

Министерство образования и науки Российской Федерации
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР)

Н.И.Кузбных

**Исследование тепловых процессов
в трансформаторах питания**

*Методические указания по выполнению
лабораторной работы для студентов специальности 210201
Проектирование и технология радиоэлектронных средств*

2011

СОДЕРЖАНИЕ

1	ВВЕДЕНИЕ	3
2	ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ	3
2.1	Цель работы	3
2.2	Содержание работы	4
3	КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	4
3.1	Принцип действия и схемы замещения трансформатора	4
3.1.1	Режим холостого хода.....	4
3.1.2	Работа трансформатора под нагрузкой.....	6
3.1.3	Электрическая и магнитная схемы замещения ТП.....	7
3.2	Электромагнитные параметры трансформаторов питания	11
3.2.1	Электрические параметры схемы замещения.....	11
3.2.2	Мощности.....	11
3.2.3	Параметры нагрузки трансформатора питания.....	12
3.2.4	Активные потери мощности.....	12
3.2.5	Энергетические параметры.....	13
3.2.6	Токи трансформаторах питания.....	13
3.3	Тепловой режим ТММ	14
3.3.1	Температурные условия работы ТММ.....	14
3.3.2	Задачи анализа теплового режима ТММ.....	14
3.3.3	Процессы отдачи тепла и распределение температуры перегрева в катушке.....	15
3.4	Расчет перегрева катушек ТММ	17
3.5	Способы улучшения теплоотдачи	18
4	ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ	19
5	ПРОГРАММА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	21
6	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	23
	РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	23
	ПРИЛОЖЕНИЕ А Методика расчета температуры перегрева трансформатора питания	24

1 ВВЕДЕНИЕ

Трансформатор питания (ТП) – статическое электромагнитное устройство переменного тока, предназначенное для преобразования напряжения первичного источника питания в ряд напряжений требуемой величины и служащее для питания различных устройств РЭС и гальванической развязки питаемых устройств и первичного источника.

ТП находят широкое применение в РЭА для питания различных потребителей электрической энергии: электронных, полупроводниковых и интегральных схем, устройств индикации и отображения информации, термостатирования и т.п.. При этом используются преимущественно трансформаторы небольшой мощности (до $2...5 \text{ кВ}\cdot\text{А}$). В технической литературе их принято называть *трансформаторами малой мощности* (ТММ) [1,2].

Принцип действия трансформатора основан на преобразовании электрической энергии источника питания в первичной обмотке в энергию магнитного поля, передачу ее по магнитопроводу во вторичные обмотки, где магнитная энергия снова преобразуется в электрическую энергию. В процессе преобразования и передачи энергии по электрическим цепям и по магнитопроводу в них возникают потери мощности, которые обуславливают нагрев трансформатора. Наиболее критичной к температуре в трансформаторе является изоляция катушки. Допустимая температура нагрева изоляции регламентируется классом нагревостойкости и превышение ее существенно сокращает срок службы трансформатора и может привести к преждевременному выходу его из строя. Поэтому при проектировании ТП принимаются различные конструктивные решения, позволяющие снизить рабочую температуру обмоток. С другой стороны радиоинженер должен уметь экспериментально и аналитически определять максимальную рабочую температуру катушек ТП.

2 ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

2.1 Цель работы

2.1.1 Изучить процессы теплопередачи в ТММ. Для этого познакомится с такими понятиями как температурные условия эксплуатации, перегрев, потери мощности, распределение температуры в катушке трансформатора, классы нагревостойкости изоляционных материалов и др.

2.1.2 Исследовать влияние конструктивных особенностей трансформатора питания на его тепловой режим и величину тока холостого хода.

2.1.3 Усвоить и уметь доказать, что допустимый перегрев обмоток должен являться одним из основных ограничений при проектировании ТП и что минимальный перегрев ТММ обеспечивается выбором оптимальных электромагнитных нагрузок обмоток и сердечника.

2.1.4 Научится измерять среднеобъемную температуру перегрева в разных зонах трансформатора и рассчитывать аналитически максимальную температуру нагрева обмоток ТП.

2.2 Содержание работы

2.2.1 В процессе данной лабораторной работы необходимо *изучить*: принцип функционирования ТП; теоретические основы теплового режима работы ТММ; виды потерь, приводящие к нагреву трансформатора; процессы охлаждения и пути улучшения отвода тепла; распределение температуры в катушке и виды тепловых режимов ТП.

2.2.2 *Рассчитать аналитически температуру перегрева* одного из трансформаторов (по указанию преподавателя).

2.2.3 На лабораторной установке *провести экспериментальные исследования* влияния величины нагрузки и различных конструктивных факторов на перегрев обмоток ТП.

2.2.4 *Проанализировать* результаты экспериментальных исследований и теоретических расчетов.

3 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

3.1 Принцип действия и схемы замещения трансформатора

3.1.1 Режим холостого хода

Принцип действия трансформатора питания рассмотрим на простейшем двухобмоточном трансформаторе. Сначала рассмотрим режим холостого хода (х.х.), когда нагрузка отключена (рисунок 3.1). Под воздействием источника напряжения \dot{U}_1 по первичной обмотке W_1 потечет ток холостого хода \dot{I}_0 , создавая магнитный поток в сердечнике $\dot{\Phi}_0$ и поток рассеяния $\dot{\Phi}_{P1}$. Магнитный поток $\dot{\Phi}_0$, взаимодействуя со вторичной обмоткой W_2 и первичной W_1 , создает ЭДС \dot{E}_2 и противоэдс \dot{E}_1 . Противоэдс

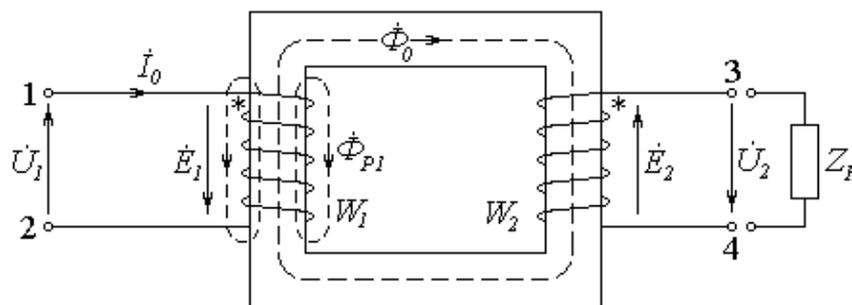


Рисунок 3.1 – Электромагнитная схема трансформатора при холостом ходе

\dot{E}_1 , в свою очередь, во взаимодействии с напряжением \dot{U}_1 определяют величину тока \dot{I}_0 . Таким образом, принцип функционирования трансформатора

при холостом ходе можно представить в виде алгоритма, приведенного на рисунке 3.2.

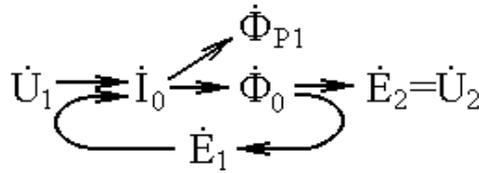


Рисунок 3.2 – Алгоритм работы трансформатора при холостом ходе

Для построения электрической схемы замещения трансформатора и векторной диаграммы токов и напряжений составим уравнение для первичной обмотки по второму закону Кирхгофа:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 \cdot (r_1 + jx_{p1}) - \dot{E}_1, \quad (3.1)$$

где r_1 и x_{p1} – активная и реактивная составляющие сопротивления первичной обмотки.

На основании теоремы об эквивалентном генератора противоэдс представим пассивной цепью

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 \cdot (r_0 + jx_0), \quad (3.2)$$

где r_0 и x_0 – фиктивные сопротивления цепи намагничивания сердечника, обусловленные активными потерями в сердечнике и индуктивностью первичной обмотки.

Тогда уравнение (3.1) принимает вид

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 \cdot (r_1 + jx_{p1}) + \dot{I}_0 \cdot (r_0 + jx_0) = \dot{I}_0 \cdot (Z_1 + Z_0). \quad (3.3)$$

На основании полученных уравнений (3.3) и (3.1) можно построить электрическую схему замещения и векторную диаграмму токов и напряжений трансформатора в режиме холостого хода (рисунок 3.3).

