$$D_{\text{КК}} = 60V_{\text{КК}} / (\pi \cdot n) = 60 \cdot 15 / \pi \cdot 6000 = 0,057, \quad (1.117)$$

где $V_{\text{КК}} = 15$ – окружная скорость рабочей поверхности колец, м/с.

1.8.2 Суммарная площадь контактной поверхности щеток, м^2 , определяется формулой:

$$S_{\text{Щ}} = S_{\text{Щ}} / n_{\text{Щ}} = 2,35 / 20 \cdot 10^4 = 1,17 \cdot 10^{-5}, \quad (1.118)$$

где $j_{\text{Щ}} = 20 \cdot 10^4$ – допустимая плотность тока под щеткой, $\text{А}/\text{м}^2$, таблица 4 [2].

1.8.3 Число щеток на кольце $n_{\text{Щ}}$.

Принимаем $n_{\text{Щ}} = 1$.

1.8.4 Площадь контакта щетки, м^2 , определяется формулой

$$S_{\text{Щ}} = S_{\text{Щ}} / n_{\text{Щ}} = 1,17 \cdot 10^{-5} / 1 = 1,17 \cdot 10^{-5}. \quad (1.119)$$

1.8.5 Размеры щетки: $b_{щ} = 0,006$ м – ширина; $l_{щ} = 0,0065$ м – длина;

$h_{щ} = 0,015$ м – высота.

1.8.6 Марка щеток.

Делаем выбор в сторону меднографитных щеток М1.

1.8.7 Значение ширины контактного кольца, м, определяется формулой:

$$b_{кк} = b_{щ} + 0,0015 = 0,006 + 0,0015 = 0,0075.$$

1.8.8 Расстояние между соседними кольцами b_1 .

Принимаем $b_1 = 0,003$ м.

1.8.9 Материал колец.

При изготовлении контактных колец применяется меть мягкая отожженная марки МЗ.

1.9 Определение потерь и КПД

Определение потерь и КПД осуществляется для нескольких значений тока нагрузки $I_{d1}, I_{d2}, \dots, I_{di}$ в установленных границах от 0 до I_{dm} . Для каждого из токов берется соответствующая скорость вращения ротора согласно ТС характеристике.

1.9.1 Потери в меди статорной обмотки, определяется формулой:

$$P_{\alpha} = m \cdot I_{\Phi i}^2 r_{\alpha t}, \text{ Вт}; \quad (1.120)$$

$$I_{\Phi i} = KI \cdot KIB \cdot I_{di}, \text{ А}. \quad (1.121)$$

1.9.2 Потери в меди обмотки возбуждения, определяется формулой:

$$P_B = I_{вм2}^2 \cdot R_{вт}, \text{ Вт}. \quad (1.122)$$

1.9.3 Потери в статорном ярме, определяется формулой:

$$f = p \cdot n_i / 60, \text{ Гц}; \quad (1.123)$$

$$P_j = 1,6 \cdot P_1 / 50 \cdot (B_j) \cdot 2 \cdot M_j \cdot \sqrt{(fi/50)} \cdot 3, \text{ Вт}, \quad (1.124)$$

где $P_1/50 = 3,3$ – удельные потери в стали ярма, при частоте перемагничивания 50 Гц и максимальном значении индукции, которая равна 1 Тл, m^2 [3];

$B_j = B_j \cdot n/n_i$ – расчетная индукция в ярме, которая приведена к скорости вращения 6000 об/мин;

$$M_j = 7,8 \cdot 103 \pi (D_H - h_j) h_j l_i K_C = 7,8 \cdot 103 \pi (0,146 - 0,012) 0,012 \cdot 0,033 \cdot 0,95 = 1,161 \text{ кг} \text{ – масса}$$

стали статорного ярма, кг.

1.9.4 Потери в статорных зубцах

$$P_Z = 1,8 \cdot P_1 / 50 (B_{Z'})^2 \cdot K_T \cdot M_Z \cdot \sqrt{(f_1/50)} \cdot 3, \text{ Вт}, \quad (1.125)$$

$B_Z = B_Z n/n_i$ – расчетная индукция в зубце, которая приведена к скорости вращения 5000 об/мин;

$$M_Z = 7,8 \cdot 103 z b_z h_z l_i K_C = 7,8 \cdot 103 \cdot 18 \cdot 0,0088 \cdot 0,0095 \cdot 0,033 \cdot 0,95 = 0,684 \text{ кг} \text{ – масса}$$

зубцов, кг;

$K_T = 1,0$ – коэффициент обработки из таблицы 5 [2].

