

11/28/1

Одобрено кафедрой  
«Электрификация  
и электроснабжение»

Утверждено  
деканом факультета  
«Транспортные средства»

**ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ ТЯГОВОГО  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

Рабочая программа и задание на контрольную работу  
с методическими указаниями  
для студентов IV курса

специальности  
190401.65 ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ЭЛ)

*2-е издание, стереотипное*

Данная рабочая учебная программа дисциплины является типовой и составлена в соответствии с Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования на основании примерной учебной программы данной дисциплины и удовлетворяет государственным требованиям к минимуму содержания и уровню подготовки инженера по специальности 190401.65 Электроснабжение электрических железных дорог.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 14 февраля 2008 г. № 71 «Об утверждении Типового положения об образовательном учреждении высшего профессионального образования (высшем учебном заведении)» рабочая учебная программа обновляется ежегодно.

Обновленная версия рабочей учебной программы размещена на сайте РОАТ (<http://www.rgotups.ru>).

**А в т о р** — д-р техн. наук, проф. Н.П.Кириллов

**Р е ц е н з е н т** — канд. техн. наук, доц. А.Ф. Харченко

## 1. ЦЕЛЬ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Дисциплина «Трансформаторы для тягового электроснабжения железных дорог» является дисциплиной общепрофессионального цикла, поэтому целью ее изучения является формирование у студентов комплекса знаний по общей и специальной теории трансформаторов применительно к электрическому железнодорожному транспорту.

Дисциплина основывается на знаниях студентами курсов общей электротехники и электроматериаловедения.

Материал дисциплины обеспечивает усиленное освоение дисциплин «Электроснабжение железнодорожного транспорта» и «Тяговые подстанции».

## 2. ТРЕБОВАНИЯ К УРОВНЮ ОСВОЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Изучив дисциплину, студент должен:

2.1. Знать и уметь использовать: основы теории трансформаторов промышленного назначения и особенности трансформаторов, применяемых на объектах железнодорожного транспорта.

2.2. Иметь опыт: экспериментального определения вторичных параметров трансформаторов в режимах холостого хода и короткого замыкания и выбора первичных параметров трансформаторов для тягового электроснабжения по справочным данным.

2.3. Иметь представление: об алгоритме расчета трансформаторов общего и специального назначения.

## 3. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ И ВИДЫ УЧЕБНОЙ РАБОТЫ

| Вид учебной работы            | Всего часов              | Курс |
|-------------------------------|--------------------------|------|
| Общая трудоемкость дисциплины | 70                       | IV   |
| Аудиторные занятия            | 12                       |      |
| Лекции                        | 4                        |      |
| Лабораторные работы           | 8                        |      |
| Самостоятельная работа        | 43                       |      |
| Контрольная работа            | 15                       | 1    |
| Вид итогового контроля        | Дифференцированный зачет |      |

## 4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 4.1. РАЗДЕЛЫ ДИСЦИПЛИНЫ И ВИДЫ ЗАНЯТИЙ

| Раздел дисциплины                                  | Лекции, ч | Лабораторный практикум, ч |
|--|-----------|---------------------------|
| Основные сведения о трансформаторах                |           |                           |
| Режимы работы трансформаторов                      |           | 4                         |
| Работа трансформатора под нагрузкой                | 2         |                           |
| Работа трансформаторов при несимметричной нагрузке |           |                           |
| Параллельная работа трансформаторов                |           |                           |
| Особенности тяговых трансформаторов                | 2         | 4                         |
| Расчет трансформаторов                             |           |                           |

### 4.2. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ

#### *Раздел 1. Основные сведения о трансформаторах*

1. Принцип действия и математическая модель электромагнитных процессов. Виды трансформаторов и их основные конструктивные элементы [1, гл. 12, с. 242...261].

#### *Раздел 2. Режим работы трансформаторов*

2. Приведение вторичной обмотки трансформатора к первичной. Схема замещения трансформатора. Определение параметров схемы замещения трансформатора (режимы хх и кз) [1, гл. 14, с. 262...272, 2, лр №1, стр. 5...17].

#### *Раздел 3. Работа трансформатора под нагрузкой*

3. Физические условия работы, векторные и энергетические диаграммы трансформатора. Изменение напряжения трансформатора. Коэффициент полезного действия трансформатора и его внешняя характеристика [1, гл. 15, с. 273...283].

#### *Раздел 4. Работа трансформаторов при несимметричной нагрузке*

4. Применение метода симметрично составляющих. Физические условия работы трансформаторов при несимметричной нагрузке [1, гл. 16, с. 284...294].

### **Раздел 5. Параллельная работа трансформаторов**

5. Условия параллельной работы трансформаторов. Параллельное включение трансформатора с неодинаковыми группами обмоток с неодинаковыми коэффициентами трансформации, а также с неодинаковыми напряжениями короткого замыкания [1, гл. 17, с. 295...301].

### **Раздел 6. Особенности тяговых трансформаторов**

6. Условия работы тяговых трансформаторов. Трансформаторы для различных систем регулирования напряжения. Конструктивные особенности тяговых трансформаторов [4, гл. 10, с. 290...308, 2, лр №3, с. 23...38].

### **Раздел 7. Расчет трансформаторов**

7. Особенности расчета тяговых трансформаторов. Алгоритм и методика ускоренного расчета трансформаторов [4, гл. 10, с. 308...312; 3, гл. П5, с. 442...454].

## **4.3. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

| Номер раздела дисциплины | Лабораторная работа  |
|--------------------------|--|
| 2                        | Исследование режима трансформатора при изменении коэффициента трансформации  |
| 6                        | Исследование трехфазных и трехфазно-двухфазных трансформаторов тяговой подстанции переменного тока при работе на симметричную нагрузку |

## **4.4. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ**

Не предусмотрено.

## **5. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА**

Самостоятельная работа студентов является основным методом изучения материала дисциплины, поэтому время, отводимое на самостоятельную работу, каждый студент использует по индивидуальному плану. Для более эффективного использования времени при выполнении задания контрольной работы по

расчету силовых трансформаторов в задании приведены конкретные примеры расчета тороидального и броневых трансформаторов, поэтому студент выбирает магнитопровод, проводит расчеты обмоток, проверяет условия размещения обмоток по проведенным рекомендациям готовых расчетов.

## **РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

### *Основная*

1. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины: Учеб. — СПб.: Питер, 2007. — 320 с.
2. Герман Л.А. Трансформаторы для тягового электроснабжения железных дорог. Руководство по выполнению лабораторных работ. — М.: РГОТУПС, 2007. — 42 с.

### *Дополнительная*

3. Бут Д.А. Основы электромеханики: Уч. пос. — М.: МАИ, 1996. — 468 с.
4. Захарченко Д.Д., Котанов Н.А. Тяговые электрические машины: Учеб. — М.: Транспорт, 1991. — 343 с.
4. Электротехнический справочник. Т2 / Под ред. В.Г. Герасимова. — М.: МЭИ, 2003. — 518 с.

## **7. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

Специализированная лаборатория «Электрические машины», позволяющая выполнять лабораторные работы по исследованию трансформаторов в соответствии с учебным планом.

