

ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный
университет»
электроэнергетический факультет
кафедра электроснабжения и эксплуатации электрооборудования

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Учебное пособие

Ставрополь, 2020

УДК 621.316

Рецензент:

к.т.н., доцент кафедры ПЭЭСХ СтГАУ С.Н. Антонов

Кобозев В.А., Мельников М.А., Адошев А.И., Ивашина А.В.
Электрические машины : учебное пособие. Ставрополь, 2018. 40 с.

В учебном пособии приведена последовательность расчетов трансформатора сварочного выпрямителя для механизированной сварки, трансформатора для ручной дуговой сварки и характеристик асинхронных электродвигателей при несимметричных питающих напряжениях.

Учебное пособие предназначено для выполнения контрольной работы по дисциплине «Электрические машины» студентами заочной формы обучения электроэнергетического факультета, обучающимися по направлениям подготовки 35.03.06 «Агроинженерия» и 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

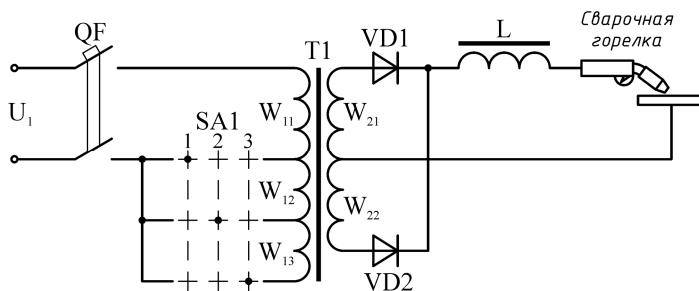
1 Расчет трансформатора сварочного выпрямителя для механизированной сварки

Цель: Освоить методику расчета источников питания сварочной дуги для механизированных способов сварки в защитных газах.

Общие сведения

Источники сварочного тока для механизированной сварки в среде защитных газов (рисунок 1) содержит автоматический выключатель QF, пакетный переключатель SA1, трансформатор T1, вентили VD1, VD2, дроссель L и сварочную горелку. Первичная обмотка W_1 имеет дополнительные секции W_{12} , W_{13} которые последовательно подключаются к сети с помощью переключателя SA1, это позволяет регулировать напряжение холостого хода на вторичной обмотке трансформатора T1. Напряжение с вторичной обмотки W_2 выпрямляется вентилями VD1, VD2 и прикладывается между сварочной горелкой и свариваемой деталью. Дроссель L сглаживает импульсные возмущения сварочного тока, стабилизируя течение сварочного процесса.

Механизированные виды сварки требуют от источника наличие пологопадающих внешних характеристик, которые обеспечиваются использованием сварочных трансформаторов с нормальным рассеянием. Наименьшие потоки рассеяния имеют трансформаторы на тороидальных сердечниках. Регулирование параметров сварочного процесса производится изменением напряжения холостого хода, и скорости подачи электродной проволоки.



**Рисунок 1 – Схема сварочного полуавтомата
Расчет трансформатора**

Исходными величинами для расчета источника являются диапазон сварочного тока I_{min} , I_{max} , напряжение питающей сети U_1 , и продолжительность включения источника $ПВ, \%$. Расчет параметров трансформатора и выбор вентиля выпрямителя производится по основным коэффициентам схемы выпрямления, характеризующие соотношения токов и напряжений на элементах схемы выпрямления по отношению к выпрямленному напряжению и току, таблица 1.

Таблица 1 – Основные коэффициенты схемы выпрямления

Вентили				Трансформатор			
$\frac{U_{обр.м}}{U_d}$	$\frac{I_m}{I_d}$	$\frac{I_a}{I_d}$	$\frac{I_{cp}}{I_d}$	$\frac{U_2}{U_d}$	$\frac{I_2}{I_d}$	$\frac{I_1 k_{mp}}{I_d}$	$\frac{P_{mp}}{P_d}$
3,14	1,0	0,71	0,5	1,11	0,71	1,11	1,34

1 Напряжение сварочной дуги для механизированной сварки,
В

$$U_{\partial.max} = 18 + 0,04 I_{\partial.max}, \quad (1)$$

$$U_{\partial.min} = 18 + 0,04 I_{\partial.min}. \quad (2)$$

где $I_{\partial.max}, I_{\partial.min}$ – значения тока сварочной дуги, А.

2 Напряжение холостого хода источника, В

$$U_{d0.max} = U_{\partial.max} + (\rho_u \cdot I_{\partial.max}), \quad (3)$$

$$U_{d0.min} = U_{\partial.min} + (\rho_u \cdot I_{\partial.min}). \quad (4)$$

где ρ_u – жесткость внешней характеристики сварочного выпрямителя, согласно [1] $\rho_u = (0,03...0,05) B/A$.

3 Напряжение холостого хода трансформатора, B

$$U_{20.max} = 1,11 \cdot U_{d0.max}, \quad (5)$$

$$U_{20.min} = 1,11 \cdot U_{d0.min}. \quad (6)$$

4 Расчётная мощность трансформатора для двух режимов, $кВт$

$$S_{min} = U_{20.min} I_{d.min} \cdot 10^{-3}, \quad (7)$$

$$S_{max} = U_{20.max} I_{d.max} \sqrt{\frac{ПН}{100\%}} \cdot 10^{-3}, \quad (8)$$

где $ПН$ – продолжительность включения нагрузки, (см. задание), %.

Дальнейший расчет производим для наибольшей мощности.

5 Определяем значение э.д.с. витка для большей мощности, B

$$e = 0,55 + 0,095 \cdot S, \quad (9)$$

где S – большее значение мощности из выражений (7), (8), $кВт$.

6 Число витков обмоток при максимальном выходном напряжении

$$W_{11} = \frac{U_1}{e}, \quad W_{21} = W_{22} = \frac{U_{20.max}}{e}. \quad (10)$$

где U_1 – напряжение питающей сети, (см. задание), B .

7 Коэффициент трансформации

$$k_{mp} = \frac{W_{11}}{W_{21}}. \quad (11)$$

8 Количество витков первичной обмотки для режима минимального выходного напряжения.

$$W_1 = W_{11} + W_{12} + W_{13} = \left(\frac{U_1}{U_{20.min}} \right) W_{21}. \quad (12)$$

9 Количество витков дополнительных первичных обмоток

$$W_{12} = W_{13} = \frac{W_1 - W_{11}}{2}. \quad (13)$$

10 Расчетные сечения проводов обмоток без изоляции, мм²

$$q_{1.p} = k_{I.1} \frac{I_{d.\partial l}}{k_{mp} j}, \quad q_{2.p} = k_{I.2} \frac{I_{d.\partial l}}{j}. \quad (14)$$

где k_1, k_2 – коэффициенты использования обмоток трансформатора по току, таблица 1, $k_{I.1} = I_1 k_{mp} / I_d = 1,11$, $k_{I.2} = I_2 / I_d = 0,71$;

j – плотность тока, $j_{Cu} = 2,5 \dots 5,0 \text{ A/мм}^2$, $j_{Al} = 1,6 \dots 3,2 \text{ A/мм}^2$ большие значения выбираются при наличии принудительной вентиляции;

$I_{d.\partial l}$ – значение длительно допустимого выпрямленного тока, А.

$$I_{d.\partial l} = I_{\partial.max} \sqrt{\frac{ПН}{100\%}}, \quad \text{при } S_{max} > S_{min}, \quad (15)$$

$$I_{d.\partial l} = I_{\partial.min}, \quad \text{при } S_{max} < S_{min}. \quad (16)$$

Выбираем обмоточные провода из стандартного ряда (таблица А.1) и заполняем таблицу 2. Предварительно выберем марку электротехнической стали для магнитопровода и на основании таблиц Б1, Б2 заполним таблицу 3.

11 Сечение стержня магнитопровода, см²

$$Q_c = \frac{U_1}{4,44 k_c f W_1 B_m} \cdot 10^4, \quad (17)$$

где k_c – коэффициент заполнения магнитопровода сталью, $k_c = 0,86 \dots 0,97$;

f – частота тока питающей сети, $f = 50 \text{ Гц}$;

Таблица 2 – Параметры обмоточных проводов

Параметр	Об- зн.	Обмотка W_1	Обмотка W_2
Сечение голого проводника, $мм^2$	q_i		
Диаметр голого проводника, $мм$	d_i		
Диаметр проводника в изоляции, $мм$	$d_{i.из}$		
Сечение проводника в изоляции, $мм^2$	$q_{i.из}$		

Таблица 3 – Параметры электротехнической стали

Параметр	Значение
Марка стали	
Толщина листа, $мм$	
Амплитуда магнитной индукции $B_m, Тл$	
Удельные потери в стали $P_{(**/50)}, Вт/кг$	
Напряжённость магнитного поля $H_m, А/см$	

12 Ширина магнитопровода, $мм$

$$a_c = Q_c / b_c. \quad (18)$$

где b_c – толщина магнитопровода $b_c = [52, 64, 72] мм$.

13 Площадь окна магнитопровода, $мм^2$

$$Q_{ок} = \frac{q_1 W_1 + q_2 (W_{21} + W_{22})}{k_{ок}}, \quad (19)$$

где $k_{ок}$ – коэффициент заполнения сечения окна, $k_{ок} = 0,3...0,4$.