1.9.5 Добавочные потери в полюсах при ХХ, Вт, определяется формулой:

$$P_{OP} = 0,66 K_0 \cdot \tau^2 \cdot K_{OP} \cdot B_{\delta}^2 \frac{K_{ш} \cdot S_{PH}}{\sqrt{z/p}} \cdot \sqrt{\left(\frac{f}{50} \right)^3}, \quad (1.126)$$

где $K_{OP} = 1,8$ – коэффициент удельных поверхностных потерь, табл 6 [2];

$K_{ш} = 20$ – коэффициент по рис. 15 [2];

$$S_{PH} = 2 p b_p l_i = 2 \cdot 6 \cdot 0,029 \cdot 0,033 = 0,0114 \text{ м}^2.$$

1.9.6 Добавочные потери при нагрузке, Вт, определяется формулой:

$$P_{nr} = 0,26 \cdot K_{OP} \cdot K_{\beta 1} (A \cdot \tau \cdot 10^{-3}) \cdot (t_z / \delta) \frac{K_n \cdot S_{PH}}{\sqrt{z/p}} \sqrt{\left(\frac{f}{50} \right)^3}, \quad (1.127)$$

где $K_{\Pi} = 0,07$ – коэффициент, определяемый по рис.16 [2];

$$A = 2m W_{\Phi} I_{\Phi} / (\pi D_i) = 2 \cdot 3 \cdot 7083,99 / \pi \cdot 0,102 = 75721,24 \text{ А/м.}$$

– линейная нагрузка,

1.9.7 Потери на трение в подшипниках, Вт, определяется формулой:

$$P_{\Pi\Pi} = 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 5 C_{nm} / 60 = 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 26200 \cdot 6000 / 60 = 24,6 \text{ Вт}, \quad (1.128)$$

где $C = 26200$ – динамическая грузоподъемность, Н [3].

1.9.8 Потери на вентиляторе, Вт:

$$P_{BH} = 2 \cdot 106 \cdot D_B^4 b_B n^3 i, \quad (1.129)$$

где $D_B = 0,156$ – наружный диаметральный размер вентилятора, м;

$b_B = 0,012$ – ширина лопатки, м.

1.9.9 Потери на воздушное трение ротора, Вт, определяется формулой:

$$P_{ТВ} = 1,14(n_i/100)^3(D_p/10)^5(1+5I_p/D_p)C_B\gamma_{B'}, \quad (1.130)$$

где $C_B = 2$ – коэффициент [2];

$\gamma_{B'} = 1$ – отношение удельной массы воздуха на эксплуатационной высоте над уровнем моря и удельной массы воздуха, соответствующей нормальному атмосферному давлению, кг/м³.

1.9.10 Потери на трение щеток, Вт, определяется формулой:

$$P_{ТЩ} = 9,81 \cdot 103 \cdot K_{ТР} P_{Щ} S_{Щ} V_{КК} = 9,81 \cdot 103 \cdot 0,25 \cdot 18 \cdot 1,17 \cdot 10^{-5} \cdot 15 = 14,5, \quad (1.131)$$

где $K_{ТР} = 0,25$ – коэффициент трения щеток [2];

$P_{Щ} = 18$ – удельное нажатие на контактной поверхности щеток, кПа [2].

1.9.11 Электрические потери в щеточном контакте, Вт, определяется формулой:

$$P_{ЭЩ} = \Delta U_{Щ} I_{вм} = 0,2 \cdot 3,5 = 0,7, \quad (1.132)$$

где $\Delta U_{Щ} = 0,2$ – переходное падение напряжения в щеточном контакте, В.

1.9.12 Потери на выпрямителе, Вт, определяется формулой:

$$P_{ВП} = g \Delta U_B I_{ВСП}, \quad (1.133)$$

где $g = 6$ – количество вентилялей в схеме выпрямления;

$\Delta U_B = 0,6$ – прямое падение напряжения на вентиле, В;

$I_{ВСП} = I_{di} / 3 = 18,3$ – средний вентиляльный ток, А.