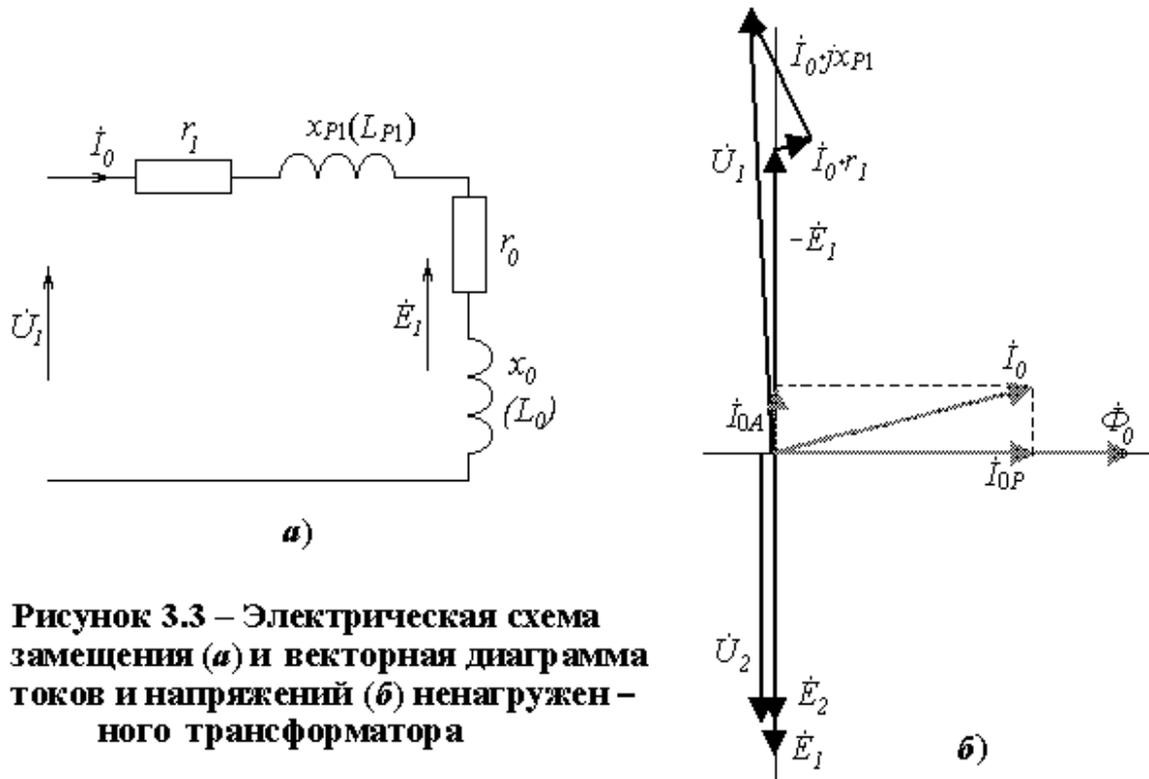


Рисунок 3.3 – Электрическая схема замещения (а) и векторная диаграмма токов и напряжений (б) ненагруженного трансформатора

Ток холостого хода \dot{I}_0 представляет собой сумму векторов: \dot{I}_{0P} – реактивной составляющей намагничивающего тока и \dot{I}_{0A} – активной составляющей, обусловленной потерями в сердечнике

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{0A} + \dot{I}_{0P}. \quad (3.4)$$

Ток \dot{I}_{0P} создает магнитный поток $\dot{\Phi}$, совпадающий по направлению с током. В свою очередь $\dot{\Phi}$, взаимодействуя с витками первичной и вторичной обмоток, вызывает в них э.д.с. \dot{E}_2 и противоэдс \dot{E}_1 , векторы которых отстают от потока на 90° .

По закону электромагнитной индукции э.д.с будут равны:

$$E_{1m} = 2\pi \cdot f \cdot W_1 \cdot \Phi_{0m} = \omega \cdot W_1 \cdot Q_C \cdot K_C \cdot B_m, \quad (3.5)$$

$$E_{2m} = 2\pi \cdot f \cdot W_2 \cdot \Phi_{0m} = \omega \cdot W_2 \cdot Q_C \cdot K_C \cdot B_m, \quad (3.6)$$

где f – частота источника питания; $\Phi_{0m} = B_m \cdot Q_C \cdot K_C$ – амплитудное значение магнитного потока в сердечнике; B_m – амплитудное значение индукции в сердечнике; Q_C и K_C – сечение сердечника и коэффициент заполнения сердечника магнитным материалом.

Для вторичной цепи при отсутствии нагрузки справедливо равенство

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2. \quad (3.7)$$

При правильно спроектированном трансформаторе должно соблюдаться неравенство $\Phi_0 \gg \Phi_{P1}$, то есть поток рассеяния должен быть во много раз меньше основного магнитного потока в сердечнике. Соответственно, будут выполняться неравенства $x_0 \gg x_{P1}$ и $L_0 \gg L_{P1}$.

3.1.2 Работа трансформатора под нагрузкой

Теперь рассмотрим работу трансформатора под нагрузкой, электромагнитная и электрическая схемы которого приведены на рисунке 3.4.

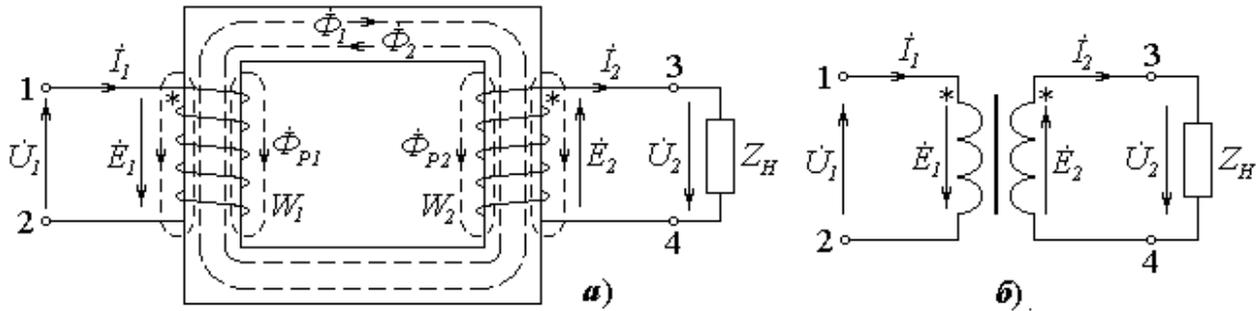


Рисунок 3.4 – Электромагнитная (а) и электрическая (б) схемы трансформатора под нагрузкой

Принципиальное отличие от режима х.х. в том, что наличие нагрузки обуславливает протекание по обмоткам первичного \dot{I}_1 и вторичного \dot{I}_2 токов, которые создают магнитные потоки $\dot{\Phi}_1$ и $\dot{\Phi}_2$. То есть в сердечнике будут взаимодействовать два потока – $\dot{\Phi}_1$ и $\dot{\Phi}_2$ и результирующий магнитный поток $\dot{\Phi}_0$ будет равен их векторной сумме

$$\dot{\Phi}_0 = \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 \quad (3.8)$$

Здесь $\dot{\Phi}_0$ – магнитный поток намагничивания сердечника – основной поток, который передает энергию из первичной цепи во вторичную и определяет все магнитные параметры сердечника, а также э.д.с. обмоток \dot{E}_1 и \dot{E}_2 .

Кроме основных потоков в обмотках будут создаваться также и магнитные потоки рассеяния $\dot{\Phi}_{P1}$ и $\dot{\Phi}_{P2}$, которые замыкаются вне магнитопровода и определяют величины индуктивностей рассеяния первичной и вторичной обмоток L_{P1} и L_{P2} . \dot{E}_2 является электродвижущей силой во вторичной цепи и определяет ток \dot{I}_2 и напряжение \dot{U}_2 в нагрузке. Противоэдс \dot{E}_1 во взаимодействии с напряжением источника \dot{U}_1 определяют ток в первичной обмотке \dot{I}_1 .

Таким образом, принцип функционирования нагруженного трансформатора можно представить в виде алгоритма, приведенного на рисунке 3.5.

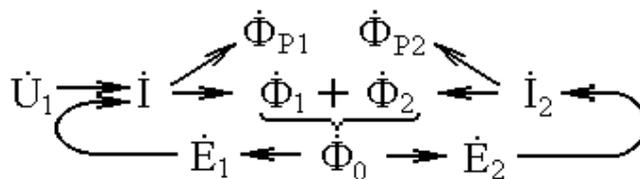


Рисунок 3.5 – Алгоритм работы трансформатора под нагрузкой

3.1.3 Электрическая и магнитная схемы замещения ТП

Приведенная на рисунке 3.4,б электрическая схема трансформатора очень неудобна для анализа, так как содержит магнитную связь между первичной и вторичной обмотками. Избавиться от этой связи можно, воспользовавшись **принципом приведения**.

Сущность этого метода заключается в том, что число витков одной из обмоток (например, вторичной) приводится к числу витков другой (первичной), т.е. принимается $W_2' = W_1$. Так как э.д.с. пропорциональна числу витков, то очевидно равенство

$$\dot{E}_2 = \dot{E}_1 \quad (3.9)$$

Поэтому электромагнитная связь между обмотками может быть заменена чисто электрической связью.

Из уравнений (3.5) и (3.6) для действующих значений э.д.с. при синусоидальном напряжении будем иметь

$$\dot{E}_1 = 2\pi \cdot f \cdot W_1 \cdot \dot{\Phi}_{0m} / \sqrt{2} = 4,44 \cdot f \cdot W_1 \cdot \dot{\Phi}_{0m} \quad (3.10)$$

$$\dot{E}_2 = 2\pi \cdot f \cdot W_2 \cdot \dot{\Phi}_{0m} / \sqrt{2} = 4,44 \cdot f \cdot W_2 \cdot \dot{\Phi}_{0m} \quad (3.11)$$

Поделив (3.11) на (3.10), получим

$$n = \frac{W_2}{W_1} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1} \quad (3.12)$$

где $n = W_2/W_1$ называется **коэффициентом трансформации**.

Из равенства (3.9) с учетом (3.12) следует

$$\dot{E}_2 = \dot{E}_1 = \dot{E}_2 / n \quad (3.13)$$

При приведении должен соблюдаться баланс мощностей:

- полных $\dot{E}_2 \cdot \dot{I}_2 = \dot{E}_1 \cdot \dot{I}_1 \quad (3.14)$

- активных потерь $\dot{I}_2^2 \cdot r_2' = \dot{I}_1^2 \cdot r_1 \quad (3.15)$

- реактивных потерь $\dot{I}_2^2 \cdot x_{p2}' = \dot{I}_1^2 \cdot x_{p1}$ и т.д. (3.16)

Из уравнений (3.14) - (3.16) с учетом (3.13) получим

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_1 \cdot n \quad , \quad r_2' = r_2 / n^2 \quad , \quad x_{p2}' = x_{p2} / n^2 \quad (3.17)$$

Аналогично можно доказать, что

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 / n \quad , \quad z_H' = z_H / n^2 \quad , \quad L_{p2}' = L_{p2} / n^2 \quad \text{и т.д.} \quad (3.18)$$

Здесь r_2 и L_{p2} – активное сопротивление и индуктивность рассеяния вторичной обмотки.