## **8. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

Основной формой изучения дисциплины является самостоятельная работа студентов-заочников с рекомендованной литературой. Самостоятельная работа организуется и направляется

настоящей рабочей программой, а также системой лекций, лабораторных занятий и контрольной работой.

Подготовка краткого конспекта в соответствии с вопросами рабочей программы является обязательным условием успешного усвоения предмета.

Во время лабораторно-экзаменационных сессий в помощь студентам-заочникам читаются обзорные лекции.

Необходимо помнить, что в обзорных лекциях излагается не весь материал предмета, а лишь его основные положения.

## ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ

### 1. РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРА

Заданные величины:

частота питающей сети  $f$ , Гц; напряжение питающей сети  $U_C$ , В; напряжение вторичных обмоток при нагрузке  $U_2, U_3, U_4 \dots U_n$ , В; токи вторичных обмоток  $I_2, I_3, I_4 \dots I_n$ , А; максимальная температура окружающей среды  $t_0$ , °С; допустимая температура нагрева трансформатора  $t_1$ , °С.

#### 1.1. Выбор магнитопровода

Определяют мощность, отдаваемую трансформатором,

$$P = \sum_{i=2}^n U_i I_i. \quad (1)$$

В соответствии с полученным значением  $P$  по формуле

$$Q_0 Q_{CT} = \frac{P(1 + \eta) \cdot 10^6}{4,44 \cdot f \cdot B_m \cdot j \cdot k_M \cdot k_{CT} \cdot \eta} \text{ см}^4 \quad (2)$$

находят величину произведения  $Q_0 Q_{CT}$ .

Здесь  $B_m$  — допустимая индукция в магнитопроводе в  $T_n$ ;

$j$  — плотность тока в  $\text{А/мм}^2$ ;

$k_M$  и  $k_{СТ}$  — коэффициент заполнения намоточного окна медью и соответственно сечения магнитопровода сталью;

$\eta$  — коэффициент полезного действия трансформатора.

Для броневых трансформаторов величину  $B_m$  находят по графикам, приведенным на рис. 1 и 2, величину  $j$  — по графикам, представленным на рис. 3.

Для тороидальных трансформаторов величины  $B_m$  и  $j$  приведены на рис.4.

Величины КПД для броневых и тороидальных трансформаторов берут по графику, приведенному на рис. 5, а величину  $k_{СТ}$  принимают равной 0,85.

Для броневых трансформаторов величина  $k_M$  может быть усреднена и принята равной 0,2—0,3, что зависит от мощности и напряжения. С увеличением напряжения и уменьшением мощности  $k_M$  берется меньше, и наоборот.

Зависимость  $k_M$  от мощности для тороидальных трансформаторов приводится на рис. 6.

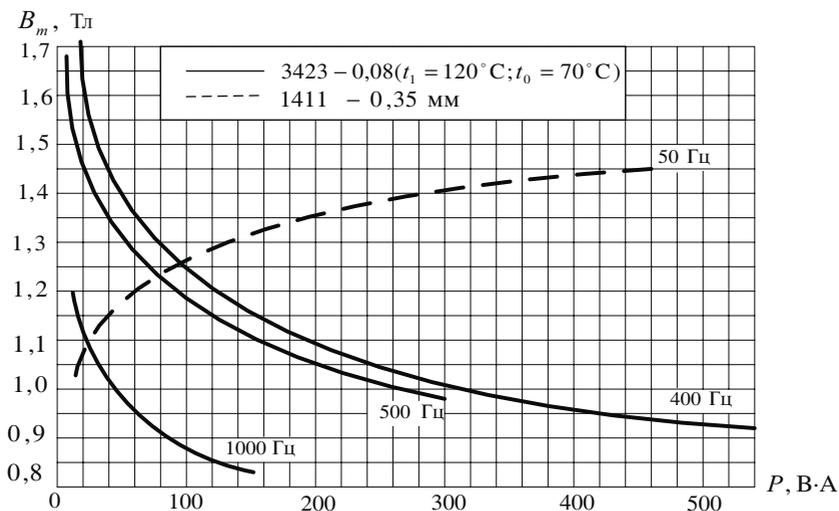


Рис. 1. Зависимость допустимой индукции в среднем стержне броневых трансформаторов от мощности трансформатора

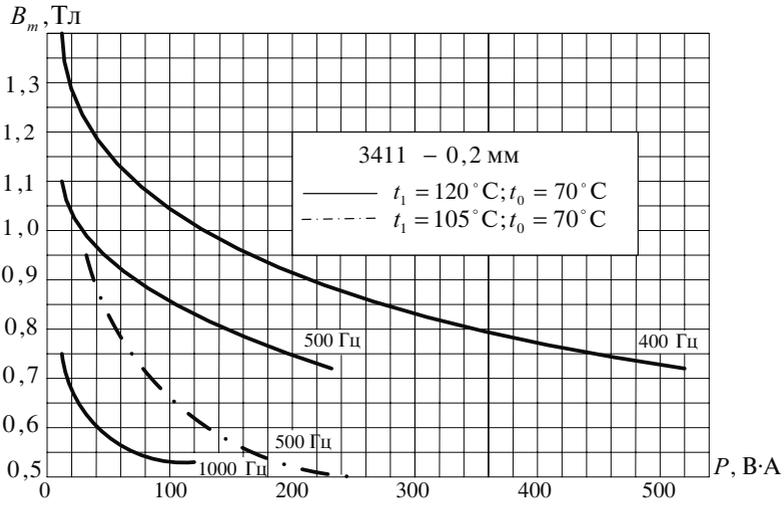


Рис. 2. Зависимость допустимой индукции в среднем стержне броневого трансформатора от мощности трансформатора