14 Внутренний диаметр сердечника, $мм$

$$d = \sqrt{\frac{4 Q_{ок}}{\pi}}. \quad (20)$$

15 Внешний диаметр сердечника, $мм$

$$D = d + 2a. \quad (21)$$

16 Обратное напряжение вентиляй выпрямителя, B

$$U_{обр.VS} \geq \left(\frac{U_{обр.m}}{U_d} \right) \cdot U_{d0.max}. \quad (22)$$

17 Максимальное значение тока вентиляй, A

$$I_{m.VS} \geq \left(\frac{I_a}{I_d} \right) \cdot I_{d.max}. \quad (23)$$

18 Вес тороидального сердечника, $кг$

$$G_c = k_c Q_c \gamma_c l_c \cdot 10^{-3}, \quad (24)$$

где γ_c – удельный вес стали, $\gamma_c = 7,6 \text{ з/см}^3$;

l_c – средняя длина магнитной линии, $l_c = \pi(D - a_c)$, $см$.

19 Вес обмоток трансформатора, $кг$

$$G_{M.i} = \gamma_M Q_{Mi} W_i l_{Wi} \cdot 10^{-6}, \quad (25)$$

где γ_M – удельный вес меди, $\gamma_M = 8,89 \text{ з/см}^3$;

l_{Wi} – средняя длина витка обмотки, $мм$;

Q_{Mi} – суммарное сечение обмотки, $мм^2$.

$$Q_{M.1} = q_1 W_1, \quad (26)$$

$$Q_{M.2} = q_2 (W_{21} + W_{22}).$$

20 Количество слоев и витков в слое для первичной обмотки

$$N_{w.1} = 0,95 \frac{\pi(d - 2a_w)}{d_{1.уз}}, \quad (27)$$

$$N_{сл.1} = \frac{W_1}{N_{w.1}}, \quad (28)$$

где a_w – толщина каркаса, $a_w = 0,5 \dots 1,5 \text{ мм}$.

21 Количество слоев и витков в слое для вторичной обмотки

$$N_{w.2} = 0,95 \frac{\pi(d - 2(a_w + N_{сл.1}d_{1.уз}))}{d_{2.уз}}, \quad (29)$$

$$N_{сл.2} = \frac{W_{21} + W_{22}}{N_{w.2}}. \quad (30)$$

22 Длина внутренних витков первичной обмотки, мм

$$l_{внутр.1} = 2(b_c + a_c + 2a_w) - 1,72 \cdot a_w. \quad (31)$$

23 Длина внешних витков первичной обмотки, мм

$$l_{внеш.1} = 2(b_c + a_c + 2a_w + 2N_{сл.1}d_{1.из}) - 1,72(a_w + N_{сл.1}d_{1.из}). \quad (32)$$

24 Средняя длина витка первичной обмотки, мм

$$l_{ср.1} = \frac{l_{внутр.1} + l_{внеш.1}}{2}. \quad (33)$$

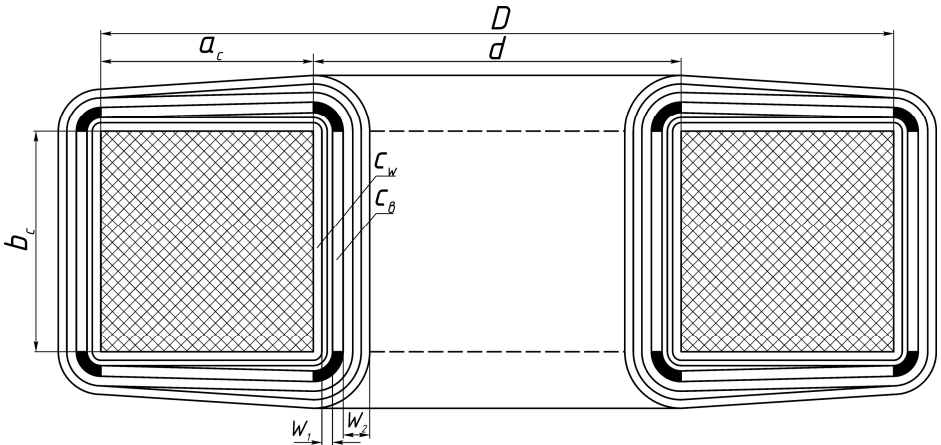


Рисунок 2 – Эскиз обмоток силового трансформатора

25 Длина внутренних витков вторичной обмотки, мм

$$l_{внутр.2} = 2(b_c + a_c + 2a_w + 2N_{сл.1}d_{1.из} + 2c_b) - 1,72(a_w + N_{сл.1}d_{1.из} + c_b), \quad (34)$$

где c_b – ширина вентиляционных каналов, $c_b = 4 \dots 6$ мм .

26 Длина внешних витков вторичной обмотки, мм

$$l_{внеш.2} = 2(b_c + a_c + 2a_w + 2N_{сл.1}d_{1.из} + 2c_b + 2N_{сл.2}d_{2.из}) - 1,72(a_w + N_{сл.1}d_{1.из} + c_b + N_{сл.2}d_{2.из}). \quad (35)$$

27 Средняя длина витка вторичной обмотки, мм

$$l_{cp.2} = \frac{l_{внутр.2} + l_{внеш.2}}{2}. \quad (36)$$

28 Суммарная масса обмоток трансформатора, кг

$$G_M = G_{M.1} + G_{M.2}.$$

29 Активное сопротивление первичной обмотки трансформатора, Ом

$$r_{1.min} = 1,05 \frac{\rho_{75} l_{cp.1} W_1}{q_1} \cdot 10^{-3}, \quad (37)$$

$$r_{1.max} = 1,05 \frac{\rho_{75} l_{cp.1} W_{11}}{q_1} \cdot 10^{-3}, \quad (38)$$

где ρ_{75} – удельное сопротивление меди при температуре

$$t = 75^0 C, \quad \rho_{75} = 0,02135 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}};$$

30 Активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора, Ом

$$r_2 = 1,05 \frac{\rho_{75} l_{cp.2} (W_{21} + W_{22})}{q_2} \cdot 10^{-3}, \quad (38)$$

31 Активное сопротивление короткого замыкания, Ом

$$r_{k.min} = r_2 + \frac{r_{1.min}}{k_{mp}^2}, \quad (39)$$

$$r_{k.max} = r_2 + \frac{r_{1.max}}{k_{mp}^2}. \quad (40)$$

32 Напряжение сварочной дуги, В

$$U_{min} = U_{d0.min} - I_{min} r_{k.min}, \quad (41)$$

$$U_{max} = U_{d0.max} - I_{max} r_{k.max}. \quad (42)$$

Выполнение условий $U_{min} > U_{d.min}$ и $U_{max} > U_{d.max}$ обеспечит быстрое зажигание и устойчивое горение электрической дуги в противном случае необходимо уточнить расчёт сопротивлений трансформатора.

33 Потери в обмотках трансформатора, Вт

$$P_{m.1} = (k_{I.1} I_{d.\partial l})^2 r_1, \quad (43)$$

$$P_{m.2} = (k_{I.2} I_{d.\partial l})^2 r_2, \quad (44)$$

34 Активные потери в стали трансформатора, B_m

$$P_c = P_{(**/50)} G_c (B_m / B_n)^2, \quad (45)$$

где $P_{(**/50)}$ – удельные потери в стали (табл. Б.1, Б2), $B_m / \kappa \Gamma$;

B_n – нормированное значение магнитной индукции (табл. Б.1, Б2), $Tл$,

35 Коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = \frac{S}{S + P_{m.1} + P_{m.2} + P_c}. \quad (46)$$

36 Ток холостого хода трансформатора, A

$$I_{xx} = \sqrt{I_{xx.a}^2 + I_{xx.p}^2}. \quad (47)$$

37 Активная составляющая тока холостого хода, A

$$I_{xx.a} = P_c / U_1. \quad (48)$$

38 Реактивная составляющая тока холостого хода, A

$$I_{xx.p} = \frac{H_m l_c}{\sqrt{2} W_{11}}, \quad (49)$$

39 Относительная величина тока холостого хода, %

$$I_{xx}^* = \frac{I_{xx} k_{mp}}{1,11 \cdot I_{d.\partial l}} 100\%. \quad (50)$$

Для сварочных трансформаторов значение тока холостого хода должно находиться в пределах $I_0 = 0,5...1,5 A$. В случае меньшего значения наблюдается неэффективное использование первичной обмотки трансформатора, а в случае большего значения возможен перегрев сердечника трансформатора за счет потерь холостого хода.

2 Расчет трансформатора для ручной дуговой сварки

Цель: Освоить методику расчета трансформаторов для ручной дуговой сварки штучным электродом.

Общие сведения

Источник для ручной дуговой сварки штучными электродами на переменном токе должен иметь крутопадающую внешнюю характеристику, которую возможно получить, используя трансформатор с увеличенным рассеянием. Схема источника (рисунок 1) содержит автоматический выключатель QF, силовой трансформатор T1 и пакетный переключатель SA.

Регулирование сварочного тока осуществляется за счет изменения магнитной связи между первичной W_1 и вторичной W_2 обмотками трансформатора путем перераспределения по стержням магнитопровода их отдельных частей с помощью переключателя SA, рисунок 1. Для регулирования тока достаточно четыре ступени.