Выражения (3.13), (3.17) и (3.18) называются **формулами приведения** параметров вторичной обмотки к первичной, где в **качестве коэффициента приведения выступает коэффициент трансформации n** .

Для построения электрической схемы замещения нагруженного трансформатора воспользуемся уравнениями Кирхгофа. По второму закону для первичной и вторичной цепей, будем иметь

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 \cdot (r_1 + jx_{p1}) - \dot{E}_1 = \dot{I}_1 \cdot (r_1 + jx_{p1}) + I_0 \cdot (r_0 + jx_0), \quad (3.19)$$

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 \cdot (r_2 + j\omega L_{p2}) + \dot{U}_2. \quad (3.20)$$

Если поделить правую и левую части уравнения (3.20) на коэффициент трансформации n и, воспользовавшись формулами приведения, провести несложные преобразования, то получим

$$\dot{E}'_2 = \dot{i}'_2 \cdot (r'_2 + j\omega L'_{p2}) + \dot{U}'_2 \quad (3.21)$$

Чтобы получить уравнение для токов трансформатора, воспользуемся уравнением (3.8) для магнитных потоков и схемой замещения трансформатора для магнитной цепи (рисунок 3.6).

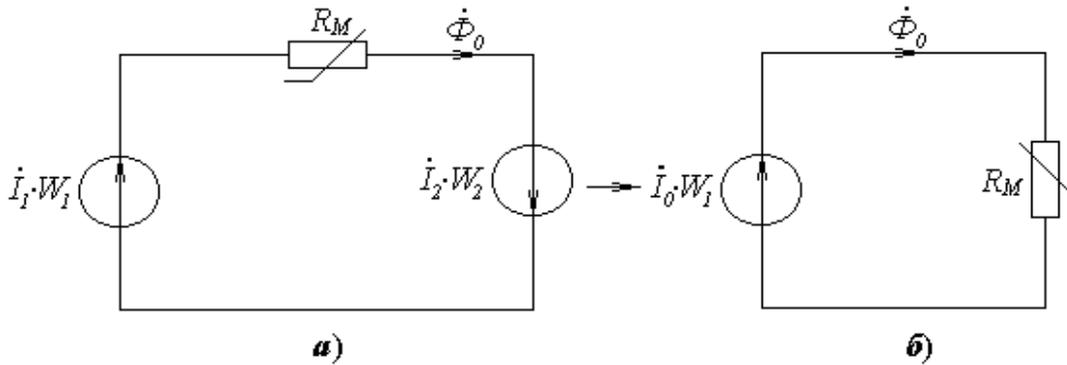


Рисунок 3.6 – Схема замещения магнитной цепи трансформатора под нагрузкой

Обычно потери напряжения $\Delta \dot{U}_1 = \dot{I}_1 \cdot (r_1 + j\omega L_{p1})$ малы (несколько процентов) и в первом приближении можно считать, что $E_1 \cong U_1 = const.$ Отсюда следует, что результирующий поток $\dot{\Phi}_0$ при изменении нагрузки (тока \dot{I}_1) практически не изменяется (см. выражения (3.10) и (3.19)), т.е.

$$\dot{\Phi}_0 = \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 = const. \quad (3.22)$$

Помножив уравнение (3.22) на R_M , на основании закона Ома можно записать для магнитодвижущих сил (см. рисунок 3.6)

$$\dot{i}_0 \cdot W_1 = \dot{i}_1 \cdot W_1 + \dot{i}_2 \cdot W_2 \quad (3.23)$$

Поделив правую и левую части уравнения (3.23) на W_1 , получим уравнение для токов нагруженного трансформатора

$$\dot{i}_0 = \dot{i}_1 + \dot{i}'_2 \quad (3.24)$$

где $\dot{i}'_2 = \dot{i}_2 \cdot n$ – ток вторичной обмотки, приведенный к первичной.

Таким образом, для нагруженного трансформатора получена следующая система уравнений по второму и первому законам Кирхгофа:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_1 \cdot (r_1 + j\omega \cdot L_{p1}) + \dot{I}_0 \cdot (r_0 + j\omega \cdot L_0), \\ \dot{E}'_2 &= \dot{I}'_2 \cdot (r'_2 + j\omega \cdot L'_{p2}) + \dot{U}'_2, \\ \dot{I}_0 &= \dot{I}_1 + \dot{I}'_2. \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

Полученной системе уравнений будет соответствовать *электрическая схема замещения нагруженного трансформатора*, представленная на рисунке 3.7. Это Т-образная схема замещения трансформатора. Здесь не учтена собственная ёмкость трансформатора, но она легко может быть учтена

в сопротивлении нагрузки. Принципиально возможны и другие схемы замещения.

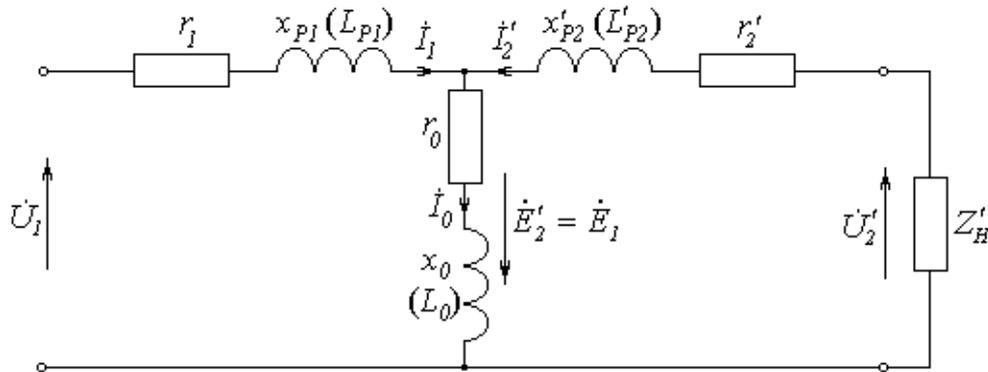


Рисунок 3.7 – Электрическая схема замещения трансформатора под нагрузкой

На основании системы уравнений (3.25) нетрудно построить векторные диаграммы токов и напряжений нагруженного трансформатора (рисунок 3.8). Для удобства построения приведем последовательность этапов:

- 1) $\dot{\Phi}$ – вектор намагничивающего потока сердечника, совпадающий с положительным направлением действительной оси координат;
- 2) $\dot{I}_0 = \dot{I}_{0A} + \dot{I}_{0P}$ – ток х.х., где \dot{I}_{0P} – намагничивающий ток, совпадает по направлению с $\dot{\Phi}$; \dot{I}_{0A} – активная составляющая тока опережает $\dot{\Phi}$ на 90° ;

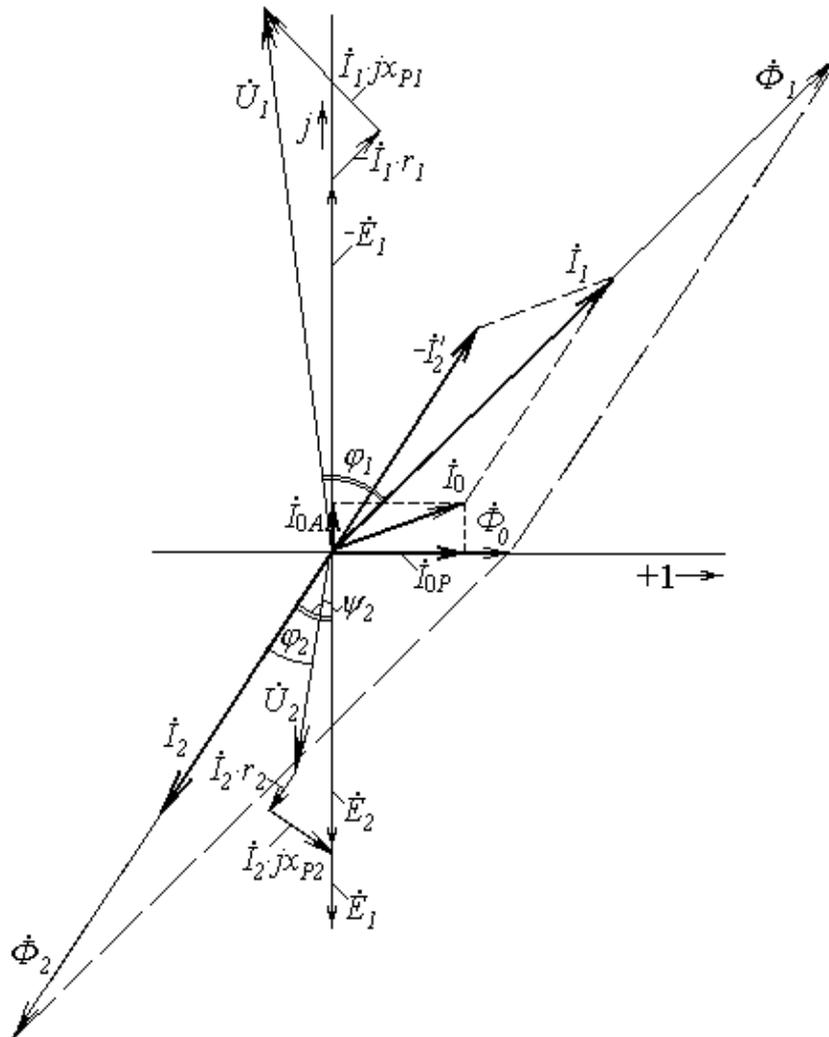


Рисунок 3.8 – Векторные диаграммы токов, напряжений и магнитных потоков нагруженного трансформатора