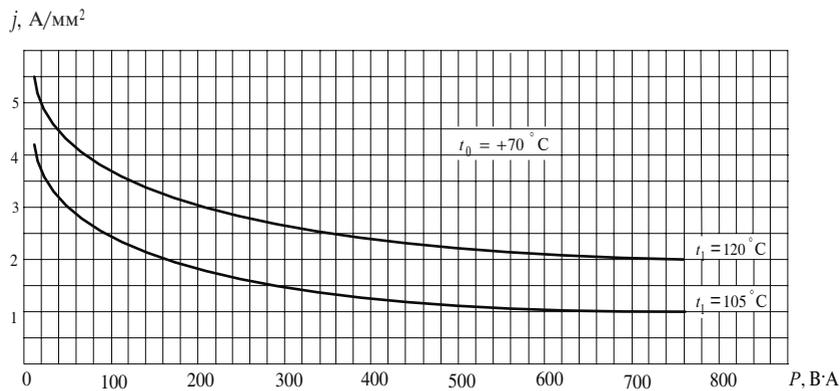


Рис. 3. Зависимость допустимой плотности тока от мощности трансформатора

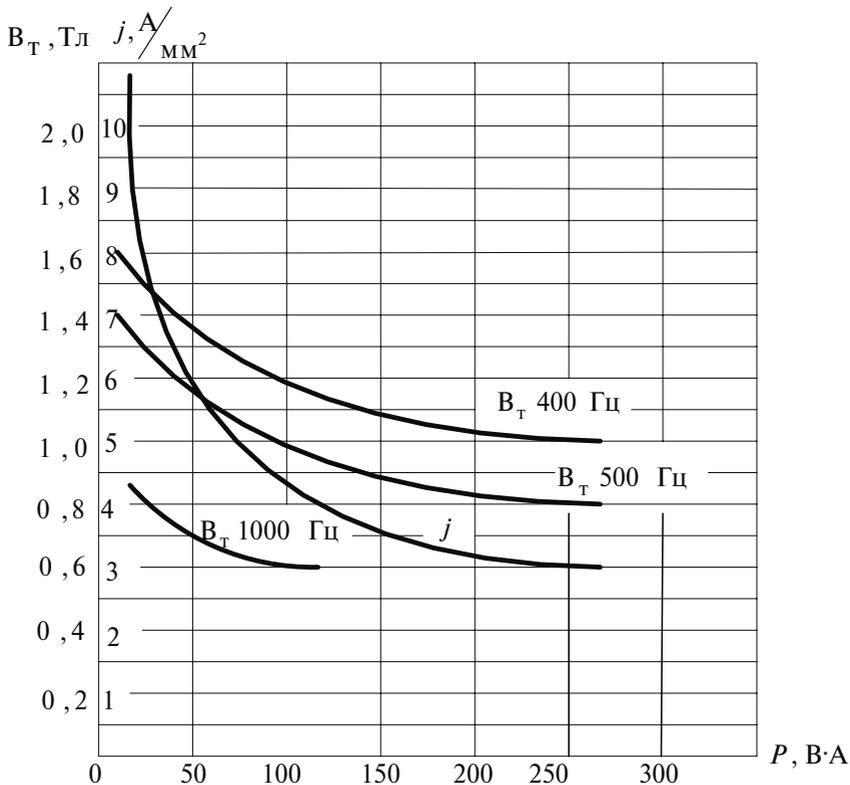


Рис. 4. Зависимость индукции и плотности тока от мощности тороидального трансформатора с магнитопроводом из стали 3423–0,08 мм

Как следует из изложенного, расчет  $Q_O Q_{CT}$  является сравнительно громоздким. Для облегчения и ускорения расчета можно заранее рассчитать по формуле (2) зависимость  $Q_O Q_{CT}$  от мощности  $P$  и представить ее графически.

Подобные графики для броневых трансформаторов приведены на рис. 5, 6, 7.

По найденному значению  $Q_O Q_{CT}$  из табл.1–3 выбирают магнитопровод.

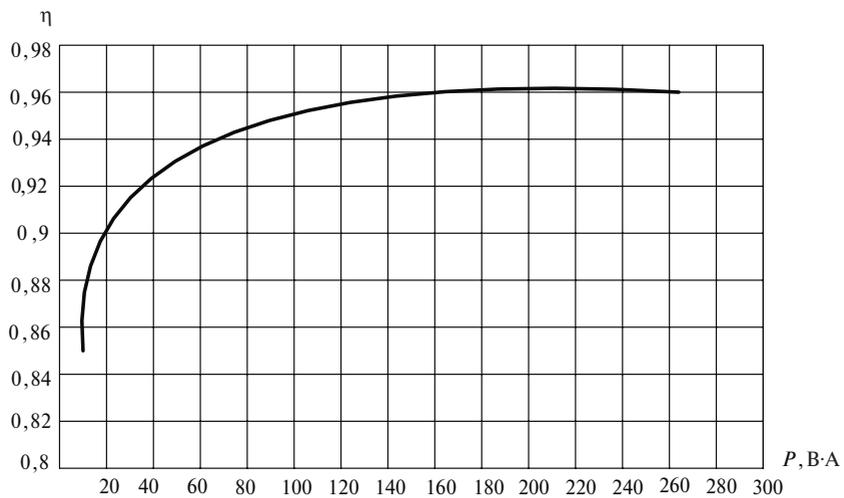


Рис. 5. Зависимость КПД от мощности трансформатора

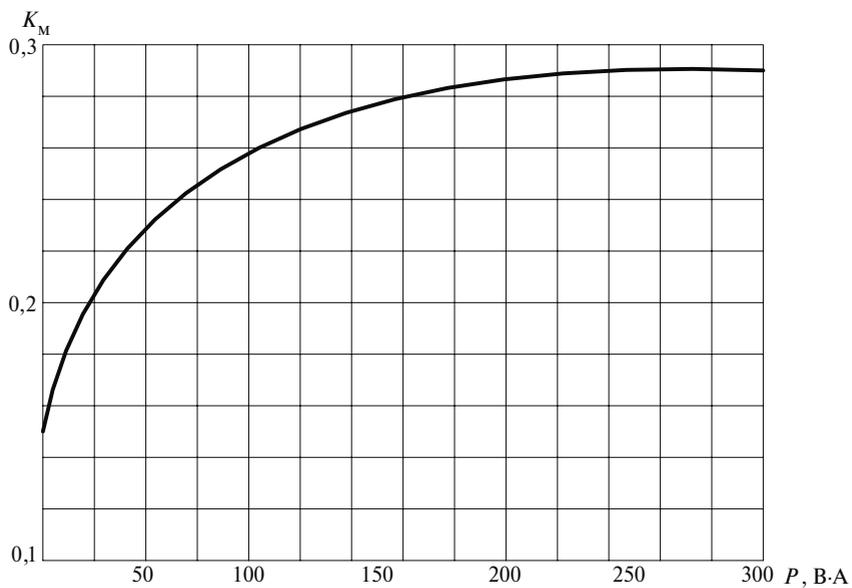


Рис. 6. Зависимость коэффициента заполнения медью от мощности тороидального трансформатора