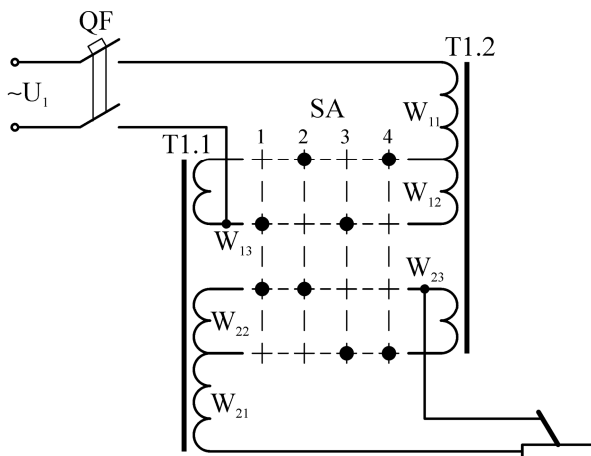


Рисунок 1 – Схема электрическая принципиальная сварочного трансформатора

1 Расчет конструкции трансформатора

1.1 Напряжения сварочной дуги для двух режимов, В

$$U_{\partial.min} = 20 + 0,04 I_{\partial.min}, \quad (1)$$

$$U_{\partial.max} = 20 + 0,04 I_{\partial.max}, \quad (2)$$

где $I_{\partial.min}, I_{\partial.max}$ – минимальный и максимальный ток дуги, А.

1.2 Напряжение холостого хода трансформатора, В

$$U_{20} = (1,8...2,5) U_{\partial}, \quad (3)$$

где U_{∂} – меньшее значение напряжения сварочной дуги из (1), (2), В.

1.3 Расчётная мощность трансформатора для двух режимов, кВт

$$S_{min} = U_{20} I_{\partial.min} \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

$$S_{max} = U_{20} I_{\partial.max} \sqrt{\frac{ПН}{100\%}} \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

где $ПН$ – продолжительность включения нагрузки, (см. задание), %.

1.4 Определяем значение э.д.с. витка для большей мощности

$$e = 0,55 + 0,095 \cdot S, \quad (6)$$

где S – большее значение мощности из выражений (4), (5), кВт.

1.5 Число витков в основных первичной и вторичной обмотках

$$W_1 = \frac{U_1}{e}, \quad W_2 = \frac{U_{20}}{e}, \quad (7)$$

где U_1 – напряжение питающей сети, (см. задание), В.

1.6 Коэффициент трансформации

$$k_{mp} = \frac{W_1}{W_2}. \quad (8)$$

1.7 Расчетные сечения проводов обмоток без изоляции, мм²

$$q_{1.p} = \frac{k_0 I_{2.дл}}{k_{mp} j}, \quad q_{2.p} = \frac{I_{2.дл}}{j}, \quad (9)$$

где k_0 – коэффициент, учитывающий ток холостого хода, $k_0 = 1,1$;

j – плотность тока $j_{Cu} = 2,5...5,0 \text{ A/мм}^2$, $j_{Al} = 1,6...3,2 \text{ A/мм}^2$ большие значения выбираются при наличии принудительной вентиляции;

$I_{2.дл}$ – длительно допустимый ток вторичной обмотки, А;

$$I_{2.д} = I_{д.макс} \sqrt{\frac{ПН}{100\%}}, \quad \text{при } S_{max} > S_{min}, \quad (10)$$

$$I_{2.д} = I_{д.мин}, \quad \text{при } S_{max} < S_{min}. \quad (11)$$

1.8 По таблицам А.1 и А.2 выбираем провода обмоток по рассчитанным сечениям. Для первичной обмотки с ее большим количеством витков и меньшим сечением применяют круглый провод, а для вторичной обмотки применяют провод прямоугольного сечения. Параметры выбранных проводов заносим в таблицу 1

Таблица 1 – Размеры обмоточных проводов

Первичная обмотка			Вторичная обмотка		
$q_1, \text{мм}^2$	$d_1, \text{мм}$	$d_{1uz}, \text{мм}$	$q_2, \text{мм}^2$	$a_2 b_2, \text{мм}$	$a_{2uz} b_{2uz}, \text{мм}$

1.9 Сечение стержня магнитопровода, см^2

$$Q_c = \frac{U_1}{4,44 k_3 f W_1 B_m} 10^4, \quad (12)$$

где k_3 – коэффициент заполнения магнитопровода сталью $k_3 = 0,86...0,97$;

f – частота тока питающей сети, $f = 50 \text{ Гц}$;

B_m – амплитуда магнитной индукции, Тл, (табл. Б.1 и Б.2).

1.10 Высота окна магнитопровода трансформатора, мм

$$h_{ок} = \sqrt{\frac{k k_{дооб} (q_1 W_1 + q_2 W_2)}{k_{ок}}}, \quad (13)$$

где k – оптимальное отношение высоты и ширины окна, $k = 2...3$;

$k_{дооб}$ – коэффициент увеличения числа витков за счет дополнительных обмоток для регулирования сварочного тока, $k_{дооб} = 1,15...1,3$;

$k_{ок}$ – коэффициент заполнения окна обмоткой, $k_{ок} = 0,3...0,4$.

Исходя из рассчитанных параметров, предварительно определяем основные геометрические размеры сварочного трансформатора, таблица 2

1.11 Число витков в слое обмоток

$$N_{w.1} = \frac{k_{n.1} h_{об}}{d_{1.из}}, \quad N_{w.2} = \frac{k_{n.1} h_{об}}{b_{2.из}}, \quad (14)$$

где $k_{n.1}$ – коэффициент, учитывающий неровность проводов вдоль направления намотки, $k_{n.1} = 0,93...0,98$.

Количество витков округляют до целого меньшего числа

1.12 Число слоев в обмотках

$$N_{1.сл} = \frac{W_1}{N_{w.1}}, \quad N_{2.сл} = \frac{W_2}{N_{w.2}}. \quad (15)$$

Количество слоев округляем до целого большего числа. Дополнительные обмотки наматываются поверх основных, в один слой.

1.13 Ширина окна магнитопровода, мм

$$a_{ок} = a_{1.ок} + a_{2.ок} + c_{ок}, \quad (16)$$

где $a_{1.ок}, a_{2.ок}$ – толщина катушек находящиеся внутри магнитопровода, мм

$$a_{1.ок} = k_{n.2} (d_{1.из} N_{1.сл} + a_{2.из}) + n_{в.1} c_{из} + c_w, \quad (17)$$

$$a_{2.ок} = k_{n.2} (a_{2.из} N_{2.сл} + d_{1.из}) + n_{в.2} c_{из} + c_w, \quad (18)$$

где $n_{e.1}, n_{e.2}$ – число вентиляционных каналов в катушках;
 $k_{n.2}$ – коэффициент, учитывающий неровность проводов поперек направления намотки, $k_{n.2} = 1,1 \dots 1,15$.

На основании полученных размеров необходимо изобразить на миллиметровке эскиз катушек трансформатора в масштабе 1:1, рисунок 2.

Таблица 2 – Геометрические размеры трансформатора

Параметр	Обозн.	Значение
Толщина стержня, мм	b_c	54 мм при $Q_c \leq 25 \text{ см}^2$ 64 мм при $Q_c = 25 \dots 50 \text{ см}^2$ 72 мм при $Q_c \geq 50 \text{ см}^2$
Ширина стержня, мм	a_c	$a_c = Q_c / b_c$
Толщина каркаса катушки, мм	c_w	3...6 мм
Высота магнитопровода, мм	h_m	$h_m = h_{ок} + 2 a_c$
Ширина магнитопровода, мм	a_m	$a_m = 2 a_c + a_{ок}$
Ширина обмотки, мм	$h_{об}$	$h_{об} = h_{ок} - 2 c_w$
Изоляционные расстояния, мм	$c_{ок}$	6...10 мм
Толщина изоляции обмоток в окне, мм	$c_{из}$	0,5...1 мм
Толщина вентиляционных каналов в наружных частях обмоток, мм	c_v	4...8 мм

2 Проверочный расчёт магнитной системы

2.1 Средняя длина силовых магнитных линий, см

$$l_{cp} = (2(h_{ок} + a_{ок}) + \pi a_c) \cdot 10^{-2}. \quad (19)$$

2.2 Напряженность магнитного поля в немагнитных зазорах,

A/м

$$H_v = \frac{B_m}{\mu_0 \sqrt{2}}. \quad (20)$$

2.3 Намагничивающая сила первичной обмотки, A

$$F_1 = (H_1 l_{cp} + H_g n_g l_g) \cdot 10^{-3}, \quad (21)$$

где H_1 – напряженность магнитного поля в магнитопроводе, таблицы 6, 7;

n_g – количество немагнитных зазоров в магнитопроводе,

$n_g = 2$;

l_g – длина немагнитного зазора, $l_g = (0,015 \dots 0,02) \cdot 10^{-2}$ см

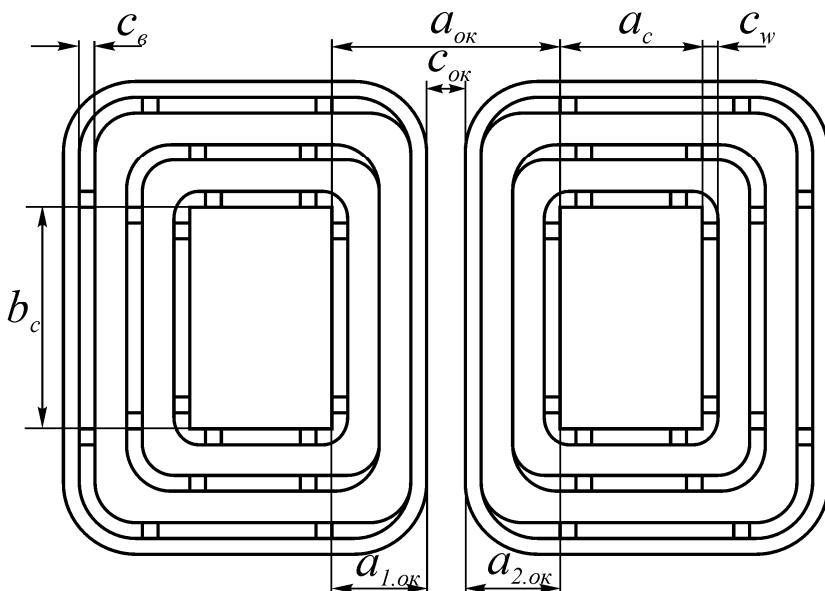


Рисунок 2 – Эскиз трансформатора с конструкцией катушек в разрезе

2.4 Намагничивающий ток первичной обмотки, A

$$I_{1,\mu} = \frac{F_1}{W_1}. \quad (22)$$

2.5 Вес сердечника трансформатора, кг

$$m_{cm} = \gamma_{cm} k_z l_{cp} Q_c, \quad (23)$$

где γ_{cm} – удельный вес электротехнической стали

$$\gamma_{cm} = 7,9 \text{ кг/см}^3 ;$$

2.6 Потери в сердечнике трансформатора, $Вт$

$$\Delta P_{cm} = k_{n.2} P_{1,7/50} m_{cm}, \quad (24)$$

где $P_{1,7/50}$ – удельные потери в электротехнической стали (таблицы 6, 7).