- 3) \dot{E}_1, \dot{E}_2 – векторы э.д.с., отстают от $\dot{\Phi}_0$ на 90° ;
- 4) \dot{I}_2 – вектор тока в нагрузке. Полагаем, что нагрузка известна – активно-индуктивная $Z_H = r_H + jx_H$, следовательно, известны и угол отставания φ_2 тока \dot{I}_2 от напряжения \dot{U}_2 , и угол отставания тока \dot{I}_2 от э.д.с. \dot{E}_2 – ψ_2 ;
- 5) $\dot{I}_2 jx_{P2}$ и $\dot{I}_2 r_2$ – реактивная (опережает ток \dot{I}_2 на 90°) и активная (совпадает по направлению с током \dot{I}_2) составляющие падения напряжения во вторичной обмотке;
- 6) \dot{U}_2 – напряжение на нагрузке – замыкающий вектор в контуре вторичной обмотки согласно уравнению (3.20);
- 7) $-\dot{I}' = -\dot{I}_2 \cdot n$ – отрицательный ток вторичной обмотки, приведенный к первичной ;
- 8) $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}'$ – строится результирующий вектор тока первичной обмотки;
- 9) $-\dot{E}_1$ – вектор противоэдс первичной обмотки (см. уравнение (3.19));

10) $\dot{I}_1 \cdot r_1$ и $\dot{I}_1 \cdot j x_{P1}$ – активная (совпадает по направлению с током \dot{I}_1) и реактивная (опережает ток \dot{I}_1 на 90°) составляющие падения напряжения во вторичной обмотке;

11) \dot{U}_1 – напряжение источника питания, как замыкающий вектор в контуре первичной обмотки согласно уравнению (3.19);

12) строятся вектора магнитных потоков $\dot{\phi}_1$ и $\dot{\phi}_2$ по направлениям своих токов согласно уравнению (3.8);

13) обозначаются углы ϕ_1 , ϕ_2 и ψ_2 между соответствующими напряжениями (э.д.с.) и токами.

3.2 Электромагнитные параметры трансформаторов питания

3.2.1 Электрические параметры схемы замещения

К параметрам схемы замещения (рисунок 3.8) относятся:

- r_1, r_2 - активные сопротивления первичной и вторичной обмоток;
- L_{P1}, L_{P2} - индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток, обусловленные потоками рассеяния $\dot{\phi}_{r1}$ и $\dot{\phi}_{r2}$;
- r_0 - фиктивное сопротивление, эквивалентное активным потерям в сердечнике трансформатора (может обозначаться также r_A или r_C);
- L_0 - основная индуктивность цепи намагничивания, обусловленная магнитным потоком $\dot{\phi}_0$ (может обозначаться также через L_1 или L_μ).

3.2.2 Мощности

Мощности первичной цепи (обмотки): активная, реактивная и полная
Полная (кажущаяся) мощность \dot{S}_1 – мощность, потребляемая трансформатором из сети, равна

$$\dot{S}_1 = \dot{U}_1 \cdot \dot{I}_1^* = P_1 + jQ_1, \quad (3.26)$$

где \dot{I}_1 – сопряженный ток первичной обмотки;

P_1 и Q_1 - активная и реактивная мощности первичной цепи (обмотки)

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \phi_1, \quad Q_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \phi_1. \quad (3.27)$$

Активная мощность вторичных обмоток (мощность вторичной цепи):
 при наличии реактивной составляющей в нагрузке

$$P_2 = \sum_{i=1}^N P_{2i} = \sum_{i=1}^N U_{2i} \cdot I_{2i} \cdot \cos \phi_{2i}, \quad (3.28)$$

при активной нагрузке

$$P_2 = \sum_{i=1}^N U_{2i} \cdot I_{2i}, \quad (3.29)$$

где N – число вторичных обмоток; U_{2i} и I_{2i} – напряжения и токи i -ых вторичных обмоток; ϕ_i - угол между ними.

Электромагнитная мощность – мощность, передаваемая из первичной цепи во вторичную магнитным потоком $\dot{\phi}_0$

$$P = \sum_1^N E_{2i} \cdot I_{2i} \quad (3.30)$$

Габаритная (типовая) мощность. Это понятие введено в связи с тем, что при некоторых видах нагрузки, в частности, при работе трансформатора во вторичных источниках электропитания на некоторые схемы выпрямителей, нагруженных электронными схемами, приведенный вторичный ток определяется не только коэффициентом трансформации, но и типом схемы выпрямителя, т.е. $I_2 \neq n \cdot I_1$. Эти особенности учитываются коэффициентом влияния K_B .

В общем случае при N вторичных обмотках

$$P_T = \frac{1}{2} \cdot \left(P_2 + \sum_{i=1}^N P_{2i} \cdot K_{Bi} \right) \quad (3.31)$$

Для мостовых выпрямителей и для схем удвоения напряжения, а также при отсутствии выпрямителей – $K_{Bi} = 1$. Для двухфазной одноконтурной схемы выпрямления (однофазной с нулевым выводом) – $K_{Bi} = 0,71$.

3.2.3 Параметры нагрузки трансформатора питания

Основными параметрами нагрузки трансформатора питания являются *плотности тока в обмотках j* и *индукция в сердечнике B_m* . Они определяют мощность трансформатора и активные потери в обмотках и в сердечнике, которые, в свою очередь, определяют температуру перегрева в обмотках. Кроме того, плотности тока определяют падения напряжений в обмотках. Существуют оптимальные соотношения между плотностями тока в обмотках и индукцией в сердечнике, при которых температура перегрева обмоток (при прочих равных условиях) будет минимальной.

3.2.4 Активные потери мощности

Основными потерями в трансформаторах питания даже при высоких частотах (до сотен кГц) являются потери в обмотках P_O и потери в магнитопроводе (в сердечнике) P_C .

Потери в обмотках (потери в обмоточных проводах)

$$P_0 = \sum_{i=1}^{N+1} I_i^2 \cdot r_i \quad (3.32)$$

где r_i – активное сопротивление i -ой обмотки трансформатора

$$r_i = \rho_{20} \cdot \frac{l_{0i} \cdot W_i}{q_{ПР.i}} \cdot K_H \quad (3.33)$$

Здесь ρ_{20} – удельное сопротивление материала провода при температуре 20°C; l_{0i} и W_i – длина среднего витка и число витков i -ой обмотки; $q_{ПР.i}$ – сечение провода i -ой обмотки; K_H – коэффициент увеличения сопротивления провода обмотки при максимальной рабочей температуре

$$K_H = 1 + \alpha_R \cdot (t_{C,max} + \tau - 20) \quad (3.34)$$

где α_R – температурный коэффициент увеличения удельного сопротивления материала провода; $t_{C.max}$ – максимальная температура среды; τ – средняя температура перегрева обмоток.

Потери в сердечнике

$$P_c = p_{уд} \cdot G_c, \quad (3.35)$$

где $p_{уд}$ – удельные потери в сердечнике; G_c – масса сердечника.

Для сердечников из электротехнических сталей

$$P_c = P_1 \cdot B_m^2 \cdot G_c, \quad (3.36)$$

где $P_1 = K_T \cdot \dot{h}$ – удельные потери в сердечнике при индукции $B_m = 1 \text{ Тл}$; B_m – величина рабочей индукции в сердечнике; K_T – технологический коэффициент увеличения удельных потерь, обусловленный механической обработкой материала при изготовлении сердечника; \dot{h} – удельные потери в материале сердечника при индукции $B_m = 1 \text{ Тл}$ (справочная величина).

Потери в магнитопроводе очень сильно зависят от частоты питающего напряжения f . С увеличением f потери существенно увеличиваются. Так для электротехнических сталей при увеличении f от 50 до 400 Гц потери увеличиваются более, чем в 10 раз. Но поскольку частота обычно задается, то величину потерь P_c удобнее всего изменять путем изменения рабочей индукции B_m .

3.2.5 Энергетические параметры

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_o + P_c}; \quad (3.37)$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_2 + P_o + P_c}{U_1 \cdot I_1}. \quad (3.38)$$

3.2.6 Токи трансформаторов питания

Помимо токов вторичных обмоток, определяющих мощность нагрузки, в трансформаторах питания выделяют несколько токов первичной обмотки: ток холостого хода, рабочий ток и полный ток.

Ток холостого хода определяется магнитным сопротивлением сердечника R_M и числом витков первичной обмотки W_1 (см. схему замещения 3.6,б) и рассчитывается по формуле

$$I_o = \sqrt{I_{oA}^2 + I_{oP}^2}, \quad (3.38)$$

где I_{oA} и I_{oP} – активная и реактивная составляющие тока холостого хода (см. векторную диаграмму, рисунок 3.8).

Для оценки качества трансформатора принято выражать ток х.х. в процентах от первичного тока I_1 (обычно отношение I_o/I_1 не более 10 %).

Рабочий ток первичной обмотки или приведенный рабочий ток

$$I_{РАБ} = \sum_{i=1}^N n_i \cdot I_{2i} \quad , \quad (3.39)$$

где $n_i = W_{2i}/W_1$ – коэффициент трансформации по i -ой вторичной обмотке.

Полный ток первичной обмотки

$$I_1 = \sqrt{(I_{РАБ} + I_{0.A})^2 + I_{0.P}^2} \quad . \quad (3.40)$$

Кроме рассмотренных выше параметров качество трансформаторов питания оценивается *внешней характеристикой* – зависимостью напряжения на нагрузке от тока $U_2 = f(I_2)$.