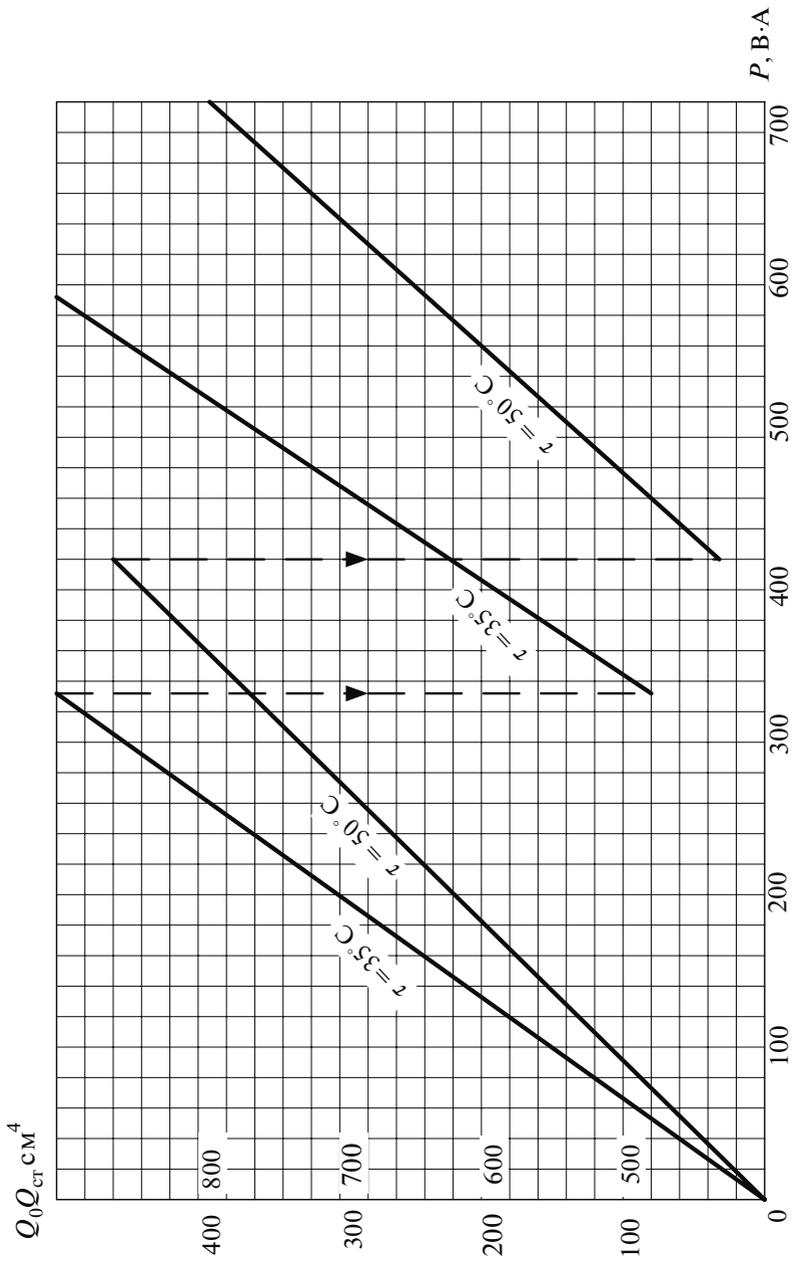


Рис. 7

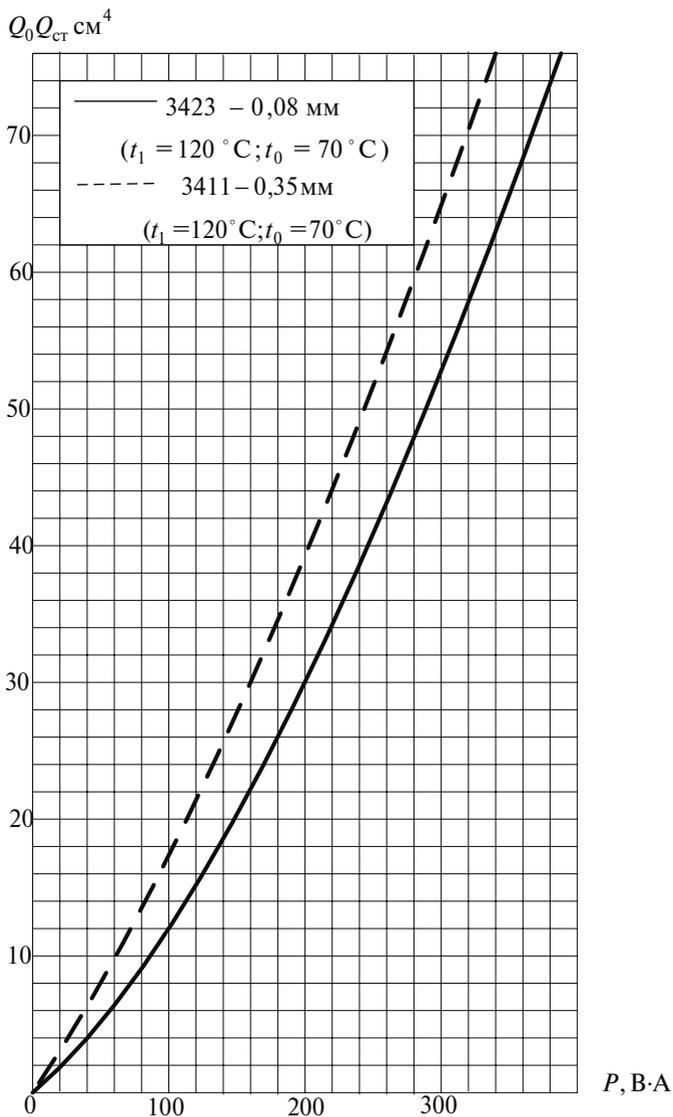


Рис. 8. Зависимость произведения  $Q_0 Q_{СТ}$  от мощности броневоегo трансформатора на штампованном (сталь толщиной 0,2 мм) или ленточном (электрическая лента – сталь толщиной 0,08 мм) магнитопроводе на частоте 400

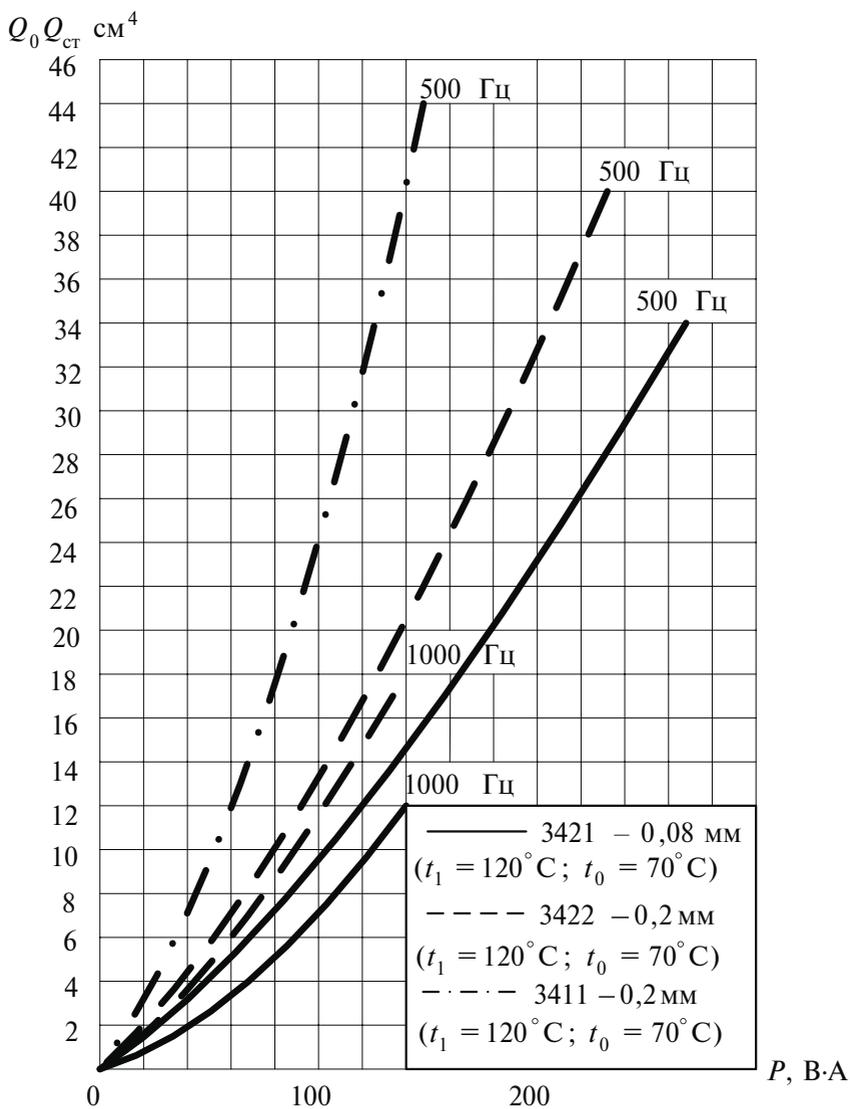


Рис. 9. Зависимость произведения  $Q_0 Q_{CT}$  от мощности того же трансформатора на частоте 500 и 1000 Гц