2.7 Активная составляющая тока холостого хода трансформатора, A

$$I_{0.a} = \frac{\Delta P_{cm}}{U_1}. \quad (25)$$

2.8 Полный ток холостого хода трансформатора, A

$$I_0 = \sqrt{I_{1.\mu}^2 + I_{0.a}^2}. \quad (26)$$

Для сварочных трансформаторов значение тока холостого хода должно находиться в пределах $I_0 = 0,5...1,5 A$. В случае меньшего значения наблюдается неэффективное использование первичной обмотки трансформатора, а в случае большего значения возможен перегрев сердечника трансформатора за счет потерь холостого хода.

3 Расчёт сопротивлений короткого замыкания

3.1 Индуктивные сопротивления трансформатора в режимах максимального и минимального тока, $Ом$

$$x_{к. max} = 0,9 \frac{\sqrt{U_{20}^2 - U_{д. max}^2}}{I_{max}},$$

$$x_{к. min} = 0,9 \frac{\sqrt{U_{20}^2 - U_{д. min}^2}}{I_{min}}. \quad (27)$$

3.2 Предварительное значение коэффициента распределения

$$k_{n.p} = \sqrt{\frac{x_{к. max}}{x_{к. min}}}. \quad (28)$$

3.3 Принципиально возможно разделение как первичных, так и вторичных обмоток, или и тех и других одновременно, а степень разделения характеризуется коэффициентом распределения

$$k_p = \frac{W_{11}}{W_1} - \frac{W_{21}}{W_2} = \frac{W_{22}}{W_2} - \frac{W_{12}}{W_1}, \quad (29)$$

где $W_1 = W_{11} + W_{12} = W_{11} + W_{13}$,

$$W_2 = W_{21} + W_{22} = W_{21} + W_{23}.$$

Предусматриваем в первичной обмотке дополнительные витки $W_{12} = W_{13} \approx (0,1...0,3)W_1$, а во вторичной – $W_{22} = W_{23} \approx (0,2...0,4)W_2$, заполняем таблицу 3 и определяем коэффициенты распределения на каждой ступени регулирования сварочного тока. Подбирая количество дополнительных витков в обмотках трансформатора добиться равенства коэффициента распределения полученного по формуле (28) и коэффициента распределения в режиме № 4.

Таблица 3 – Параметры обмоток по ступеням регулирования

№	W_{11}	W_{12}	W_{13}	W_{21}	W_{22}	W_{23}	k_p
1	$W_1 - W_{12}$		0	$W_2 - W_{22}$		0	1
2	$W_1 - W_{13}$	0		$W_2 - W_{22}$		0	
3	$W_1 - W_{12}$		0	$W_2 - W_{23}$	0		
4	$W_1 - W_{13}$	0		$W_2 - W_{23}$	0		

3.4 Толщина лобовых частей обмоток по стержням трансформатора, мм

$$a_{1.л\text{об}} = k_{n.2} (d_{1.мз} N_{1.сл} + a_{2.мз}) + n_{в.1} c_в + c_w, \quad (30)$$

$$a_{2.л\text{об}} = k_{n.2} (a_{2.мз} N_{2.сл} + d_{1.мз}) + n_{в.2} c_в + c_w. \quad (31)$$

3.5 Среднее значение толщины лобовых частей обмоток, мм

$$a_{л\text{об}} = \frac{a_{1.л\text{об}} + a_{2.л\text{об}}}{2}. \quad (32)$$

4 Расчет активных сопротивлений

Основная первичная обмотка $W_1 = W_{11} + W_{12}$ на стержне

Т1.2

4.1 Толщина обмотки в окне, мм

$$a_{1.ок} = k_{п.2} d_{1.из} N_{сл.1}. \quad (33)$$

4.2 Толщина обмотки в лобовой части, мм

$$a_{1.лоб} = a_{1.ок} + c_{\sigma}. \quad (34)$$

4.3 Внутренний радиус обмотки, мм

$$R_{1.внутр} = c_w. \quad (35)$$

4.4 Внешний радиус основной обмотки, мм

$$R_{1.внеш} = \frac{a_{1.ок} + a_{1.лоб}}{2}. \quad (36)$$

4.5 Внутренняя толщина катушки, мм

$$a_{к.1.внутр} = a_c + 2c_w. \quad (37)$$

4.6 Внешняя толщина катушки, мм

$$a_{к.1.внеш} = a_{к.1.внутр} + a_{1.ок} + a_{1.лоб}. \quad (38)$$

4.7 Внутренняя ширина катушки, мм

$$b_{к.1.внутр} = b_c + 2c_w. \quad (39)$$

4.8 Внешняя ширина катушки, мм

$$b_{к.1.внеш} = b_{к.1.внутр} + 2a_{1.лоб}. \quad (40)$$

4.9 Длина внутреннего витка обмотки, мм

$$l_{1.внутр} = 2(a_{к.1.внутр} + b_{к.1.внутр}) - 1,72R_{внутр}. \quad (41)$$

4.10 Длина внешнего витка обмотки, мм

$$l_{1.внеш} = 2(a_{к.1.внеш} + b_{к.1.внеш}) - 1,72R_{внеш}. \quad (42)$$

4.11 Средняя длина витка обмотки, мм

$$l_{1.ср} = \frac{l_{1.внутр} + l_{1.внеш}}{2}. \quad (43)$$

Основная вторичная обмотка $W_2 = W_{21} + W_{22}$ на стержне

Т1.1

4.12 Толщина обмотки в окне, мм

$$a_{2.ок} = k_{n.2} a_{2.из} N_{сл.2}. \quad (44)$$

4.13 Толщина обмотки в лобовой части, мм

$$a_{2.лоб} = a_{2.ок} + c_в. \quad (45)$$

4.14 Внутренний радиус обмотки, мм

$$R_{2.внутр} = c_w. \quad (46)$$

4.55 Внешний радиус обмотки, мм

$$R_{2.внеш} = \frac{a_{2.ок} + a_{2.лоб}}{2}. \quad (47)$$

4.16 Внутренняя толщина катушки, мм

$$a_{к.2.внутр} = a_c + 2c_w. \quad (48)$$

4.17 Внешняя толщина катушки, мм

$$a_{к.2.внешн} = a_{к.2.внутр} + a_{2.ок} + a_{2.лоб}. \quad (49)$$

4.18 Ширина каркаса катушки, мм

$$b_{к.2.внутр} = b_c + 2c_w. \quad (50)$$

4.19 Ширина обмотки, мм

$$b_{к.2.внеш} = b_{к.2.внутр} + 2a_{2.лоб}. \quad (51)$$

4.20 Длина внутреннего слоя основной обмотки, мм

$$l_{2.внутр} = 2(a_{к.2.внутр} + b_{к.2.внутр}) - 1,72R_{внутр}. \quad (52)$$

4.21 Длина внешнего слоя основной обмотки, мм

$$l_{2.внеш} = 2(a_{к.2.внешн} + b_{к.2.внешн}) - 1,72R_{внешн}. \quad (53)$$

4.22 Средняя длина основной обмотки, мм

$$l_{2.ср} = \frac{l_{2.внутр} + l_{2.внеш}}{2}. \quad (54)$$

Дополнительная вторичная обмотка W_{23} на стрелке Т1.2

4.23 Толщина обмотки, мм

$$a_{23.ок} = a_{23.лоб} = k_{n.2} a_{2.из}. \quad (55)$$

4.24 Внутренний радиус обмотки, мм

$$R_{23.внутр} = \frac{a_{1.ок} + c_{из} + a_{1.лоб} + c_в + 2c_w}{2}. \quad (56)$$

4.25 Внешний радиус обмотки, мм

$$R_{23.внеш} = R_{23.внутр} + a_{23.лоб}. \quad (57)$$

4.26 Внутренняя толщина обмотки, мм

$$a_{к.23.внутр} = a_{к.1.внеш} + c_{из} + c_{в}. \quad (58)$$

4.27 Внешняя толщина обмотки, мм

$$a_{к.23.внеш} = a_{к.23.внутр} + 2a_{23.лоб}. \quad (59)$$

4.28 Внутренняя ширина обмотки, мм

$$b_{к.23.внутр} = b_{к.1.внеш} + 2c_{в}. \quad (60)$$

4.29 Внешняя ширина обмотки, мм

$$b_{к.23.внеш} = b_{к.23.внутр} + 2a_{23.ок}. \quad (61)$$

4.30 Внутренняя длина витка обмотки, мм

$$l_{23.внутр} = 2(a_{к.23.внутр} + b_{к.23.внутр}) - 1,72R_{23.внутр}. \quad (62)$$