3.3 Тепловой режим ТММ

3.3.1 Температурные условия работы ТММ

Температурные условия работы ТММ характеризуются тремя величинами:

максимальной температурой среды – $t_{C.max}$, при которой эксплуатируется ТММ. Это температура внутри блока, кожуха, шкафа и т.д., где установлен трансформатор;

максимальной рабочей температурой обмоток – $t_{P.max}$, достигаемой при установившемся тепловом режиме;

3) превышением температуры обмоток над температурой среды или *перегревом обмоток* – τ

$$\tau = t_{P.max} - t_{C.max} \quad (3.42)$$

3.3.2 Задачи анализа теплового режима ТММ

Нагрев трансформатора, превышающий предельно допустимое значение, резко сокращает срок его службы. Наиболее слабым местом в ТММ к нагреву является электрическая изоляция и, прежде всего изоляция обмоточных проводов. Теплостойкость изоляционных материалов и обмоточных проводов, разработанных до 1987 г., согласно ГОСТ 8865-70, оценивалась семью *классами нагревостойкости*. Класс нагревостойкости (*Y, A, E, B, F, H, C*) указывает, что данный тип изоляции должен безотказно работать в течение 20 тысяч часов при соответствующей температуре (90, 105, 120, 130, 155, 180 и более 180 °С). На новые разработки обмоточных проводов согласно ГОСТ 26615-85 вместо классов нагревостойкости установлены температурные индексы: до 105 °С, до 120 °С, до 130 °С, до 155 °С, до 180 °С, до 200 °С, до 220 °С, свыше 220 °С. Однако следует указать, что изоляционные материалы крайне чувствительны даже к незначительному превышению температуры сверх нормируемой величины. Так у органической изоляции из натуральных материалов (бумага, хлопчатобумажная и шелковая ткань и т.д.) при превышении температуры всего на 8-10 °С срок службы сокращается вдвое. То же происходит с изоляцией из синтетических материалов (стеклоткань, лавсан, фторопласт, полистирол и т.д.) при превышении температуры на каждые 12 °С.

При значительном превышении рабочей температуры происходит возгорание изоляции.

Учитывая значительные активные потери в трансформаторах питания и чувствительность изоляции к нагреву, очевидно, что при проектировании ТП необходимо строго учитывать температурный режим. Ошибка в большую сторону приведет к снижению надежности и срока службы ТММ. Излишняя же перестраховка ведет к недоиспользованию трансформатора и, как следствие, к неоправданному увеличению габаритов и массы ТММ.

Чтобы правильно оценивать тепловой режим, необходимо уметь рассчитывать температуру перегрева ТММ τ , которая определяется активными потерями, конструктивными особенностями, режимом работы, а также условиями эксплуатации трансформатора.

3.3.3 Процессы отдачи тепла и распределение температуры перегрева в катушке

С повышением температуры трансформатора t_P , по сравнению с температурой окружающей среды t_C начинается процесс отдачи тепла трансформатором в окружающую среду. Теплообмен с внешней средой осуществляется через все наружные поверхности трансформатора, а также через теплопроводящие шасси или радиаторы. Теплоотвод может осуществляться тремя способами: конвекцией, лучеиспусканием и теплопроводностью элементов конструкции трансформатора. В установившемся режиме наступает равновесие – равенство между мощностью активных потерь в трансформаторе и тепловым потоком, отводимым во внешнюю среду.

Как было указано ранее, наиболее критичной к температуре у ТММ является изоляция. Но в силу многих причин катушка ТММ нагревается по всему объему неравномерно. Естественно, наиболее уязвимой оказывается область катушки с максимальным перегревом τ_m . Зона с максимальным перегревом может занимать разное положение в катушке в зависимости от соотношения потерь в сердечнике и катушке, конструкции и геометрических размеров катушки и трансформатора, режима работы ТММ и др. факторов.

Различие между максимальным и среднеобъемным перегревом (перегревом поверхности) обусловлено внутренним перепадом температур в катушке, возникающим при прохождении теплового потока сквозь ее толщину в процессе теплообмена с окружающей средой и сердечником, и оценивается коэффициентом неравномерности нагрева катушки $\Gamma = \tau_m / \tau$.

Согласно закону Ньютона

$$\tau = \frac{P_C + P_O}{\alpha \cdot S_{OХЛ}} \quad (3.43)$$

Здесь α – коэффициент теплоотдачи; $S_{OХЛ}$ – активная площадь охлаждения.

Проведя некоторые преобразования, можно показать, что

$$\tau = (A_1 \cdot B^2 + A_2 \cdot j^2) \cdot a \quad (3.44)$$

где A_1, A_2 – коэффициенты пропорциональности; j – средняя плотность тока в обмотках; a – основной (базовый) размер сердечника.

Из анализа выражения (3.43) следует, что при выбранных значениях электромагнитной нагрузки (B и j) температура перегрева τ определяется базовым размером сердечника a . С другой стороны величина перегрева находится в квадратичной зависимости от индукции B и плотности тока j . Но так как при увеличении B , при прочих неизменных условиях, j уменьшается (и наоборот, при увеличении j B уменьшается), то из (3.43) (с учетом (3.32) и (3.36)) следует, что минимальная температура перегрева τ будет иметь место при равенстве потерь в сердечнике и в обмотке – $P_C = P_O$.

Однако практически *оптимальный тепловой режим* ТП имеет место при $P_C > P_O$. Это объясняется тем, что мы контролируем только температуру перегрева катушки, а сердечник может нагреваться до большей температуры. В этом случае теплоотвод от сердечника осуществляется как через его поверхность, так и через катушку. Такой температурный режим ТП получил название *тепловой естественный режим* – ТЕР. Это тепловой режим, когда перегрев сердечника больше, чем перегрев обмотки и весь тепловой поток от сердечника (для тороидального трансформатора) или его часть (для броневой и стержневой конструкции) проходит (рассеивается) через катушку, а наибольший перегрев катушки находится у керна сердечника (рисунок 3.10, кривая 1). При таком режиме может быть обеспечено оптимальное соотношение потерь в катушке и в сердечнике $\nu_{\text{опт}}$, т.е.

$$\nu = \frac{P_C}{P_O} = \nu_{\text{опт}} \quad (3.45)$$

$\nu_{\text{опт}}$ определяется из условия получения максимальной мощности трансформатора P_T при заданной температуре перегрева τ_m или минимальной τ_m при заданной мощности. Это достигается перераспределением (оптимизацией) нагрузки между сердечником (B) и обмоткой (j). Такой режим возможен для ТП с закрытой конструкцией сердечника (тороидальный трансформатор) при любой частоте, либо для любых конструкций трансформаторов при повышенных частотах ($f \geq 400 \text{ Гц}$).

Температурный режим, при котором невозможно получить оптимальное соотношение потерь $\nu_{\text{опт}}$, получил название *тепловой вынужденный режим* – ТВР. Он имеет место в трансформаторах с открытой поверхностью охлаждения сердечника при низких частотах питающей сети (50 Гц). При ТВР

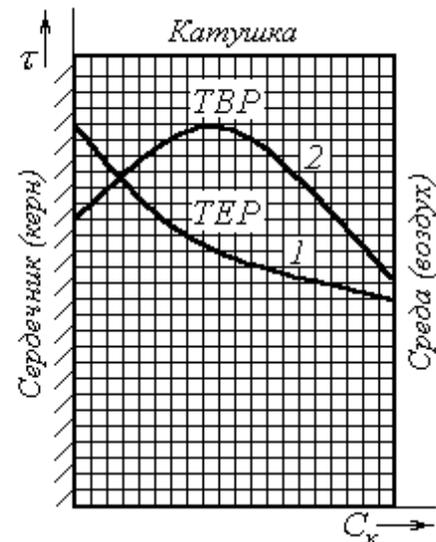


Рисунок 3.9 – Распределение температуры перегрева в катушке ТП при различных режимах работы

максимальная температура перегрева находится внутри катушки (см. рисунок 3.10, кривая 2) и теперь уже часть тепловой энергии катушки рассеивается через сердечник.

3.4 Расчет перегрева катушек ТММ

Теоретический расчет теплового режима – очень сложная задача. В настоящее время для анализа и расчета тепловых процессов используются несколько методов. Самые точные методы анализа – методы математического и физического моделирования. Но оба сложны в реализации, требуют больших материальных и временных затрат и могут быть использованы лишь для определения температуры перегрева в готовых изделиях.

В инженерной практике используются приближенные методы. Из инженерных методов расчета тепловых процессов в трансформаторах и дросселях РЭА наибольшее распространение получили методики И.И. Белопольского - Е.И. Каретниковой [2] и Р.Х. Бальяна [1].

Более строгой и простой для инженерных расчетов является методика, разработанная Р.Х. Бальяном. В ее основу положен закон Ньютона для теплового потока (3.43).

Основная трудность использования данного уравнения для определения температуры перегрева ТП заключается в очень сложной зависимости коэффициента теплоотдачи α от многих факторов: геометрических размеров и формы нагретого тела, температуры нагретого тела и среды, коэффициента теплопроводности нагретого тела, параметров, характеризующих агрегатное состояние среды, и т.д.

Методика Бальяна базируется на результатах многочисленных теоретических и экспериментальных исследований, проведенных с позиций инженера-конструктора РЭА. Он предложил максимальную температуру перегрева обмоток катушки рассчитывать по следующей формуле:

$$\tau_m = \frac{(P_C + P_O) \cdot \Gamma}{\alpha \cdot B \cdot S_O \cdot q_P} \quad , \quad (3.46)$$

где P_C и P_O – потери мощности в сердечнике и в катушке (тепловые потоки); $\Gamma = \tau_m/\tau$ – коэффициент, учитывающий увеличение максимального перегрева обмотки ТП по отношению к среднему перегреву катушки; α – величина, пропорциональная коэффициенту теплоотдачи; B – расчетный коэффициент, учитывающий участие сердечника и шасси в теплоотводе; S_O – поверхность охлаждения катушки, контактирующая с окружающей средой; q_P – коэффициент, учитывающий режим работы трансформатора во времени. При длительном режиме работы $q_P = 1$.