Таблица 1

## Штампованные броневые магнитопроводы

| Пластинки | Магнитопровод          |      |                  |    | Справочные данные            |                              |                                   |   |                               |                               |                           |       |
|-----------|------------------------|------|------------------|----|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|-------|
|           | габаритные размеры, мм |      | размеры окна, мм |    | $Q_{ст},$<br>см <sup>2</sup> | $Q_{о,2}$<br>см <sup>2</sup> | $Q_{о}Q_{ст},$<br>см <sup>2</sup> | $G_{ст},$ кг<br>сталь 3421<br>толщины<br>0,2 мм | $l_{о,уд}$<br>см <sup>2</sup> | $S_{о,уд}$<br>см <sup>2</sup> | $\sigma,$ см <sup>2</sup> |       |
|           | L                      | H    | b                | a  |                              |                              |                                   |   |                               |                               |                           | h     |
| Ш-9       | 36                     | 31,5 | 10               | 9  | 22,5                         | 0,9                          | 2,025                             | 1,82  | 0,047                         | 7,72                          | 49,9                      | 13,4  |
|           |                        |      | 12               |    |                              | 1,8                          |                                   | 2,19  | 0,056                         |                               | 52,6                      | 14,2  |
| Ш-12      |                        |      | 12               |    |                              | 1,44                         |                                   | 5,18  | 0,1                           |                               | 86,4                      | 30,8  |
|           | 48                     | 42   | 16               | 12 | 30                           | 1,92                         | 3,6                               | 6,91  | 0,131                         | 10,03                         | 93,5                      | 33,7  |
|           |                        |      | 20               |    |                              | 2,4                          |                                   | 8,64  | 0,166                         |                               | 101,0                     | 36,55 |
|           |                        |      | 25               |    |                              | 3,0                          |                                   | 10,8  | 0,207                         |                               | 110,0                     | 40,18 |
| Ш-16      |                        |      | 16               |    |                              | 2,56                         |                                   | 16,4  | 0,243                         |                               | 153,6                     | 73,2  |
|           | 64                     | 56   | 20               | 16 | 40                           | 3,2                          | 6,4                               | 20,48   | 0,299                         | 13,7                          | 163,2                     | 78,35 |
|           |                        |      | 25               |    |                              | 4,0                          |                                   | 25,6  | 0,373                         |                               | 175,0                     | 84,6  |
|           |                        |      | 32               |    |                              | 5,12                         |                                   | 32,8  | 0,473                         |                               | 192,0                     | 93,7  |
| Ш-20      |                        |      | 20               |    |                              | 4,0                          |                                   | 40  | 0,462                         |                               | 240                       | 142,8 |
|           | 80                     | 70   | 25               | 20 | 50                           | 5,0                          | 10                                | 50  | 0,585                         | 17,14                         | 255                       | 152,8 |
|           |                        |      | 32               |    |                              | 6,4                          |                                   | 64  | 0,738                         |                               | 276                       | 166,8 |
|           |                        |      | 40               |    |                              | 8,0                          |                                   | 80  | 0,935                         |                               | 300                       | 182,8 |

| Пластини | Магнитопровод             |      |                     |     | Справочные данные             |                                |                                   |                                |                   |                                |                            |
|----------|---------------------------|------|---------------------|-----|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|----------------------------|
|          | габаритные размеры,<br>мм |      | размеры<br>окна, мм |     | $Q_{CT}$ ,<br>см <sup>2</sup> | $Q_{O_2}$ ,<br>см <sup>2</sup> | $Q_{O_{CT}}$ ,<br>см <sup>2</sup> | $Q_{CT}$ , кг<br>сталь<br>3421 | $l_{oxy}$ ,<br>см | $S_{oxy}$ ,<br>см <sup>2</sup> | $\sigma$ , см <sup>2</sup> |
|          | $L$                       | $H$  | $b$                 | $a$ |                               |                                |                                   |                                |                   |                                |                            |
| Ш-25     |                           |      | 25                  |     | 6,25                          |                                | 97,5                              | 0,903                          |                   | 375                            | 279                        |
|          |                           | 87,5 | 32                  | 25  | 8,0                           | 15,63                          | 125                               | 1,154                          | 21,4              | 401,3                          | 301                        |
|          | 100                       |      | 40                  |     | 10,0                          |                                | 156,3                             | 1,442                          |                   | 431,3                          | 326                        |
| Ш-32     |                           |      | 50                  |     | 12,5                          |                                | 195                               | 1,805                          |                   | 468,8                          | 357                        |
|          |                           |      | 32                  |     | 10,24                         |                                | 262,1                             | 1,885                          |                   | 614,4                          | 585                        |
|          | 128                       | 112  | 40                  | 32  | 12,8                          | 25,6                           | 328                               | 2,36                           | 27,4              | 652,8                          | 625                        |
|          |                           |      | 50                  |     | 16,0                          |                                | 409,6                             | 2,96                           |                   | 700                            | 675                        |
|          |                           |      | 64                  |     | 20,48                         |                                | 524,3                             | 3,78                           |                   | 768                            | 748                        |