1.9.13 Суммарные потери, Вт, определяется формулой:

$$\sum P = P_d + P_B + P_j + P_Z + P_{OP} + P_{HP} + P_{тн} + P_{тв} + P_{ВП} + P_{ТЩ} + P_{ЭЩ} + P_{ВП}. \quad (1.134)$$

КПД генератора

$$\eta = U_d(I_{di} + I_{вм}) / [U_d(I_{di} + I_{вм}) + \sum P].$$

Результаты вычислений КПД при различных значениях нагрузочного тока и соответствующей им скорости вращения ротора выведены в таблицу 1.7.

Исходя из результатов расчета, построена зависимость КПД от нагрузочного тока и скорости вращения вала (рисунок 1.4).

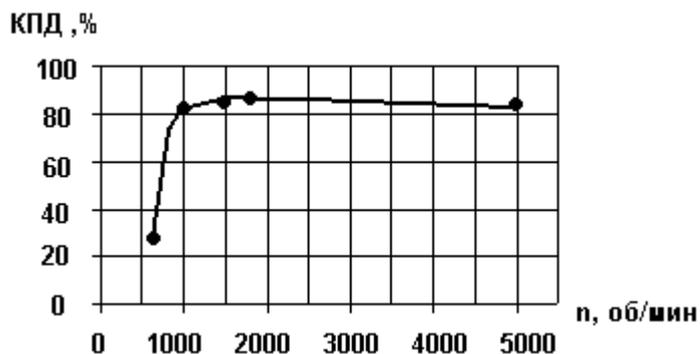


Рисунок 1.6 - КПД генератора

1.10 Удельные характеристики генератора

1.10.1 Коэффициент использования по активным материалам, определяется формулой:

$$K_{ПА} = U_d (I_{др} + I_{вм}) / M_a = 171,84, \quad (1.135)$$

где $M_a = M_{СТ} + M_{МСТ} + M_B + M_P = 1,845 + 1,83 + 0,643 + 0,448 = 3,966$ — масса активных материалов, кг;

$M_{СТ} = M_j + M_z = 1,845$ — масса статорной стали, кг;

$M_{МСТ} = 8,9 \cdot 103 \text{ма} q_a W_\Phi I_{аср} = 1,23$ — масса статорной обмотки, кг;

$M_B = 8,9 \cdot 103 q_B I_{вср} W_B = 0,443$ — масса обмотки возбуждения, кг;

$M_P = 7,8 \cdot 103 \cdot 0,8 (V_2 - q_B I_{вср} W_B) = 0,348$ — масса полюсной системы ротора, кг.

1.10.2 Коэффициент использования по расчетной мощности, Вт/кг, определяется формулой:

$$K_{ИР} = U_d (I_{др} + I_{вм}) / M_\Gamma = 14 (55 + 3,5) / 5,19 = 157,8, \quad (1.136)$$

где $M_\Gamma = K_K M_a = 1,3 \cdot 3,966 = 5,19$ — полная масса, кг;

$K_K = 1,3$ — коэффициент, который равен отношению полной массы к массе активных материалов.

1.10.3 Коэффициент использования по максимальной мощности, Вт/кг, определяется формулой:

$$K_{\text{им}} = [U_d (I_{\text{дм}} + I_{\text{вм}})] / M_{\Gamma} = [14(110 + 3,5)] / 5,19 = 286,39. \quad (1.137)$$