Наиболее трудно определяемый коэффициент α Р.Х. Бальян предложил рассчитывать по эмпирической формуле

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \sqrt[4]{\frac{\tau_m}{50}} \cdot \sqrt[6]{\frac{0,05}{h_K}} \cdot \frac{1 + \sqrt{H_{min}/H_{НОР}}}{2} \quad , \quad (3.47)$$

где h_K – высота намотки катушки; H_{min} – минимальное атмосферное давление, оговоренное в техническом задании; α_0 – коэффициент, пропорциональный коэффициенту теплоотдачи для типового трансформатора при нормальных условиях эксплуатации ($\tau_m = 50 \text{ K}$; $h_K = 0,05 \text{ м}$; $H_{НОР} = 101 \text{ кПа}$). Он зависит от конструкции ТП, наличия пропитки и заливки катушки, геометрии катушки и др. факторов. Для типовых конструкций ТП он рассчитан и проверен экспериментально [1]. Обычно $\alpha_0 = 9 \dots 14 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$.

$$B = 1 + m_1 \cdot \beta_S \cdot \sqrt{\frac{0,6 + \nu}{1 + 0,2 \cdot \beta_S \cdot \nu}} \quad (3.48)$$

Здесь m_1 – коэффициент, учитывающий участие шасси в охлаждении. При хорошем тепловом контакте трансформатора с шасси $m_1 = 1,3 \dots 1,6$, а при отсутствии теплового контакта $m_1 = 1$; $\beta_S = S_C/S_O$ – отношение поверхности охлаждения сердечника к поверхности охлаждения катушки; $\nu = P_C/P_O$ – отношение потерь в сердечнике и в катушке. Значения коэффициентов α_0 , m_1 и β_S приводятся в таблицах для конкретных конструкций трансформаторов и типоразмеров сердечников. Коэффициент Γ определяется либо из таблиц, либо расчетным путем.

Приведенная эмпирическая методика теплового расчета трансформаторов малой мощности позволяет определить перегрев обмотки с погрешностью 10...15 % по сравнению с экспериментальными данными. Основным преимуществом методики Р.Х. Бальяна по сравнению с другими заключается в том, что позволяет учитывать ограничения по температуре перегрева ТП, заложенные в техническом задании, уже на начальном этапе проектирования.

3.5 Способы улучшения теплоотдачи

Любой ТММ должен быть спроектирован так, чтобы даже при выбранных материалах и принципах конструирования обеспечивались наиболее благоприятные условия теплоотдачи. Самые простые меры для достижения этой цели следующие.

- 1) Удаление воздушных пузырей и прослоек внутри катушек. Воздух сильно понижает коэффициент теплопроводности катушки, что затрудняет отвод тепла от внутренних слоев и увеличивает неравномерность нагрева катушки. Нужно стремиться к максимальной плотности катушки уже в процессе намотки. Можно применять пропитку катушки, используя пропиточные лаки или компаунды с высокой теплопроводностью.
- 2) Повышение степени черноты поверхностей ТММ. Это увеличивает лучеиспускание (один из способов теплоотвода). Повышению степени черноты способствует увеличение шероховатости поверхности.
- 3) Правильное закрепление ТММ в блоке. Если обеспечить хороший тепловой контакт сердечника с металлическим шасси, то теплоотдача заметно повышается. Для этого нужно обеспечить плотное прилегание сердечника к

шасси по всей его поверхности, исключить попадание между ними краски, клея и др. материалов с низким коэффициентом теплопроводности.

4) Использование тепловых шунтов и радиаторов.

5) Уменьшение толщины изоляции, используемой в катушке: корпусной, межслоевой, межобмоточной и наружной, так как все изоляционные материалы имеют очень низкий коэффициент теплопроводности и препятствуют отводу тепла из внутренних слоев катушки. Толщина изоляции должна соответствовать нормам электрической прочности и технологическим требованиям.

6) Обеспечение оптимального соотношения между потерями в сердечнике и в катушке для ТП, работающих в тепловом вынужденном режиме (ТЕР), что достигается соответствующими значениями нагрузок V и j .

4 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка включает в себя макет с исследуемыми трансформаторами питания ТП1...ТП9 и блок нагрузочных сопротивлений, цифровой омметр и миллиамперметр. Схема электрическая лабораторного макета представлена на рисунке 3.10.

ТП1...ТП7 предназначены для исследования влияния различных конструктивных особенностей (величины нагрузки, наличия теплового контакта с шасси, использования теплового шунта, наличия пропитки катушки и т.д.) на тепловой режим ТП. ТП8 и ТП9 предназначены для исследования влияния величины немагнитного зазора в сердечнике на ток холостого хода ТП.

Технические характеристики и основные конструктивные особенности ТП1...ТП7 приведены в приложении А.

Наиболее важные конструктивные особенности ТП1 – ТП7:

- ТП1 и ТП2 имеют полное заполнение окна обмоткой, самую большую (одинаковую) нагрузку ($P_2 = 36,3 \text{ Вт}$), хороший тепловой контакт с шасси, одинаковое число витков обмоток, катушки не пропитаны, но отличаются сечением провода первичной обмотки, т.е. плотностью тока j_1 . Кроме того у ТП2 практически отсутствует технологический зазор между катушкой и сердечником, что создает дополнительный тепловой контакт обмотки с сердечником, а следовательно и с шасси.

- ТП3...ТП7 имеют одинаковое число витков обмоток, неполное заполнение окна, значительно меньшую нагрузку, чем ТП1 и ТП2 ($P_2 = 8,7... 13,6 \text{ Вт}$) и имеют следующие особенности:

- ТП3 - самая маленькая нагрузка ($P_2 = 8,7 \text{ Вт}$), хороший тепловой контакт с шасси;
- ТП4...ТП7 имеют практически одинаковую мощность – $P_2 \approx 13 \text{ Вт}$;
- ТП4 имеет пропитанную катушку, хороший тепловой контакт с шасси;
- ТП5 имеет хороший тепловой контакт с шасси и тепловой шунт;

- ТП6 имеет хороший тепловой контакт с шасси, без особенностей;
- ТП7 не имеет теплового контакта с шасси.

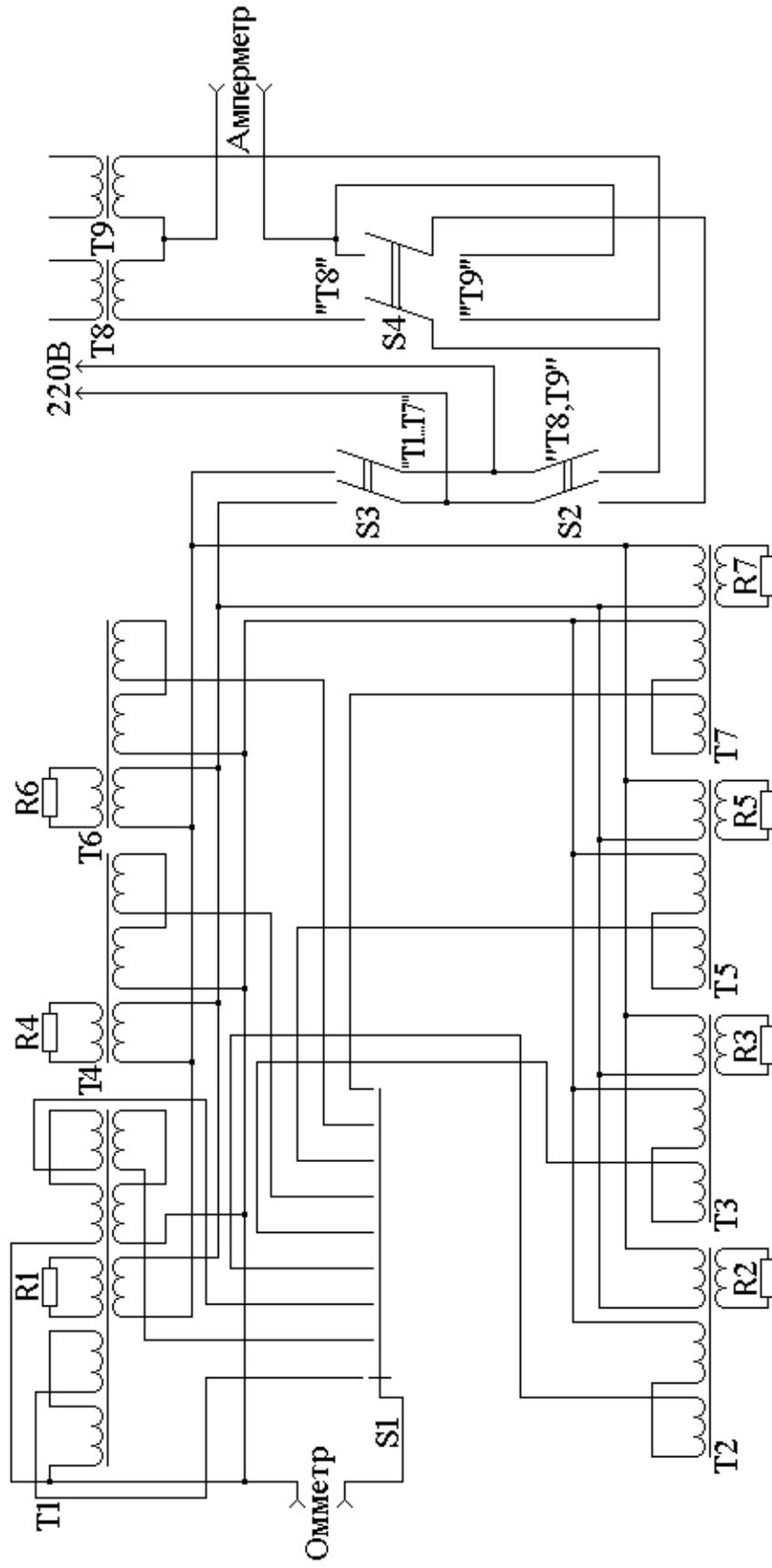


Рисунок 3.10 – Электрическая схема лабораторного макета для исследования ТП

- ТП8 и ТП9 не имеют нагрузки и исследуются в режиме холостого хода. У ТП9 нормальный немагнитный зазор – $\delta \approx 0,1$ мкм, а у ТП8 – повышенный немагнитный зазор $\delta \approx 40$ мкм.