Таблица 2

## Ленточные броневые магнитопроводы

| Тип   | Магнитопровод             |      |                     |      | Справочные данные             |                            |                                |  |                                |                                |                            |
|-------|---------------------------|------|---------------------|------|-------------------------------|----------------------------|--------------------------------|--|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
|       | габаритные размеры,<br>мм |      | размеры<br>окна, мм |      | $Q_{СТ}$ ,<br>см <sup>2</sup> | $Q_0$ ,<br>см <sup>2</sup> | $Q_0 Q_{СТ}$ , см <sup>2</sup> | $G_{СТ}$ , кг<br>ст. лент<br>толщиной<br>0,08 мм | $l_{окл}$ ,<br>см <sup>2</sup> | $S_{окл}$ ,<br>см <sup>2</sup> | $\sigma$ , см <sup>2</sup> |
|       | $L$                       | $H$  | $b$                 | $a$  |                               |                            |                                |  |                                |                                |                            |
| ШЛ-6  | 24                        | 22   | 6,25                | 6    | 0,39                          | 0,96                       | 0,374                          | 0,014  | 5,32                           | 22,2                           | 4,22                       |
|       |                           |      | 10                  | 16   | 0,6                           |                            | 0,576                          | 0,0234   |                                | 25,2                           | 4,89                       |
|       |                           |      | 15                  |      | 0,9                           |                            | 0,864                          |  |                                |                                |                            |
| ШЛ-9  | 36                        | 32,5 | 6,5                 | 9    | 0,585                         | 2,115                      | 1,33                           | 0,0356   | 7,88                           | 45,2                           | 8,75                       |
|       |                           |      | 10                  | 23,5 | 0,9                           |                            | 1,9                            | 0,0508   |                                | 50,0                           | 14                         |
|       |                           |      | 15                  |      | 1,35                          |                            | 2,85                           | 0,061  |                                | 56,7                           | 17,8                       |
| ШЛ-12 | 48                        | 43   | 10                  | 12   | 1,2                           |                            | 4,47                           | 0,086  | 10,45                          | 82,75                          | 30,3                       |
|       |                           |      | 15                  | 31   | 1,8                           | 3,72                       | 6,7                            | 0,13   |                                | 91,75                          | 34                         |
|       |                           |      | 20                  |      | 2,4                           |                            | 8,92                           | 0,178  |                                | 101,0                          | 37,8                       |
| ШЛ-16 | 64                        | 57   | 25                  | 16   | 3,0                           | 6,56                       | 11,16                          | 0,222  | 13,87                          | 110,0                          | 41,1                       |
|       |                           |      | 15                  | 41   | 2,4                           |                            | 15,75                          | 0,232  |                                | 151                            | 73,3                       |
|       |                           |      | 20                  |      | 3,2                           |                            | 21                             | 0,33   |                                | 163,2                          | 80                         |
|       |                           | 25   | 16                  | 4,0  |                               | 26,2                       | 0,39                           |  | 175,1                          | 89                             |                            |
|       |                           | 32   |                     | 5,12 |                               | 33,6                       |                                | 0,5  |                                | 192                            | 96,5                       |

| Тип   | Магнитопровод             |       |                     |       | Справочные данные             |                            |                              |  |                                       |                                       |                            |
|-------|---------------------------|-------|---------------------|-------|-------------------------------|----------------------------|------------------------------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
|       | габаритные размеры,<br>мм |       | размеры<br>окна, мм |       | $Q_{СТ}$ ,<br>см <sup>2</sup> | $Q_0$ ,<br>см <sup>2</sup> | $Q_0 Q_{СТ}$ см <sup>2</sup> | $G_{СТ}$ , кг<br>ст. лент<br>толщиной<br>0,08 мм | $l_{\text{оуп}}$ ,<br>см <sup>2</sup> | $S_{\text{оуп}}$ ,<br>см <sup>2</sup> | $\sigma$ , см <sup>2</sup> |
|       | $L$                       | $H$   | $b$                 | $a$   |                               |                            |                              |  |                                       |                                       |                            |
| ШЛ-20 | 80                        | 73    | 20                  | 20    | 4,0                           | 10,2                       | 40,8                         | 0,474  | 17,3                                  | 240                                   | 146                        |
|       | 25                        | 32    | 20                  | 51    | 5,0                           | 65,3                       | 51                           | 0,592  | 255                                   | 156                                   |                            |
|       | 40                        | 40    | 81,6                | 8,0   | 6,4                           | 81,6                       | 0,758                        | 276  | 170                                   |                                       |                            |
| ШЛ-25 | 25                        | 32    | 25                  | 63,5  | 6,25                          | 15,87                      | 99,3                         | 0,92   | 375                                   | 283                                   |                            |
|       | 32                        | 40    | 40                  | 50    | 8,0                           | 10,0                       | 127                          | 1,18   | 401,3                                 | 306                                   |                            |
|       | 40                        | 50    | 12,5                | 10,24 | 10,0                          | 12,5                       | 158,75                       | 1,47   | 431,3                                 | 332                                   |                            |
| ШЛ-32 | 128                       | 117,5 | 32                  | 81    | 12,8                          | 25,9                       | 265,5                        | 1,93   | 614,4                                 | 591                                   |                            |
|       | 40                        | 331,5 | 2,41                | 652,8 | 27,55                         | 634                        |                              |  |                                       |                                       |                            |

Т а б л и ц а 3

**Ленточные тороидальные магнитопроводы**

| Размер магнитопровода | Магнитопровод          |     |     |          | Справочные данные          |                         |                                |               |                             |
|-----------------------|------------------------|-----|-----|----------|----------------------------|-------------------------|--------------------------------|---------------|-----------------------------|
|                       | габаритные размеры, мм |     |     | $a$ , мм | $Q_{СТ}$ , см <sup>2</sup> | $Q_0$ , см <sup>2</sup> | $Q_0 Q_{СТ}$ , см <sup>2</sup> | $G_{СТ}$ , кг | $l_{охл}$ , см <sup>2</sup> |
|                       | $L$                    | $H$ | $b$ |          |                            |                         |                                |               |                             |
| 20/28-6,5             | 20                     | 28  | 6,5 | 4        | 0,26                       | 1,13                    | 0,294                          | 0,0128        | 7,52                        |
| 20/28-10              | 20                     | 28  | 10  | 4        | 0,40                       |                         | 0,452                          | 0,0208        | 7,52                        |
| 20/32-10              | 20                     | 32  | 10  | 6        | 0,6                        |                         | 0,678                          | 0,0318        | 8,16                        |
| 20/32-15              | 20                     | 32  | 10  | 6        | 0,9                        |                         | 1,016                          | 0,0477        | 8,16                        |
| 25/35-10              | 25                     | 35  | 10  | 5        | 0,5                        | 2,9                     | 1,45                           | 0,0306        | 9,42                        |
| 25/39-10              | 25                     | 39  | 10  | 7        | 0,7                        |                         | 2,03                           | 0,0457        | 10,04                       |
| 25/39-15              | 25                     | 39  | 15  | 7        | 1,05                       |                         | 3,045                          | 0,0685        | 10,04                       |
| 30/42-15              | 30                     | 42  | 15  | 6        | 0,9                        | 5,05                    | 4,55                           | 0,0661        | 11,3                        |
| 30/46-15              | 30                     | 46  | 15  | 8        | 1,2                        |                         | 6,06                           | 0,0933        | 11,92                       |
| 35/53-15              | 35                     | 53  | 15  | 9        | 1,35                       | 7,61                    | 10,27                          | 0,1215        | 13,8                        |
| 35/55-20              | 35                     | 55  | 20  | 10       | 2,0                        |                         | 15,22                          | 0,1835        | 14,12                       |
| 40/60-20              | 40                     | 60  | 20  | 10       | 2,0                        | 10,55                   | 21,1                           | 0,204         | 15,7                        |
| 40/60-25              | 40                     | 60  | 25  | 10       | 2,5                        |                         | 26,4                           | 0,255         | 15,70                       |
| 45/65-25              | 45                     | 65  | 25  | 10       | 2,5                        | 13,9                    | 34,7                           | 0,284         | 17,3                        |
| 45/69-25              | 45                     | 69  | 25  | 12       | 3,0                        |                         | 41,6                           | 0,349         | 17,9                        |

Материал: сталь, электротехническая лента 0,08 мм 79 НМ ГОСТ 10160-75, геометрические размеры сердечников показаны на рис.10.