Таблица 1.7- Расчет потерь и КПД

Значение расчетной величины и формула	ед. из м	Значение нагрузочного тока Id, А / соответствующая скорость вращения n, об/мин						
		0 /800	10 /860	20/ 100	30/ 120	35/ 1400	40/ 170	55 /5000
$P_{\alpha} = m \cdot I_{\Phi 1} 2 r \alpha_i$	Вт	0	6,58	26,3 6	59,3 2	80,7 6	105, 4	199,4
$B_j = B_j \cdot n/n_i$	Тл	2,137	1,98	1,71	1,42 5	1,22	1,00 6	0,34
$P_j = 1,6P_{1/50} (B'_j)^2 M_j \sqrt{\omega/50^3}$	Вт	61,85	57,0 1	45,3 2	33,6 7	27,6 1	37,6 9	11,9
$B_z = B_z n/n_i$	Тл	8,83	8,22	7,06	5,88	5,05	4,15	1,41
$P_z = 1,8P_{1/50} (B'_z)^2 K_T M_z \sqrt{\omega/50^3}$	Вт	39,79	34,1	28,1 5	21,1 7	16,9 9	12,5 9	2,51
$P_{\text{оп}} = 0,66K_0 \tau^2 K_{\text{оп}} B_{\delta}^2 \frac{K_{\text{ш}} S_{\text{рн}}}{\sqrt{z/p}} \sqrt{\omega/50^3}$	Вт	0,23· 10-4	0,24 5·10 -4	0,52 8·10 -4	0,69 5·10 -4	0,87 6·10- 4	1,17 2·10 -4	5,9·10-4
$A = 2m W_{\Phi} I_{\Phi} / (\pi D_i)$	А м	0	176 09	352 19	528 28	6163 3	704 38	96852
$P_{\text{ю}} = 0,26K_{\text{of}} K_{\beta 1} (\lambda \tau \cdot 10^{-3}) (t_z / \delta) \frac{K_i S_{\text{рф}}}{\sqrt{z/p}} \sqrt{\omega/50^3}$	Вт	0	0,69 9	1,75	3,45	5,07	7,76	53,89

Продолжение таблицы 1.7

$P_{BH} = 2 \cdot 106 \cdot D_B 4b_B n3i$	Вт	1,13· 10-8	1,22 ·10- 8	1,42 ·10- 8	1,7· 10-8	1,98· 10-8	2,41 · 10- 8	7,1·10-8
$P_{TB} = 1,14(n_p/100)^3(D_p/10)^5(1+5I_p/D_p)C_B \gamma_B$	10 -6 Вт	3,02· 10-5	3,75 ·10- 5	5,9· 10-5	10,1 9·10 -5	16,1 8·10- 5	28,9 8·10 -5	73,7· 10-5
$P_{ТП}$	Вт	5,63	5,69	6,55	7,86	9,17	11,1 3	32,75
$I_{BCP} = I_{di} / 3 = 18,3$	А	0	3,33	6,66	10	11,6 6	13,3 3	18,33
$P_{ВП} = g \Delta U_B I_{BCP}$	Вт	0	12	24	36	42	48	66
$\sum P$	Вт	123,6	129, 07	135, 84	168, 17	176, 35	184, 7	265,83
$\eta = U_d(I_{di} + I_{vm}) / [U_d(I_{di} + I_{vm}) + \sum P]$	%	34,74	72,8 2	82,1 6	84,3 4	85,5 7	86,5 2	85,7

1.10.4 Удельный коэффициент использования, Дж/кг, определяется формулой:

$$K_{уд} = 60U_d(I_{dp} + I_{vm}) / (npM_{\Gamma}) = 60 \cdot 14(55 + 3,5) / 2400 \cdot 5,19 = 3,94 \text{ . (1.138)}$$

2 Тепловой расчёт генератора

2.1 Плотность потока тепла с лобовых частей, Вт/м², определяется формулой:

$$\begin{aligned}\Delta q_n &= \frac{\rho_v \cdot A_{ja} \cdot t_z}{2 \cdot \Pi} = \\ &= \frac{1}{57 \cdot 10^6} \cdot \frac{38 \cdot 10^3 \cdot 23 \cdot 10^6 \cdot 0,008}{2 \cdot 34 \cdot 10^{-3}} = 1803\end{aligned}, \quad (2.1)$$

где $\rho_v = \frac{1}{57 \cdot 10^6}$ – проводимость медного провода, Ом·м;

$\Pi = 34 \cdot 10^{-3}$ – периметр паза, м.

2.2 Тепловой поток на один квадратный метр статорной поверхности, Вт/м², определяется формулой:

$$\begin{aligned}q_c &= (P_{cn} \cdot \frac{l_i}{l_w/2} + P_a + P_z + P_n) / (\pi \cdot D_i \cdot l_i + \pi \cdot D_H \cdot l_i) = \\ &= (350 \cdot \frac{0,032}{0,06l} + 9,56 + 16,5 + 10,5) / (\pi \cdot 0,0966 \cdot 0,032 + \pi \cdot 0,132 \cdot 0,032) = , \\ &= 9,9 \cdot 10^3\end{aligned} \quad (2.2)$$

2.3 Значение превышения температуры статорной поверхности в сравнении с температурой охлаждающего воздуха, °С, определяется формулой:

$$\Delta v_{нов.с} = \frac{q_i}{\alpha(1 + 0,1 \cdot v_p)} = \frac{9,9 \cdot 10^3}{80(1 + 0,8)} = 68, \quad (2.3)$$

где $\alpha = 80$ – коэффициент в зависимости от l_i/τ , Вт/°С м²;

$v_p = 8$ – скорость ротора, м/с .