Температура перегрева ТП1...ТП7 определяется косвенным методом – по изменению сопротивления дополнительной (измерительной) обмотки из тонкого медного провода ($d_{ПП} = 0,05$ мм), намотанной бифилярно. В ТП1 таких обмоток три – между каркасом и первичной обмоткой, между первичной и вторичной обмотками и под наружной изоляцией катушки. Это позволяет определить картину распределения температуры перегрева τ по толщине катушки C_K трансформатора. В остальных трансформаторах ТП2...ТП7 имеется только одна измерительная обмотка, расположенная между первичной и вторичной обмотками.

Величина сопротивления измерительных обмоток измеряется цифровым омметром, а перегрев обмоток вычисляется по формуле:

$$\tau = t_p - t_0 = \frac{R_p - R_0}{\alpha_T \cdot R_0}, \quad (4.1)$$

где t_p , t_0 – температура измерительной обмотки в рабочем режиме ТП и температура среды (измерительной обмотки до включения ТП); R_p , R_0 – сопротивление измерительной обмотки при t_p и t_0 , соответственно; α_T – температурный коэффициент изменения сопротивления проводникового материала измерительной обмотки (в данном случае для меди $\alpha_T = 0,00394$ K⁻¹).

Применение бифилярной намотки измерительной обмотки позволяет избавиться от индуктивности, что дает возможность измерять только активное сопротивление обмотки, причем без отключения трансформаторов от сети.

Параметры исследуемых трансформаторов приведены в приложении А (таблицы А1 и А2).

5 ПРОГРАММА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

5.1 Изучить теоретические основы функционирования ТП и особенности тепловых процессов, протекающих в элементах конструкций трансформаторов (раздел 3, [1, 2]).

5.2 Ознакомиться с конструкциями ТП и устройством лабораторной установки (раздел 4, [2, 3]).

5.3 Ознакомиться с методикой измерения сопротивлений с помощью цифрового вольтметра и измерить значения сопротивлений измерительных обмоток (R_0) ТП1...ТП7 при комнатной температуре. Результаты измерений занести в таблицу 5.1 и **обязательно показать преподавателю**.

5.4 Получив разрешение у преподавателя, подключить ТП1...ТП7 к напряжению 220 В (выключатель S3, рисунок 3.10) и измерить сопротивления измерительных обмоток R_p через 15, 30, 60 и 90 мин. Результаты измерений внести в таблицу 5.1 и **показать преподавателю**.

5.5 Рассчитать температуру перегрева обмоток ТП1...ТП7 по формуле (4.1). Результаты внести в таблицу 5.2 и показать преподавателю.

5.6 Подключить ТП8, ТП9 к напряжению 220 В (выключатель S2, рисунок 3.10) и измерить их ток холостого хода, переключая выключатель S4. Результаты измерений внести в протокол. Сделать вывод о влиянии немагнитного зазора на величину тока намагничивания ТП (в выводах).

Таблица 5.1 – Результаты измерений сопротивлений измерительных обмоток ТП1...ТП7

Время измерения	Сопротивления измерительных обмоток, Ом								
	ТП1			ТП2	ТП3	ТП4	ТП5	ТП6	ТП7
	а)	б)	в)						
$t = 0$									
$t = 15 \text{ мин}$									
$t = 30 \text{ мин}$									
$t = 60 \text{ мин}$									
$t = 90 \text{ мин}$									

Примечание:

- а) - измерительная обмотка расположена на каркасе ТП1;
- б) - измерительная обмотка расположена между обмотками W_1 и W_2 ;
- в) - измерительная обмотка расположена снаружи вторичной обмотки.

Таблица 5.2 - Результаты измерений перегрева обмоток ТП1...ТП7

Время измерения	Температура перегрева обмоток ТП, К								
	ТП1			ТП2	ТП3	ТП4	ТП5	ТП6	ТП7
	а)	б)	в)						
$t = 15 \text{ мин}$									
$t = 30 \text{ мин}$									
$t = 60 \text{ мин}$									
$t = 90 \text{ мин}$									

5.7 По экспериментальным данным построить график изменения перегрева обмоток τ_m во времени t для одного из трансформаторов (по указанию преподавателя). Оценить, по какому закону изменяется τ_m от t .

5.8 Построить график зависимости температуры перегрева τ_m от толщины намотки катушки C_K для ТП1 при $t = 90 \text{ мин}$ (см. рисунок 3.9). Параметры катушки приведены в таблице А.2. Сделать вывод о тепловом режиме работы трансформатора.

5.9 Рассчитать аналитически по методике, приведенной в приложении А, температуру перегрева одного из трансформаторов (по указанию

преподавателя). Сравнить результаты расчета с экспериментальными данными (таблица 5.2) и сделать выводы.

5.10 Провести анализ результатов исследований температуры перегрева ТП1...ТП7 (таблица 5.2) и сделать выводы о влиянии различных факторов: нагрузки и сечения провода обмотки, теплового контакта ТП с шасси, теплового шунта, пропитки обмотки на температуру перегрева (см. раздел 4).

6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1 Объяснить принцип работы ТП.
- 6.2 Построить векторную диаграмму токов и напряжения ТП в режиме холостого хода и под нагрузкой.
- 6.3 Чем обусловлен перегрев трансформатора?
- 6.4 Что понимают под перегревом трансформатора?
- 6.5 Почему наибольшее внимание уделяется определению перегрева катушек трансформатора?
- 6.6 Какие факторы оказывают существенное влияние на величину перегрева трансформатора?
- 6.7 От чего зависят потери в сердечнике ТП?
- 6.8 Чем обусловлены потери в катушках трансформатора?
- 6.9 Какие температурные режимы работы ТП вы знаете? Объяснить различие между ними.
- 6.10 Назвать основные типы конструкций ТММ.
- 6.11 На какие электромагнитные параметры ТП оказывает влияние величина немагнитного зазора сердечника?
- 6.12 Чем определяется ток холостого хода трансформатора?
- 6.13 Расшифровать обозначение сердечника - ШЛ 16x25.
- 6.14 Расшифровать запись марки провода – ПЭВ-2-1,44 ГОСТ 7262-78.
- 6.15 Расшифровать запись марки материала сердечника - Ст. 3412-0,35 ГОСТ 21427.1-83.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 Кузевных Н.И. Перспективная элементная база РЭС. Ч.2. Функциональные устройства РЭС: Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2007. – 205 с.
- 2 Белополюский И.И., Каретникова Е.И., Пикалова Л.Г. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.
- 3 Бальян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектроники. – М.: Сов. радио, 1971. – 720 с.
- 4 Кузевных Н.И. Проектирование трансформаторов для РЭС: Методическое пособие по курсовому проектированию.– Томск: ТУСУР, 2011.–109 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕВА
ТРАНСФОРМАТОРА ПИТАНИЯ**

1 Исходные данные

1.1 Напряжение питающей сети – $U_1 = 220 В \pm 10 \%$.

1.2 Частота питающей сети – $f = 50 Гц$.

1.3 Мощность нагрузки – P_2 (см. таблицу А.1).

1.4 Магнитопровод:

≥ а) типоразмер – ШЛ 16 × 25;

≥ б) материал – сталь 3412 (Э320), толщина ленты – 0,35 мм;

≥ в) коэффициент заполнения сердечника – $K_C = 0,93$.

1.5 Корпусная изоляция – $\Delta_{КОР} = \Delta_h/2 = 2,5 мм$.

1.6 Высота намотки катушки – $h_K = 35 мм$.

1.7 Основные параметры и конструктивные особенности исследуемых трансформаторов питания (ТП) приведены в таблице А.1.

Таблица А.1 - Основные параметры и конструктивные особенности ТП

Но- мер ТП	$P_2,$ <i>Вт</i>	$U_2,$ <i>В</i>	δU_1	δU_2	S_{O_2} <i>см²</i>	β_s	Конструктивные особенности ТП
1	36,3	13,2	0,09	0,07	67	1,39	Полное заполнение окна. Провод первичной обмотки тоньше, чем у ТП2
2	36,3	13,2	0,09	0,07	67	1,39	Полное заполнение окна. Провод первичной обмотки тоньше, чем у ТП2
3	8,7	11,5	0,14	0,18	51	1,81	Неполное заполнение окна. Самая низкая мощность нагрузки P_2
4	13,3	10,3	0,14	0,18	51	1,81	Неполное заполнение окна. Низкая мощность нагрузки P_2 . Катушка пропитана
5	12,9	10,0	0,15	0,20	51	1,81	Неполное заполнение окна. Низкая мощность нагрузки P_2 . Тепловой шунт
6	13,6	10,2	0,14	0,18	51	1,81	Неполное заполнение окна. Низкая мощность нагрузки P_2 . Без особенностей
7	13,6	10,2	0,14	0,18	51	1,81	Неполное заполнение окна. Низкая мощность P_2 . Нет теплового контакта с шасси

Примечания:

*) напряжения U_2 на нагрузочных сопротивлениях ТП измерены при напряжении сети $U_1 = 220 В$

***) относительные падения напряжения δU_1 , δU_2 и коэффициент β рассчитаны по формулам $\delta U_1 = \frac{\Delta U_1}{U_1}$, $\delta U_2 = \frac{\Delta U_2}{U_2}$, $\beta = \frac{S_C}{S_O}$.

1.8 Основные параметры обмоток ТП приведены в таблице А.2.