**1.2. РАСЧЕТ ОБМОТК**

Вычисляют ЭДС одного витка

$$e_B = 4,44 \cdot f \cdot Q_{СТ} \cdot k_{СТ} \cdot B_m \cdot 10^{-8} \text{ В}, \quad (3)$$

где  $B_m$  находят по графику рис.1, 2 или 4 в зависимости от типа магнитопровода.

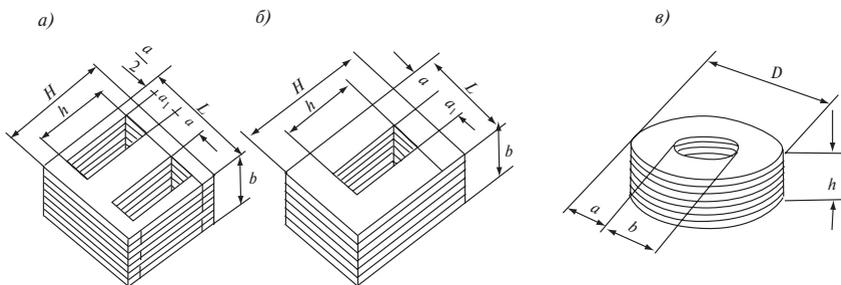


Рис. 10. Штампованные магнитопроводы:  
 $a$  – броневого;  $b$  – стержневой;  $\sigma$  – тороидальный

Определяют число витков первичной обмотки

$$\omega_1 = \frac{E_1}{e_B} = \frac{U_C \left(1 - \frac{\Delta U}{100}\right)}{e_B}, \quad (4)$$

где  $E_1$  — ЭДС первичной обмотки;

$\Delta U$  — падение напряжения на обмотках в % от номинального значения; находят по графику рис. 11.

Проводят уточнение значения ЭДС одного витка

$$e_{B.Y.} = \frac{E_1}{\omega_1}, \quad (5)$$

Вычисляют число витков вторичных обмоток

$$\omega_i = \frac{E_i}{e_{B.Y.}} = \frac{U_i \left(1 + \frac{\Delta U}{100}\right)}{e_{B.Y.}}, \quad (6)$$

где  $E_i$  — ЭДС вторичных обмоток.

Полученные расчетом значения  $w_i$  округляют с точностью до одного витка при  $w_i \geq 100$  и с точностью до половины витка при  $w_i < 100$ .

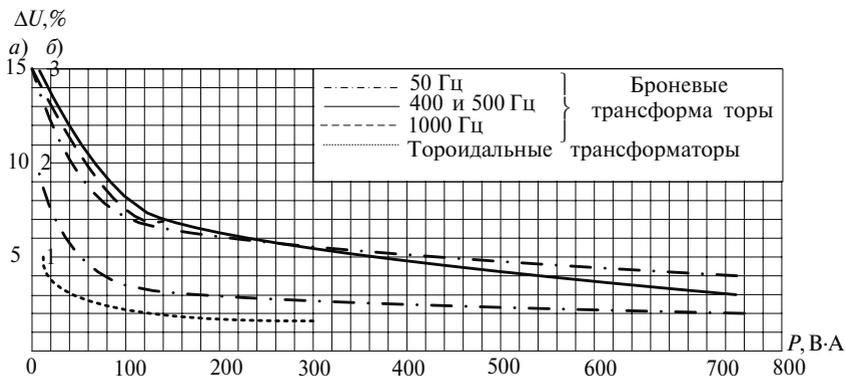


Рис. 11. Зависимость  $\Delta U$ , % от мощности броневых и тороидальных трансформаторов

### 1.3. РАСЧЕТ ПОЛНОГО ТОКА ПЕРВИЧНОЙ ОБМОТКИ

Определяют ток холостого хода при выбранной индукции  $B_m$ :

$$I_0 = \frac{H \cdot l_{CP}}{\omega_1}. \quad (7)$$

При этом величину удельных ампервитков  $H$  определяют по кривой намагничивания рис. 12 — для броневых или рис. 13 — для тороидальных трансформаторов.

Вычисляют ток намагничивания магнитопровода при нагрузке

$$I_\mu = \sqrt{I_0^2 - I_{CT}^2} = \sqrt{I_0^2 - \left( \frac{G_{CT} \cdot P_y}{E_1} \right)^2}, \quad (8)$$

где  $I_{CT}$  — ток, вызванный потерями в магнитопроводе;

$P_y$  — удельные потери в магнитопроводе в Вт/кг, определяемые по графику рис. 14 — для броневых или рис. 15 — для тороидальных трансформаторов;

$G_{CT}$  — масса магнитопровода, находят по табл. 1–3.

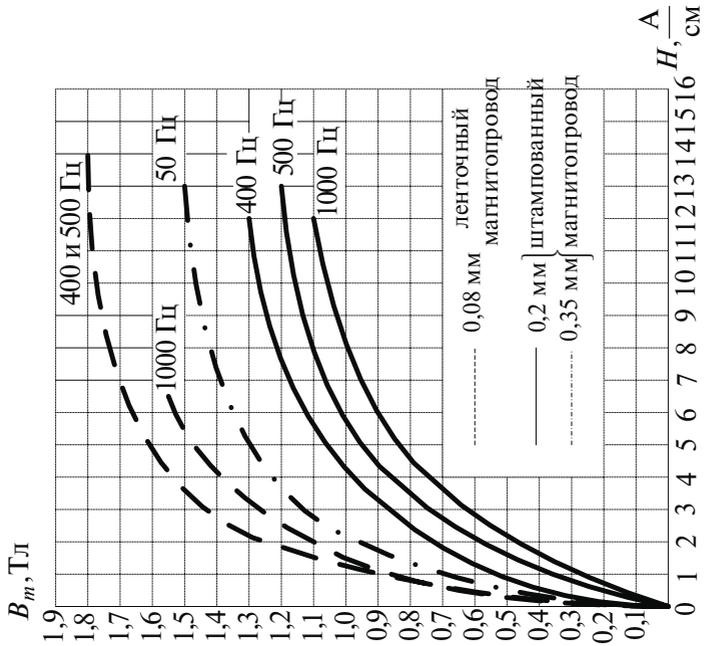


Рис. 12. Кривые намагничивания броневых магнитопроводов из стали толщиной 0,2 мм и электротехнической ленты толщиной 0,08 мм на частоте 400, 500 и 1 000 Гц и из стали толщиной 0,35 мм на частоте 50 Гц

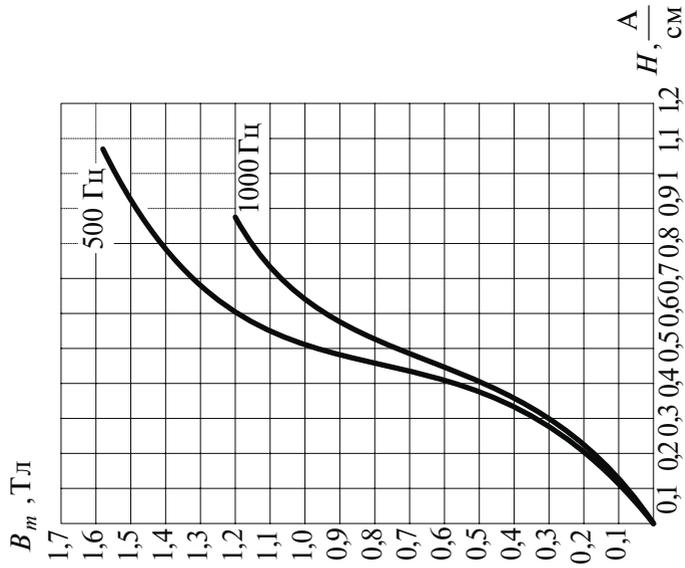


Рис. 13. Кривые намагничивания тороидальных магнитопроводов из стали толщиной 0,08 мм