2.4 Превышение значения температуры лобовых частей статорной обмотки в сравнении с температурой охлаждающего воздуха, °С, определяется формулой:

$$\Delta \vartheta_n = \frac{q_n}{13,3(1 + 0,07 \vartheta_p)} = \frac{1803}{13,3 \cdot (1 + 0,07 \cdot 8)} = 86. \quad (2.4)$$

2.5 Теплоперепад в изоляции паза статорной обмотки, °С, определяется формулой:

$$\begin{aligned} \Delta \vartheta_{\text{из.п}} &= \frac{j_a \cdot A \cdot k_{\phi} \cdot t_z \cdot 0,5 \cdot \delta_{\text{из.п}}}{4,2 \cdot 10^{11} \cdot \Pi \cdot \lambda_{\text{из}}} = \\ &= \frac{23 \cdot 10^6 \cdot 38 \cdot 10^3 \cdot 1,03 \cdot 0,008 \cdot 0,5 \cdot 0,0003}{4,2 \cdot 10^{11} \cdot 0,034 \cdot 2,2 \cdot 10^{-5}} = 3,4 \end{aligned} \quad (2.5)$$

2.5 Превышение температуры статорной обмотки, °С, определяется формулой:

$$\begin{aligned} \Delta \vartheta_{\text{об.ст.}} &= \frac{(\Delta \vartheta_{\text{из}} + \Delta \vartheta_{\text{пов.с}}) \cdot 1_i + (\Delta \vartheta_{\text{из}} + \Delta \vartheta_{\text{л}}) \cdot 1_s}{0,136/2} = \\ &= \frac{(3,4 + 68) \cdot 0,032 + (3,4 + 86) \cdot 0,036}{0,136/2} = 80 \end{aligned} \quad (2.6)$$

3 Вентиляционный расчет

3.1 Количество воздуха необходимое для охлаждения, м³/с, определяется формулой[20. с.201]:

$$V_b = \frac{\sum P_b}{C_b \cdot \Delta \vartheta_b} = \frac{399}{1100 \cdot 20} = 0,018, \quad (3.1)$$

где $\sum P_b = 399$ – отводимые воздухом потери, Вт;

$C_b = 1100$ – теплоемкость воздуха, Дж/(°С·м³);

$\Delta \vartheta_b = 20$ – превышение температуры воздуха, °С;

$\Delta \vartheta_b = 20$ для генераторов с изоляцией нагревостойкости класса В, °С;

3.2 Количество воздуха, доставляемое с помощью вентилятора, м³/с, определяется формулой[19. с.116]:

$$V'_1 = q_o \cdot m \cdot n_H \cdot D_i^2 = 31,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 \cdot 2000 \cdot 0,096^2 = 0,058, \quad (3.2)$$

где $q_o = 31,5 \cdot 10^{-3}$ – коэффициент;

$m = 0,1$ – коэффициент;

$n_H = 2000$ – номинальная частота вращения

$D_i = 0,096$ – диаметр ротора, м;

3.3 Примерное значение напора, развиваемое вентиляционным устройством, Па, определяется формулой:

$$H = 8 \cdot n_H \cdot (D_i)^2 = 8 \cdot 2000 \cdot (0,096)^2 = 147 \quad (3.3)$$

3.4 Мощность, которая расходуется на вентиляцию, Вт, определяется формулой:

$$P_b = 0,175 \cdot \left(\frac{9}{10}\right)^2 \cdot V'_1 = 0,175 \cdot \left(\frac{8}{10}\right)^2 \cdot 0,058 = 0,649 \quad (3.4)$$

Так как $V'_1 \geq V_b$, следовательно, вентилятор обеспечивает условия, необходимые для охлаждения.

Заключение

В данной выпускной квалификационной работе были произведены электромагнитный, тепловой и вентиляционный расчеты генератора, а так же расчет токоскоростной (ТС) характеристики для того, чтобы наглядно продемонстрировать положительное влияние модификации схемы выпрямителя на ТС характеристику генератора. Для этой цели было использовано внедрение дополнительного диодного плеча схему выпрямителя. Таким образом, осуществляется гарантированный рост мощности примерно на 10% от мощности при применении схемы обычного диодного моста Ларионова.