4.31 Внешняя длина витка обмотки, мм

$$l_{23.внеш} = 2(a_{к.23.внеш} + b_{к.23.внеш}) - 1,72R_{23.внеш}. \quad (63)$$

4.32 Средняя длина витка обмотки, мм

$$l_{23.ср} = \frac{l_{23.внутр} + l_{23.внеш}}{2}. \quad (64)$$

Дополнительная первичная W_{13} обмотка на стрежне Т1.1

4.33 Толщина обмотки, мм

$$a_{13.ок} = a_{13.лоб} = k_{п.2} d_{из}. \quad (65)$$

4.34 Внутренний радиус обмотки, мм

$$R_{13.внутр} = \frac{a_{2.ок} + c_{из} + a_{2.лоб} + c_{в} + 2c_{w}}{2}. \quad (66)$$

4.35 Внешний радиус обмотки, мм

$$R_{13.внеш} = R_{13.внутр} + a_{13.лоб}. \quad (67)$$

4.36 Внутренняя толщина обмотки, мм

$$a_{к.13.внутр} = a_{к.2.внеш} + c_{из} + c_{в}. \quad (68)$$

4.37 Внешняя толщина обмотки, мм

$$a_{к.13.внеш} = a_{к.13.внутр} + 2a_{13.лоб}. \quad (69)$$

4.38 Внутренняя ширина обмотки, мм

$$b_{к.13.внутр} = b_{к.2.внеш} + 2c_в. \quad (70)$$

4.39 Внешняя ширина обмотки, мм

$$b_{к.13.внеш} = b_{к.13.внутр} + 2a_{13.ок}. \quad (71)$$

4.40 Внутренняя длина витка обмотки, мм

$$l_{13.внутр} = 2(a_{к.13.внутр} + b_{к.13.внутр}) - 1,72R_{13.внутр}. \quad (72)$$

4.41 Внешняя длина витка обмотки, мм

$$l_{13.внеш} = 2(a_{к.13.внеш} + b_{к.13.внеш}) - 1,72R_{13.внеш}. \quad (73)$$

4.42 Средняя длина витка обмотки, мм

$$l_{13.ср} = \frac{l_{13.внутр} + l_{13.внеш}}{2}. \quad (74)$$

Длина проводников обмоток по режимам

4.43 Длина первичной обмотки на 1-й и 3-й ступени регулирования, м

$$l_{w1.min} = l_{1.ср} W_1 \cdot 10^{-3}. \quad (73)$$

4.44 Длина первичной обмотки на 2-й и 4-й ступени регулирования, м

$$l_{w1.max} = (l_{1.ср} W_{11} + l_{13.ср} W_{13}) \cdot 10^{-3}. \quad (74)$$

4.45 Длина вторичной обмотки на 1-й и 2-й ступени регулирования, м

$$l_{w2.min} = l_{2.ср} W_2 \cdot 10^{-3}. \quad (75)$$

4.46 Длина вторичной обмотки на 3-й и 4-й ступени регулирования, м

$$l_{w2.max} = (l_{2.ср} W_{21} + l_{23.ср} W_{23}) \cdot 10^{-3}. \quad (76)$$

4.47 Активное сопротивление обмоток при минимальном токе, Ом

$$r_{1.min} = p_{75} \frac{l_{w1.min}}{q_1} k_д, \quad (77)$$

$$r_{2.min} = p_{75} \frac{l_{w2.min}}{q_2} k_д, \quad (78)$$

где p_{75} – удельное сопротивление меди при $t = +75^\circ\text{C}$,

$$p_{75} = 0,02135 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}};$$

k_δ – коэффициент добавочных потерь, $k_\delta = 1,05$.

4.48 Активное сопротивление обмоток при максимальном токе, Ом

$$r_{1.\text{max}} = p_{75} \frac{l_{w1.\text{max}}}{q_1} k_\delta, \quad (79)$$

$$r_{2.\text{max}} = p_{75} \frac{l_{w2.\text{max}}}{q_2} k_\delta. \quad (80)$$

4.49 Активное сопротивление короткого замыкания трансформатора

$$r_{к.\text{min}} = r_{2.\text{min}} + \frac{r_{1.\text{min}}}{k_{mp}^2}, \quad (81)$$

$$r_{к.\text{max}} = r_{2.\text{max}} + \frac{r_{1.\text{max}}}{k_{mp}^2}. \quad (82)$$

5 Проверка по допустимой температуре нагрева

5.1 Потери мощности в обмотках при максимальном токе

$$\Delta P_{м.1} = I_{1.\text{max}}^2 r_{1.\text{max}} = \left(I_0 + \frac{I_{2.\text{max}}}{k_{mp}} \right)^2 r_{1.\text{max}}, \quad (83)$$

$$\Delta P_{м.2} = I_{2.\text{max}}^2 r_{2.\text{max}}. \quad (84)$$

5.2 Обмотки распределены по стержням, поэтому потери в катушках находим с учётом находящихся на них частей обмоток

$$\Delta P_{кат.1} = \Delta P_{м.1} \frac{W_{11}}{W_1} + \Delta P_{м.2} \frac{W_{21}}{W_2}, \quad (85)$$

$$\Delta P_{кат.2} = \Delta P_{м.2} \frac{W_{22}}{W_2} + \Delta P_{м.1} \frac{W_{12}}{W_1}. \quad (86)$$

Далее расчет ведём для катушки с большими потерями.

5.3 Половина площади ярма равна, $см^2$

$$F_{11} = (a_{ок} a_c) + \left(\frac{\pi a_c^2}{2} \right) + \left(\frac{a_{ок} + \pi a_c}{2} b_c \right) \cdot 10^{-2}. \quad (87)$$

5.4 Площадь открытой торцевой поверхности катушки (рис. 1), $см^2$

$$F_{12} = (l_{11.сп} - b_c) \cdot (a_{11.лоб} - c_{из}) \cdot 10^{-2}. \quad (88)$$

5.5 Суммарная теплоотдача первой зоны охлаждения

$$A_1 = (F_{11} - F_{12}) \cdot \left[A_k + A_u (1 + C\sqrt{v}) \right] \cdot 10^{-4}, \quad (89)$$

где A_k – удельная конвективная теплоотдача,

$$A_k = 8 \dots 10 \left(\frac{Вт}{°C \cdot м^2} \right);$$

A_u – удельная теплоотдача излучением,

$$A_u = 6 \dots 8 \left(\frac{Вт}{°C \cdot м^2} \right);$$

C – коэффициент, учитывающий реальные условия охлаждения, $C = 0,5 \dots 1,3 \sqrt{м/с}$;

v – скорость охлаждающего воздушного потока,

$$v = 2 \dots 5 \text{ м/с}.$$

5.6 Вторая зона охлаждения – часть вторичной обмотки W_{12} (зависит от номера выбранной катушки) охлаждается с двух сторон. Охлаждаемую поверхность во втором вентиляционном канале определяем с учётом первичной обмотки, $см^2$

$$F_2 = 2h_{обм} \left(\frac{l_{11.внеш} + l_{12.внутр}}{2} - 8c_{из} - 2a_{11.лоб} - v_m \right) 10^{-2}. \quad (90)$$

5.7 Теплоотдача в этой зоне идёт только конвекцией, вентиляция затруднена, поскольку нагрев идет с двух сторон ($C = 0,5$)

$$A_2 = F_2 A_k (1 + C\sqrt{v}) \cdot 10^{-4}. \quad (91)$$

5.8 Третья зона охлаждения - поверхности катушки, которые находятся в вентиляционном канале за вычетом площади изолирующих вставок:

$$F_3 = 2h_{обм} (l_{11.ср} - 6C_{из} - a_{11.лоб} - b_c) \cdot 10^{-2}. \quad (92)$$

5.9 Охлаждение идет только за счет конвекции, вентиляция затруднена ($C = 0,5$), в этом случае теплоотдача равна

$$A_3 = F_3 A_k (1 + C\sqrt{v}) \cdot 10^{-4}. \quad (93)$$

5.10 Площадь четвертой зоны охлаждения равна площади первой, теплоотдача идёт как излучением, так и конвекцией, скорость воздуха практически равна нулю

$$A_4 = (F_{11} - F_{12}) \cdot [A_k + A_u] \cdot 10^{-4}. \quad (94)$$

5.11 Пятая зона охлаждения - внешняя поверхность вторичной обмотки

$$F_5 = h_{обм} (l_{12.внеш} - e_m) \cdot 10^{-2}. \quad (95)$$

5.12 Теплоотдача идет как излучением, так и конвекцией, $C = 0,9$

$$A_5 = F_5 [A_k + A_u (1 + C\sqrt{v})] \cdot 10^{-4}. \quad (96)$$

5.13 Максимальное установившееся превышение температуры и допустимое значение продолжительности нагрузки

$$\tau_{уст. макс} = \frac{\Delta P_{кат.1}}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5} + 15^\circ. \quad (97)$$

$$ПН_{доп} = \frac{100^\circ}{\tau_{уст. макс}} 100\%. \quad (98)$$

Условие проверки на допустимую продолжительность нагрузки выполнено.