1.9 Параметры изоляции катушек:

- ≥ толщина каркаса – 2 мм;
- ≥ толщина корпусной изоляции – $\Delta_{КОР} = \Delta h/2 = 2,5$ мм;
- ≥ толщина межобмоточной изоляции – $\Delta_{12} = 0,24$ мм;
- ≥ толщина наружной изоляции – $\Delta_{НАР} = 0,24$ мм.

Таблица А.2 - Основные параметры обмоток ТП

Но- мер ТП	Число витков		Параметры проводов: d , мм; q , мм ²						Толщина намотки, мм	
	W_1	W_2	d_1	$d_{1.ИЗ}$	$Q_{ПР.1}$	d_2	$d_{2.ИЗ}$	$Q_{ПР.2}$	C_{01}	C_{02}
1	1644	123	0,23	0,27	0,0416	1,25	1,33	1,227	5,8	7,7
2	1644	123	0,29	0,34	0,0661	1,25	1,33	1,227	6,2	7,7
3-7	2400	148	0,14	0,17	0,0154	0,62	0,69	0,302	3,5	4,0

2 Расчет температуры перегрева ТП

2.1 Определяется противоэдс первичной обмотки

$$E_1 = U_1 - \Delta U_1 = U_1(1 - \delta U_1), \quad (\text{А.1})$$

где δU_1 – относительная величина падения напряжения в первичной обмотке (см. таблицу А.1).

2.2 Определяется рабочая индукция в сердечнике

$$B = E_1 / 4,44 \cdot f \cdot W_1 \cdot Q_C \cdot K_C, \quad (\text{А.2})$$

где $Q_C = a \cdot b$, м² – площадь сечения сердечника (см. [4, таблица Д.1]);

K_C – коэффициент заполнения сердечника сталью (см. пункт 1.4).

Примечание: здесь и далее в амплитудном значении индукции B_m индекс "m" опускается.

2.3 Определяются активные потери в сердечнике

$$P_C = p'_1 \cdot K_T \cdot B^2 \cdot G_C, \quad (\text{А.3})$$

где p'_1 – удельные потери в материале сердечника при индукции $B = 1$ Тл и частоте $f = 50$ Гц. Определяется из таблицы А.3;

K_T – коэффициент увеличения потерь в материале сердечника, обусловленный технологией изготовления сердечника. Определяется из [4, таблица В.4] и увеличивается на 30-50 %, учитывая конкретную технологию;

G_C – масса сердечника, определяется из [4, таблица Д.1].

2.4 Определяются активная I_{0A} и реактивная I_{0P} составляющие тока намагничивания

$$I_{0A} = P_C / E_1, \quad (\text{A.4})$$

$$I_{0P} = (H_C \cdot l_C + 1,1 \cdot B \cdot \delta_C) / W_l, \quad (\text{A.5})$$

где H_C – напряженность магнитного поля в сердечнике. Для стали 3412 определяется по основной кривой намагничивания (ОКН) $B(H)$, представленной в таблице А.4, с использованием линейной аппроксимации;

l_C – длина средней силовой линии, берется из [4, таблица Д.1];

δ_C – величина технологического немагнитного зазора в сердечнике в микрометрах. Может быть приближенно определена по эмпирической формуле

$$\delta_C = 7,56 \cdot Q_C^{0,45} \quad (\text{A.6})$$

Здесь Q_C – в сантиметрах квадратных, а δ_C – в микрометрах.

Таблица А.3 – Свойства электротехнических сталей при частоте 50 Гц

Марка материала (аналог)	Удельные потери p'_i (Вт/кГ) и напряженность H_i (А/м) при индукции $B_i=1,0; 1,5; 1,7$ Тл и частоте 50 Гц (толщина ленты $\Delta_{ЛЕН}=0,35$ мм)					
	p'_1	H_1	$p'_{1,5}$	$H_{1,5}$	$p'_{1,7}$	$H_{1,7}$
3411 (Э310)	0,80	70	1,75	250	2,5	600
3412 (Э320)	0,70	60	1,50	220	2,2	500
3413 (Э330)	0,60	50	1,30	180	1,9	400
3414 (Э330А)	0,50	40	1,10	170	1,6	300

Таблица А.4 – Основная кривая намагничивания для стали 3412 (Э320)

$H, \text{ А/м}$	25	45	60	80	100	150	220	350	500	2500
$B, \text{ Тл}$	0.45	0.80	1.00	1.15	1.25	1.40	1.50	1.62	1.70	1.80

2.5 Определяется ток во вторичной обмотке (в нагрузке)

$$I_2 = P_2 / U_2, \quad (\text{A.7})$$

где P_2 и U_2 – мощность и напряжение нагрузки (см. таблицу А.1).

2.6 Определяется полный ток первичной обмотки

$$I_1 = \sqrt{(I_2' + I_{0A})^2 + I_{0P}^2}, \quad (\text{A.8})$$

где $I_2' = I_2 \cdot W_2 / W_1$ – приведенный ток вторичной обмотки (рабочий ток).

2.7 Определяется длина среднего витка первичной и вторичной обмоток

$$l_{01} = 2 \cdot (a + b + 4 \cdot \Delta_{КОР}) + \pi \cdot C_{01} / 2, \quad (\text{A.9})$$

$$l_{02} = 2 \cdot (a + b + 4 \cdot \Delta_{КОР}) + 2\pi \cdot (C_{01} + \Delta_{12} + C_{02}/2), \quad (\text{A.10})$$

где a и b – основные размеры сердечника (см. [4, таблица Д.1]);

$\Delta_{КОР}$ и Δ_{12} – толщина корпусной и межобмоточной изоляции;

C_{01} и C_{02} – толщина намотки первичной и вторичной обмоток (см. таблицу А.2).

2.8. Определяются активные сопротивления обмоток

$$r_1 = \rho_{20} \cdot K_H \cdot W_1 \cdot l_{01} / q_{ПР.1}, \quad (\text{A.11})$$

$$r_2 = \rho_{20} \cdot K_H \cdot W_2 \cdot l_{02} / q_{ПР.2}, \quad (\text{A.12})$$

где $\rho_{20} = 1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом·м – удельное сопротивление медного провода при температуре 20 °С;

K_H – температурный коэффициент изменения сопротивления провода;

$q_{ПР}$ – площади сечения проводов обмоток (см. таблицу А.2).

$$K_H = 1 + \alpha_T \cdot (t_C + \tau_m / \Gamma - 20), \quad (\text{A.13})$$

где $\alpha_T \approx 0,004$ 1/К – температурный коэффициент изменения удельного сопротивления медного провода;

t_C – температура среды (в лаборатории), °С;

τ_m – максимальная температура перегрева обмоток трансформатора.

Принимается априори, например $\tau_m = 50$ К, а затем уточняется по формуле (А.18);

$\Gamma = \tau_m / \tau$ – коэффициент неравномерности нагрева обмоток. Определяется из таблицы А5 для остальных БТ, а для ТП5 принимается $\Gamma = 1$.

Таблица А.5 – Значения коэффициентов для расчета перегрева ТП

Тип ТММ	Катушки хорошо пропитаны			Катушки не пропитаны			m_1 при хорошем контакте с шасси
	$\alpha,$ Вм/м ² ·К	$\lambda,$ Вм/м·К	Γ	$\alpha,$ Вм/м ² ·К	$\lambda,$ Вм/м·К	Γ	
Малые БТ	10,5	0,2	1,04	9,0	0,1	1,08	1,6
Остальные БТ	10,5	0,2	1,05	9,0	0,1	1,10	1,3
СТ	12	0,2	1,03	10	0,1	1,06	1,3

2.9 Определяются активные потери в обмотках

$$P_O = I_1^2 \cdot r_1 + I_2^2 \cdot r_2 \quad (\text{A.14})$$

2.10 Определяется соотношение потерь в сердечнике и в обмотках

$$v = P_C / P_O. \quad (\text{A.15})$$

2.11 Определяется коэффициент теплоотдачи трансформатора

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \sqrt[4]{\tau_m / 50} \cdot \sqrt[4]{0,05 / h_K} \cdot 0,5 \cdot (1 + \sqrt{H_{\min} / H_{НОР}}) \quad (\text{A.16})$$

где α_0 – коэффициент, пропорциональный коэффициенту теплоотдачи для типового ТП. Находится из таблицы А5;

h_K – высота намотки катушки (в метрах). Измеряется экспериментально (см. пункт 1.6);

H_{min} и $H_{НОР}$ – минимальное и нормальное давление воздуха (в данном случае $H_{min} \approx H_{НОР} = 101 \text{ кПа}$).

2.12 Определяется расчетный коэффициент, учитывающий участие сердечника и шасси в охлаждении обмоток

$$B = 1 + m_1 \cdot \beta_S \cdot \sqrt{\frac{0,6 + v}{1 + 0,2 \cdot v \cdot \beta_S}} \quad , \quad (\text{A.17})$$

где m_1 – коэффициент, учитывающий участие шасси в охлаждении обмоток. Определяется из таблицы А5 для остальных БТ, а для ТП5 принимается $m_1 = 2$;

$\beta = S_C/S_O$ – отношение площадей охлаждения сердечника и катушки (см. таблицу А.1).

2.13 Рассчитывается в первом приближении максимальная температура перегрева обмоток ТП

$$\tau_m = \frac{(P_C + P_O) \cdot \Gamma}{\alpha \cdot B \cdot S_O} \quad . \quad (\text{A.18})$$

2.14 При существенном расхождении полученного значения τ_m с ранее принятым в пункте 2.8 производится уточнение методом последовательных приближений. Полученное значение τ_m подставляется в формулу (16) и рассчитывается α во втором приближении, а затем τ_m по формуле (18) и т.д., пока не сойдется расчет τ_m с точностью до 1 К.