Список использованных источников

1. Жуловян, В. Электрические машины: электромеханическое преобразование энергии. Учебное пособие / Жуловян В., Юрайт, 2017. - 98 с.
2. Клоков, Б. Проектирование электрических машин. Учебник / Б.Клоков , В.Морозкин , Б.Токарев, Под ред. И.Копылова, Юрайт, 2017. - 304 с.
3. Карпенко, Н. Электрические машины. Расчет и конструирование электромагнитных механизмов. Учебное пособие для академического бакалавриата / Н.Карпенко,. Юрайт , 2016. - 254 с.
4. Баклин, В. Электрические машины. Расчет двухполюсных турбогенераторов. Практикум. Учебное пособие / В.Баклин , Юрайт, 2016. - 138 с.
5. Ванурин, В. Электрические машины /В.Ванурин, Лань, 2016. - 304 с.
6. Токарев, Б. Электрические машины. Учебное пособие / Б.Токарев, Альянс, 2016. - 624 с.
7. Игнатович, В. Электрические машины и трансформаторы. Учебное пособие / В.Игнатович, Ш. Ройз, Юрайт, 2016. - 182 с.
8. Гольдберг, О. Инженерное проектирование электрических машин / О.Гольдберг, Л.Макаров, С. Хелемская, Бастет, 2016. - 528 с.
9. Сибикин, М. Производство электрических машин / М.Сибикин, Ю.Сибикин, РадиоСофт, 2014. - 360 с.
10. Алиев, И. Электрические машины. Учебное пособие / И.Алиев, РадиоСофт, 2014. - 448 с.
11. Набиев, Ф. Электрические машины. Учебное пособие / Ф.Набиев; под ред. И.Алиева, ИП РадиоСофт, 2014. - 292 с.
12. Мальц, Э. Электротехника и электрические машины / Э.Мальц, Ю.Мустафаев, Корона-Век, 2013. - 304 с.
13. Лобзин, С. Электрические машины / С.Лобзин, Academia, 2012. - 336 с.

14. Попов, В. Трехфазные, специальные и совмещенные обмотки электрических машин переменного тока (Основы теории и расчетов) / В.Попов, Ю.Петров, Волжский инженерно-педагогический институт (ВИПИ) , 2012. - 339 с.
15. Марек, Е. Обмотки электрических машин постоянного и переменного тока / Е.Марек, Книга по Требованию , 2012. - 98 с.
16. Клоков, Б. Обмотчик электрических машин / Б.Клоков, Высшая школа , 2013. - 280 с.
17. Видмар, М. Теория и работа электрических машин / М.Видмар, Книга по Требованию, 2012 . - 212 с.
18. Гольдберг, О. Инженерное проектирование и САПР электрических машин / О.Гольдберг, И.Свириденко, Academia , 2012. - 560 с.
19. Алиев, И. Электротехнические материалы и изделия. Справочник / И.Алиев, РадиоСофт , 2014. - 332 с.
20. Брускин, Д. Электрические машины и микромашины / Д.Брускин, А.Зорохович, В.Хвостов, Высшая школа, 2012. - 432 с.
21. Influence of pole-arc coefficient on electromagnetic vibration of automobile alternator / F.Wu, Q.Lv, Y.Fang, X.Bao // Power Electronics Systems and Applications (PESA). - 2013. - P. 15.
22. Kamalakannan, D. An alternative solution of automobile alternator with PM rotor machine / D.Kamalakannan // Transportation Electrification Conference (ITEC). - 2015. - P. 7-8.
23. Investigation of total harmonic distortion of a three-phase Cúk rectifier / S.M.Faruk, M.M.Hossain, A.A.Mansur, M.H.Bhuyan // Informatics, Electronics and Vision (ICIEV). - 2016. - P. 13-15.
24. Experimental determination of magnetic characteristics of electrical machines / P.Andrada, E.Martinez, J.I.Perat, J.A.Sanchez, M.Torrent // Industry Applications Conference. - 2012. - P. 10.

25. Sensitivity analysis for induction machine manufacturing tolerances:
Modeling of electrical parameters deviation / H.Khreis, A.Deflorio, W.Lee et al. //
Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). - 2017. - P. 16.