3 Характеристики асинхронных электродвигателей при несимметричных питающих напряжениях

3.1 Определение симметричных составляющих напряжений

Модули несимметричных фазных напряжений

$$\begin{cases} U_A = \frac{1}{3} \sqrt{2(U_{AB}^2 + U_{CA}^2) - U_{BC}^2}, \\ U_B = \frac{1}{3} \sqrt{2(U_{AB}^2 + U_{BC}^2) - U_{CA}^2}, \\ U_C = \frac{1}{3} \sqrt{2(U_{BC}^2 + U_{CA}^2) - U_{AB}^2}. \end{cases} \quad (1)$$

Определитель обратной последовательности Δ_{2U} ,

$$\Delta_{2U} = \frac{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2}{3} = \frac{U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2}{9} = U_1^2 + U_2^2. \quad (2)$$

Угол между векторами напряжений обратной и прямой последовательностей α_{2U}

$$\alpha_{2U} = \arctg \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{2} + \frac{U_{нм}^2 - \Delta_{2U}}{U_{нб}^2 - \Delta_{2U}} \right) \right). \quad (3)$$

Модуль коэффициента обратной последовательности

$$k_{2U} = \frac{\Delta_{2U} \cos \alpha_{2U}}{U_{нб}^2 - \Delta_{2U}} - \sqrt{\left(\frac{\Delta_{2U} \cos \alpha_{2U}}{U_{нб}^2 - \Delta_{2U}} \right)^2 - 1}. \quad (4)$$

Модули напряжений прямой и обратной последовательностей

$$U_1 = \sqrt{\frac{\Delta_{2U}}{1 + k_{2U}^2}}, \quad U_2 = k_{2U} U_1. \quad (5)$$

По полученным векторам напряжений необходимо построить векторную диаграмму напряжений, рисунок 1.

Уравнение механической характеристики асинхронной машины

$$M = \frac{3U^2 r_2'}{s \omega_0 \left[\left(r_1 + C_1 \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + C_1 x_2')^2 \right]}, \quad (6)$$

где r_1, r_2' – активные сопротивления обмоток статора и ротора;
 x_1, x_2' – индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора;

C_1 – поправочный коэффициент, для Γ – образной схемы замещения;

$$C_1 = 1 + \frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_0} \approx 1 + \frac{\sqrt{r_1^2 + x_1^2}}{z_0}. \quad (7)$$

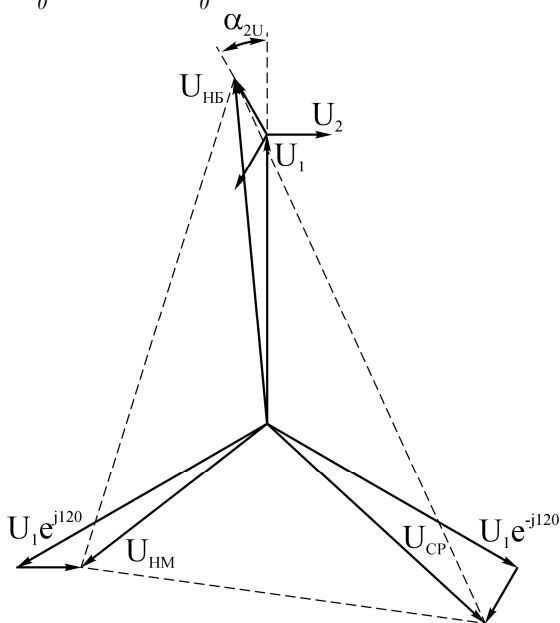


Рисунок 1 – Трехфазная система напряжений

3.2 Расчет механической характеристики двигателя

Полное сопротивление при параллельном соединении r_0, x_0

$$z_0 = \frac{r_0 x_0}{\sqrt{r_0^2 + x_0^2}}.$$

При несимметрии питающих напряжений результирующий момент определяется разностью прямого M_1 и обратного M_2 моментов, однако $M_1 \gg M_2$, следовательно, достаточную точность даст расчет механической характеристики только по напряжению прямой последовательности U_1 .

Определим точки механических характеристик асинхронной машины по каталожным данным, (таблица В1, В2) при номинальном напряжении и с учетом относительного значения напряжения прямой последовательности.

Точка 1 – режим идеального холостого хода – частота вращения ротора равна частоте вращения поля статора $\omega_2 = \omega_0$, и машина не развивает вращающего момента $M = 0$.

Точка 2 – режим работы при номинальной частоте вращения $\omega_{2.ном} = \omega_0(1 - s_{ном})$, (10)

$$M_{ном} = \frac{P_{2.ном}}{\omega_{2.ном}}. \quad (11)$$

$$M_{ном.1} = \left(\frac{U_1}{U_{ном}} \right)^2 M_{ном}. \quad (12)$$

Точка 3 – режим, максимального вращающего момента АМ $\omega_{2.мах} = \omega_0(1 - s_{кр})$, (13)

$$M_{мах} = \mu_{мах} M_{ном}, \quad (14)$$

$$M_{мах.1} = \left(\frac{U_1}{U_{ном}} \right)^2 M_{мах}. \quad (15)$$

Точка 4 – соответствует провалу в механической характеристике АМ

$$\omega_{2.min} \approx 0,2\omega_0, \quad (16)$$

$$M_{min} = \mu_{min} M_{ном}, \quad (17)$$

$$M_{min.1} = \left(\frac{U_1}{U_{ном}} \right)^2 M_{min}. \quad (18)$$

Точка 5 – соответствует моменту пуска АМ – $\omega_2 = 0$,

$$M_{пуск} = \mu_{пуск} M_{ном}, \quad (19)$$

$$M_{пуск.1} = \left(\frac{U_1}{U_{ном}} \right)^2 M_{пуск}. \quad (20)$$

По полученным точкам необходимо построить механические характеристики $M, M_1 = f(\omega)$, рисунок 2.

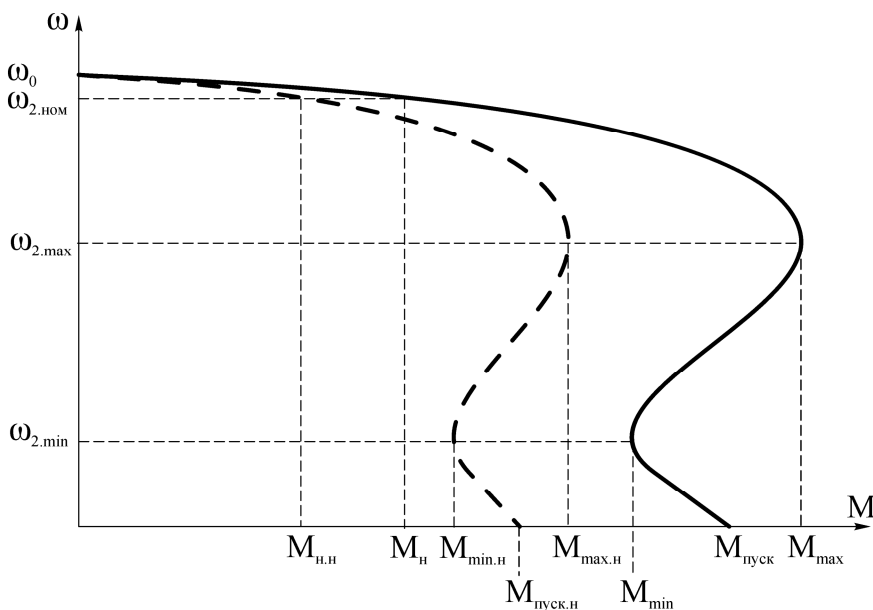


Рисунок 2 – Механические характеристики АМ

В установившемся режиме работы момент сопротивления рабочей машины M_c не должен превышать номинальный момент

асинхронной машины. Для многих механизмов момент сопротивления не зависит от скорости, и его можно выразить в долях от номинального момента двигателя (коэффициента загрузки)

$$M_c = k_3 M_{ном}. \quad (21)$$

Скольжение прямой последовательности при заданном коэффициенте загрузки

$$s_1 \approx \left(\frac{k_3}{\left(\frac{U_1}{U_{ном}} \right)^2} \right) s_{ном}. \quad (22)$$

Проверочный расчет выполняется для номинального и критического скольжений по аналитическим выражениям (23), (24), (25) при $U = 220 \text{ В}$.

$$M_H = \frac{3U^2 r'_2}{s_H \omega_0 \left[\left(r_1 + C_1 \frac{r'_2}{s_H} \right)^2 + (x_1 + C_1 x'_2)^2 \right]}, \quad (23)$$

Максимальный момент асинхронной машины

$$M_{max} = \frac{3U^2}{2C_1 \omega_0 \left(r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + C_1 x'_2)^2} \right)}. \quad (24)$$

Критическое скольжение при максимальном моменте

$$s_{кр} = \frac{C_1 r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + C_1 x'_2)^2}}. \quad (25)$$

3.3 Определение токов и потерь в обмотке статора

Токи обмоток статора $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ определим с помощью векторной диаграммы (рисунок 3), на которой вектора токов и

напряжений прямой последовательности различных фаз совмещены.

Приведенные токи ротора прямой и обратной последовательностей в установившемся режиме, (таблица В1, В2)

$$\left\{ \begin{aligned} I'_{21} = \frac{U_1}{z'_1} &= \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + C_1 \frac{r'_2}{s_1} \right)^2 + (x_1 + C_1 x'_2)^2}}, \\ I'_{22} = \frac{U_2}{z'_2} &= \frac{U_2}{\sqrt{\left(r_1 + C_1 \frac{r'_2}{2-s_1} \right)^2 + (x_1 + C_1 x'_2)^2}}. \end{aligned} \right. \quad (26)$$

Фазовые сдвиги токов относительно соответствующих напряжений

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi_{21} &= \arctg \frac{x_1 + C_1 x'_2}{r_1 + C_1 \left(\frac{r'_2}{s_1} \right)}, \\ \varphi_{22} &= \arctg \frac{x_1 + C_1 x'_2}{r_1 + C_1 \left(\frac{r'_2}{2-s_1} \right)}. \end{aligned} \right. \quad (27)$$

Модуль и фазовый сдвиг намагничивающего тока

$$I_{00} = \frac{U_1}{C_1 z_0}, \quad (28)$$

$$\varphi_0 = \arctg \frac{r_0}{x_0}, \quad (29)$$

Построение векторной диаграммы токов, рисунок .3.

1. Откладываем вектор напряжения прямой последовательности \dot{U}_1 , и под углом α_{2U} к нему достраиваем вектор напряжения обратной последовательности \dot{U}_2 .

6. Соединяя начало координат с концами векторов токов обратной последовательности, получаем вектора $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$, по которым с учетом масштаба вычисляем токи в обмотках статора.

Суммарные электрические потери в обмотках статора

$$\Delta P_{эл.1} = (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2)r_1 = 3(I_1^2 + I_2^2)r_1 \quad (30)$$

где I_1 – ток **статора** прямой последовательности,

$$I_1 = \sqrt{(I_{00} \cos \varphi_0 + I_{21} \cos \varphi_{21})^2 + (I_{00} \sin \varphi_0 + I_{21} \sin \varphi_{21})^2}.$$

I_2 – ток **статора** обратной последовательности, поскольку $z_0 \gg z'_2$, током холостого хода обратной последовательности пренебрегаем, следовательно $I_2 \approx I'_{22}$.

Суммарные электрические потери зависят только от модулей токов прямой и обратной последовательностей, и увеличиваются по сравнению с симметричным режимом относительно мало. Однако, потери в отдельных фазах неодинаковы. В фазе с наибольшим током они находятся в пределах

$$(I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2)r_1 \leq \Delta P_{эл.1(нб)} \leq (I_1^2 + 2I_1 I_2 + I_2^2) \quad (31)$$

и могут значительно превышать среднее значение, и потери при номинальном токе: $\Delta P_{эл.1(ном)} = I_{1.ном}^2 r_1$. Такой режим может привести к повышенному нагреву одной из обмоток.

На основании полученных результатов следует сделать вывод о возможности использования двигателя при заданном коэффициенте загрузки с учетом несимметрии питающих напряжений.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(справочное)

Таблица А.1 – Параметры круглых обмоточных проводов

Сечение голового провода	Диаметр голового провода	Диаметр провода в изоляции, $d_{из}$, мм			
		ПЭЛ, ПЭТ	ПЭВ-2, ПЭТВ	ПБД	ПБ
0,785	1,00	1,070	1,11	1,27	1,30
0,850	1,04	1,115	1,15	1,31	1,34
0,916	1,08	1,155	1,19	1,35	1,38
0,985	1,12	1,195	1,23	1,39	1,42
1,057	1,16	1,235	1,27	1,43	1,46
1,130	1,20	1,280	1,31	1,47	1,50
1,210	1,25	1,330	1,36	1,52	1,55
1,330	1,30	1,380	1,41	1,57	1,60
1,430	1,35	1,430	1,46	1,62	1,65
1,540	1,40	1,480	1,51	1,67	1,70
1,650	1,45	1,530	1,56	1,72	1,75
1,770	1,50	1,580	1,61	1,77	1,80
1,910	1,56	1,640	1,67	1,83	1,86
2,060	1,62	1,700	1,73	1,89	1,92
2,210	1,68	1,760	1,79	1,95	1,98
2,370	1,74	1,820	1,85	2,01	2,04
2,570	1,81	1,890	1,93	2,08	2,11
2,770	1,88	1,960	2,00	2,15	2,18
2,990	1,95	2,030	2,07	2,22	2,25
3,200	2,02	2,100	2,14	2,29	2,32
3,460	2,10	2,180	2,23	2,37	2,40
4,020	2,26	2,340	2,39	2,53	2,56
4,650	2,44	2,520	2,57	2,71	2,74
5,480	2,63	–	–	–	2,93
6,290	2,83	–	–	–	3,13
7,310	3,05	–	–	–	3,35
8,410	3,28	–	–	–	3,58
9,690	3,58	–	–	–	3,88
11,34	3,80	–	–	–	4,10
13,20	4,10	–	–	–	4,40
15,90	4,50	–	–	–	4,80
18,09	4,80	–	–	–	5,10
19,63	5,00	–	–	–	5,30
21,22	5,20	–	–	–	5,50

Таблица А.2 – Параметры прямоугольных обмоточных проводов

$\frac{a}{b}$	1,35	1,45	1,56	1,68	1,81	1,95	2,1	2,26	2,44	2,63	2,83
3,8	4,92	5,30	5,72	6,17	6,67	7,20	7,50	8,11	8,79	9,51	10,3
4,1	5,33	5,74	6,19	6,68	7,21	7,79	8,13	8,79	9,52	10,3	11,1
4,4	5,73	6,17	6,65	7,18	7,75	8,37	8,76	9,46	10,2	11,1	12,0
4,7	6,14	6,61	7,12	7,79	8,30	8,96	9,39	10,1	11,0	11,9	12,8
5,1	6,68	7,19	7,75	8,30	9,02	9,74	10,2	11,0	11,9	12,9	13,9
5,5	7,22	7,77	8,37	9,03	9,75	10,5	11,1	11,9	12,9	14,0	15,1
5,9	7,76	8,35	8,99	9,70	10,5	11,3	11,9	12,8	13,9	15,0	16,2
6,4	8,43	9,07	9,77	10,6	11,4	12,3	12,9	14,0	15,1	16,3	17,6
6,9	9,11	9,79	10,6	11,4	12,3	13,3	14,0	15,1	16,3	17,7	19,0
7,4	9,78	10,5	11,3	12,6	13,3	14,2	15,0	16,2	17,6	19,0	20,4
8,0	10,6	11,4	12,3	13,2	14,4	15,4	16,3	17,6	18,9	20,5	22,1
8,6	11,4	12,3	13,2	14,2	15,5	16,6	17,6	18,9	20,5	22,1	23,8
9,3	12,4	13,3	14,3	15,4	16,6	17,9	19,0	20,5	22,2	24,0	25,8
10,0	–	–	15,4	16,6	17,9	19,3	20,5	22,1	23,9	25,8	27,8
10,8	–	–	–	–	19,3	20,9	22,2	23,9	25,9	27,9	30,1
11,6	–	–	–	–	–	–	23,9	25,7	27,8	30,0	32,3
12,5	–	–	–	–	–	–	25,8	27,8	30,0	32,4	34,9
13,5	–	–	–	–	–	–	–	–	32,4	35,0	37,7
14,5	–	–	–	–	–	–	–	–	34,9	37,6	40,5
15,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	43,7
16,8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	47,0

Примечания.

1. Провода с эмалевой изоляцией

ПЭВП – от $0,5 \times 2,1 \text{ мм}$ до $2,83 \times 5,3 \text{ мм}$ при толщине изоляции $0,13 \dots 0,15 \text{ мм}$;

ПЭТВП – от $0,8 \times 2,0 \text{ мм}$ до $3,55 \times 12,5 \text{ мм}$ при толщине изоляции $0,15 \dots 0,2 \text{ мм}$;

ПЭТП-155 – от $0,8 \times 2,0 \text{ мм}$ до $2,0 \times 5,6 \text{ мм}$ при толщине изоляции $0,14 \dots 0,2 \text{ мм}$.

3. Провода со стекловолокнистой изоляцией

ПСД – от $0,9 \times 2,1 \text{ мм}$ до $5,5 \times 12,5 \text{ мм}$ при толщине изоляции $0,135 \dots 0,2 \text{ мм}$;

ПСД-Л – от $0,9 \times 2,1 \text{ мм}$ до $5,5 \times 12,5 \text{ мм}$ при толщине изоляции $0,17 \dots 0,25 \text{ мм}$;

ПСДКТ – от $0,9 \times 2,1 \text{ мм}$ до $3,55 \times 10,0 \text{ мм}$ при толщине изоляции $0,11 \dots 0,16 \text{ мм}$.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

**Таблица Б.1 – Характеристики изотропных
электротехнических сталей**

Марка стали	Толщина листа, мм	Удельные потери, $P_{(**/50)}$ Вт/кг		Магнитная индукция, Тл при напряжённости поля, кА/м				
		$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	1,0	2,5	5,0	10,0	30,0
1212	1,0	5,40	12,5	–	1,53	1,62	1,76	2,0
	0,65	3,40	8,0	–	1,5	1,62	1,75	1,98
	0,50	3,10	7,2	–	1,5	1,62	1,75	1,98
1213	0,50	2,80	6,5	–	1,5	1,62	1,75	1,98
1313	0,50	2,10	4,6	–	1,48	1,59	1,73	1,95
1413	0,50	1,55	3,5	–	1,48	1,59	1,73	1,94
	0,35	1,35	3,0	–	1,48	1,59	1,73	1,94
1513	0,50	1,25	2,9	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89
	0,35	1,05	2,05	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89
2112	0,50	2,60	6,0	1,46	1,6	1,68	1,77	2,02
2212	0,50	2,20	5,0	1,42	1,6	1,68	1,77	2,0
2312	0,50	1,75	4,0	1,4	1,56	1,66	1,74	1,96
2412	0,50	1,30	3,1	1,35	1,5	1,6	1,7	1,95
	0,35	1,15	2,5	1,35	1,5	1,6	1,7	1,95

**Таблица Б.2 – Характеристики анизотропных
электротехнических сталей**

Марка стали	Толщина листа, мм	Удельные потери, $P_{(**/50)}$ Вт/кг			Магнитная индукция, Тл при напряжённости поля, кА/м		
		$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	$P_{1,7/50}$	0,1	0,25	2,5
3411	0,50	1,10	2,45	3,20	–	–	1,75
	0,35	0,80	1,75	2,50	–	–	1,75
3412	0,50	0,95	2,10	2,80	–	–	1,85
	0,35	0,70	1,50	2,20	–	–	1,85
3413	0,50	0,80	1,75	2,50	–	–	1,85
	0,35	0,60	1,30	1,90	–	–	1,85
	0,30	–	1,19	1,75	–	–	1,85
3414	0,50	0,70	1,50	2,20	1,60	1,70	1,85
	0,35	0,50	1,10	1,60	1,60	1,70	1,85
	0,30	–	1,03	1,50	1,60	1,70	1,85
3415	0,35	0,46	1,03	1,50	1,61	1,71	1,85
	0,30	–	0,97	1,40	1,61	1,71	1,85

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(справочное)

Таблица В.1 – Каталогные данные АД серии 4А

Типоразмер	P_2 кВт	η	$\cos\varphi$	I_1 А	s_n	$S_{кр}$	μ_{max}	$\mu_{пуск}$	μ_{min}
Синхронная частота вращения $\omega_0 = 314с^{-1}$									
4А71В2У3	1,1	77,5	0,87	2,5	0,063	0,390	2,2	2,0	1,5
4А80А2У3	1,5	81,0	0,85	3,3	0,042	0,355	2,6	2,1	1,4
4А80В2У3	2,2	83,0	0,87	4,6	0,043	0,380	2,6	2,1	1,4
4А90Л2У3	3,0	84,5	0,88	6,1	0,043	0,325	2,5	2,1	1,6
4А100S2У3	4,0	86,5	0,89	7,9	0,033	0,280	2,5	2,0	1,6
4А100L2У3	5,5	87,5	0,91	10,5	0,034	0,290	2,5	2,0	1,6
4А112М2У3	7,5	87,5	0,88	14,8	0,025	0,170	2,8	2,0	1,8
4А132М2У3	11,6	88,0	0,90	21,0	0,023	0,190	2,8	1,7	1,5
4А160S2У3	15,0	88,0	0,91	28,4	0,021	0,120	2,2	1,4	1,0
4А160М2У3	18,5	88,5	0,92	34,4	0,021	0,125	2,2	1,4	1,0
4А180S2У3	22,0	88,5	0,91	41,4	0,019	0,125	2,5	1,4	1,1
4А180М2У3	30,0	90,5	0,90	55,8	0,018	0,125	2,5	1,4	1,1
4А200М2У3	37,0	90,0	0,89	70,0	0,019	0,115	2,5	1,4	1,0
4А200L2У3	45,0	91,0	0,90	83,3	0,018	0,115	2,5	1,4	1,0
Синхронная частота вращения $\omega_0 = 157с^{-1}$									
4А80А4У3	1,1	75,0	0,81	2,7	0,054	0,340	2,2	2,0	1,6
4А80В4У3	1,5	77,0	0,83	3,6	0,058	0,345	2,2	2,0	1,6
4А90Л4У3	2,2	80,0	0,83	5,0	0,051	0,330	2,4	2,1	1,6
4А100S4У3	3,0	82,0	0,83	6,7	0,044	0,310	2,4	2,0	1,6
4А100L4У3	4,0	84,0	0,84	8,6	0,046	0,315	2,4	2,0	1,6
4А112М4У3	5,5	85,5	0,85	11,5	0,036	0,250	2,2	2,0	1,6
4А132 S4У3	7,5	87,5	0,86	15,1	0,029	0,195	3,0	2,2	1,7
4А132М4У3	11,0	87,5	0,87	21,9	0,028	0,195	3,0	2,2	1,7
4А160S4У3	15,0	88,5	0,88	29,2	0,023	0,160	2,3	1,4	1,0
4А160М4У3	18,5	89,5	0,88	35,6	0,022	0,160	2,3	1,4	1,0
4А180S4У3	22,0	90,0	0,90	41,2	0,020	0,140	2,3	1,4	1,0
4А180М4У3	30,0	91,0	0,89	56,1	0,019	0,140	2,3	1,4	1,0
4А200М4У3	37,0	91,0	0,90	68,5	0,017	0,10	2,5	1,4	1,0
4А200L4У3	45,0	92,0	0,90	82,4	0,016	0,10	2,5	1,4	1,0
Синхронная частота вращения $\omega_0 = 104,7с^{-1}$									
4А100L6У3	2,2	81,0	0,73	5,6	0,051	0,250	2,2	2,0	1,6
4А112МА6У3	3,0	81,0	0,76	7,4	0,047	0,370	2,5	2,0	1,8
4А112МВ6У3	4,0	82,0	0,81	9,1	0,051	0,380	2,5	2,0	1,8
4А132S6У3	5,5	85,0	0,80	12,3	0,033	0,360	2,5	2,0	1,8
4А132М6У3	7,5	85,5	0,81	16,4	0,032	0,260	2,5	2,0	1,8
4А160S6У3	11,0	86,0	0,86	22,5	0,027	0,150	2,0	1,2	1,0
4А160М6У3	15,0	87,5	0,87	29,9	0,026	0,140	2,0	1,2	1,0
4А180М6У3	18,5	88,0	0,87	36,6	0,024	0,135	2,0	1,2	1,0
4А200М6У3	22,0	90,0	0,90	41,2	0,023	0,135	2,4	1,3	1,0
4А200L6У3	30,0	90,5	0,90	55,8	0,021	0,135	2,4	1,3	1,0

Таблица В.2 – Каталожные данные АД серии 4А (продолжение)

Типоразмер	$r_0, \text{Ом}$	$x_0, \text{Ом}$	$r_1, \text{Ом}$	$X_1, \text{Ом}$	$r'_2, \text{Ом}$	$x'_2, \text{Ом}$
Синхронная частота вращения $\omega_0 = 314\text{с}^{-1}$						
4А71В2У3	2263	249	11,6	4,81	6,41	7,48
4А80А2У3	1745	167	5,60	3,40	3,27	5,40
4А80В2У3	1362	129	3,62	2,38	2,34	4,15
4А90L2У3	1142	122	2,59	2,05	1,69	3,60
4А100S2У3	911,9	95	1,51	1,54	1,01	2,77
4А100L2У3	721,4	79,9	1,05	1,14	0,757	2,31
4А112М2У3	494,3	55,2	0,686	0,865	0,417	2,09
4А132М2У3	348,9	43,9	0,418	0,713	0,261	1,25
4А160S2У3	272,9	31,0	0,403	0,638	0,171	0,930
4А160М2У3	234,5	28,8	0,313	0,588	0,141	0,767
4А180S2У3	175,9	19,1	0,207	0,483	0,106	0,585
4А180М2У3	142,5	15,0	0,118	0,288	0,071	0,434
4А200М2У3	111,5	12,9	0,91	0,295	0,066	0,377
4А200L2У3	102,9	12,9	0,071	0,233	0,053	0,344
Синхронная частота вращения $\omega_0 = 157\text{с}^{-1}$						
4А80А4У3	1654	136	9,62	6,25	5,45	9,62
4А80В4У3	1437	118	7,42	4,82	4,26	7,42
4А90L4У3	1132	92	4,29	3,33	2,63	5,70
4А100S4У3	890,1	72,5	2,57	2,60	1,75	4,28
4А100L4У3	755,7	61,5	1,72	2,02	1,36	3,59
4А112М4У3	604,0	53,7	1,23	1,50	0,787	2,49
4А132S4У3	484,0	43,7	0,699	1,24	0,481	1,89
4А132М4У3	328,3	32,1	0,432	0,854	0,321	1,31
4А160S4У3	268,9	30,2	0,354	0,648	0,188	0,98
4А160М4У3	231,6	26,6	0,26-	0,525	0,148	0,803
4А180S4У3	201,9	21,4	0,219	0,428	0,112	0,641
4А180М4У3	150,8	15,3	0,133	0,267	0,071	0,470
4А200М4У3	130,4	14,1	0,125	0,276	0,058	0,450
4А200L4У3	114,6	12,3	0,091	0,219	0,045	0,374
Синхронная частота вращения $\omega_0 = 104,7\text{с}^{-1}$						
4А100L6У3	1455	74,1	3,51	4,29	2,61	8,20
4А112МА6У3	1044	56,6	2,53	2,20	1,88	2,98
4А112МВ6У3	538,3	48,2	1,86	1,76	1,49	2,65
4А132S6У3	424,0	34,1	1,20	1,29	0,736	1,97
4А132М6У3	341,9	28,2	0,804	0,939	0,536	1,47
4А160S6У3	292,2	29,3	0,713	1,070	0,293	1,46
4А160М6У3	273,4	22,1	0,457	0,737	0,206	1,18
4А180М6У3	307,9	17,4	0,337	0,661	0,156	0,781
4А200М6У3	284,3	21,9	0,267	0,588	0,128	0,748
4А200L6У3	233,92	14,6	0,181	0,473	0,087	0,512

Литература

1. Кобозев В.А. Коваленко В.В. Сварочные трансформаторы. Ставрополь, 1998. – 227 с.
2. Кобозев В.А. Методические указания для выполнения расчетно-графической работы «Исследование характеристик асинхронных электродвигателей при несимметричных питающих напряжениях». СГГАУ, Ставрополь, 2007.

Содержание

1 Расчет трансформатора сварочного выпрямителя для механизированной сварки.....	3
2 Расчет трансформатора для ручной дуговой сварки.....	12
3 Характеристики асинхронных электродвигателей при несимметричных питающих напряжениях.....	27
Приложения.....	35
Литература.....	40