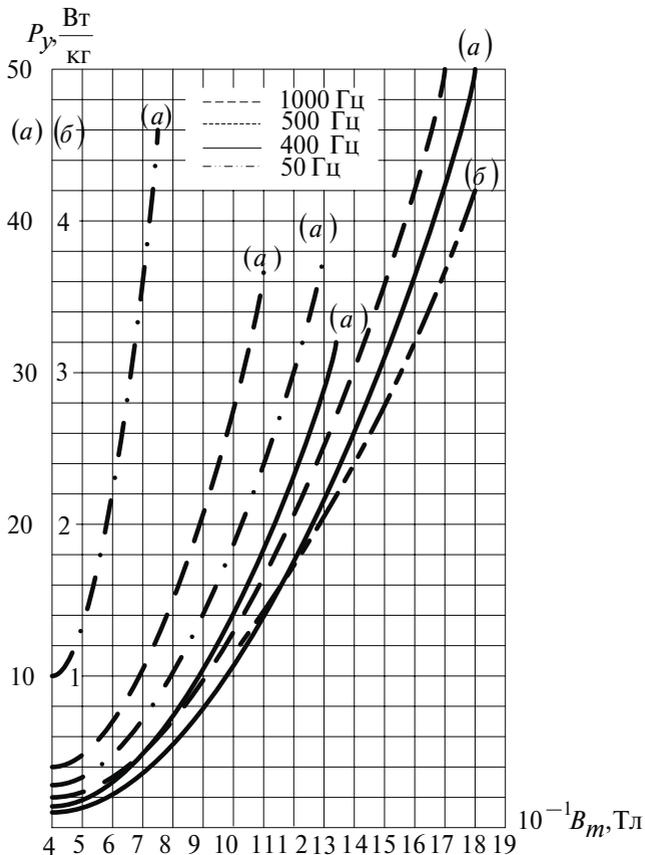


Рис.14. Кривые удельных потерь броневых сердечников из стали 79НМ, 3423 (электротехническая лента)

Рассчитывают полный ток первичной обмотки

$$I_1 = \sqrt{(I_1' + I_{CT})^2 + I_{\mu}^2}, \quad (9)$$

где  $I_1'$  – ток первичной обмотки без потерь в магнитопроводе и тока намагничивания при работе на активную нагрузку, равный

$$I'_1 = \sum_{i=2}^n \frac{E_i}{E_1} I_i, \quad (10)$$

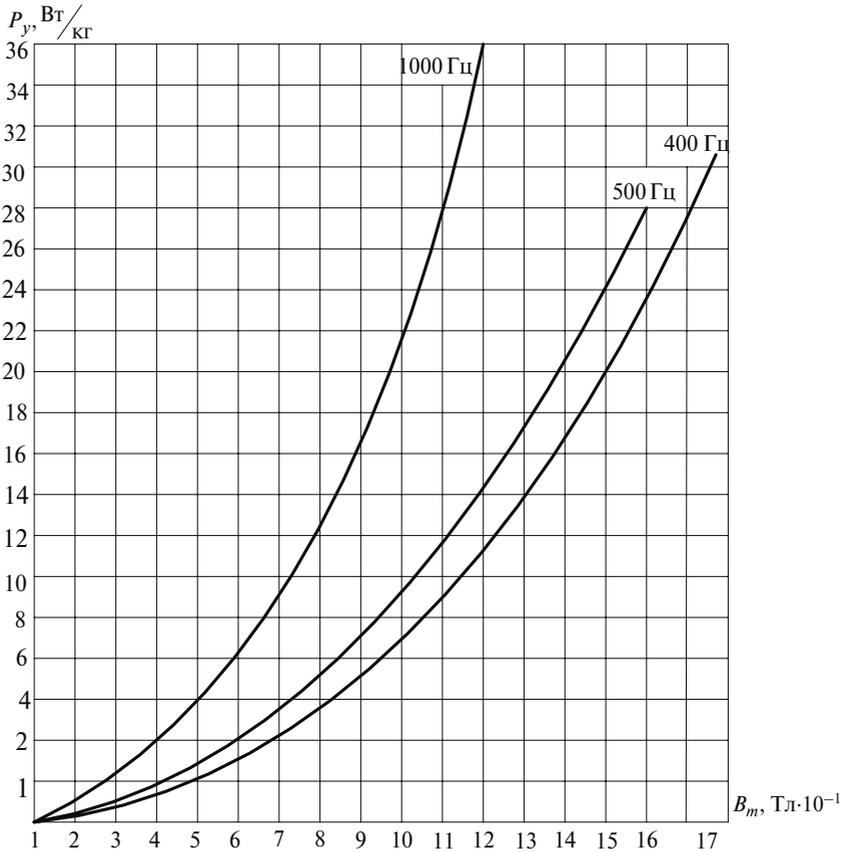


Рис. 15. Кривые удельных потерь тороидальных сердечников из стали 3423 толщиной 0,08 мм

### ВЫБОР ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ

Определяют диаметр обмоточного провода по графику рис.16 либо по формуле

$$d_i = 1,13 \sqrt{\frac{I_i}{j}} \text{ мм}, \quad (11)$$

где допустимую плотность тока  $j$  находят по графику рис. 3 — для броневых трансформаторов и рис. 4 — для тороидальных.

На основании данных, полученных расчетом, выбирают ближайший стандартный диаметр провода, после чего уточняют величину плотности тока в обмотках

$$j_i = \frac{I_i}{S_i} \frac{a}{\text{мм}^2}. \quad (12)$$

#### 1.4. ПРОВЕРКА РАЗМЕЩЕНИЯ ОБМОТОК В ОКНЕ МАГНИТОПРОВОДА

Если приведенные выше расчетные соотношения были справедливы как для броневых, так и для тороидальных трансформаторов, то проверка размещения обмоток в окне магнитопровода для этих разновидностей трансформаторов существенно отлична и излагается ниже отдельно.

##### Броневые трансформаторы

Вычисляют количество слоев каждой обмотки

$$m_i = \frac{\omega_i}{n_i} = \frac{\omega_i \cdot d_{\text{ИЗ}}}{l_{\text{СЛ}} k_y}, \quad (13)$$

где  $n_i$  — число витков в слое (с изоляцией);

$l_{\text{СЛ}}$  — ширина слоя обмотки;

$k_y$  — коэффициент укладки обмотки.

Для «дикой» намотки  $k_y = 0,8-0,9$ , для рядовой  $k_y = 0,9-0,95$ ; при этом меньшие значения  $k_y$  берутся для тонких проводов.

Результаты подсчета по формуле (13) округляют до целого числа в сторону увеличения.

По табл. 4 подбирают материал межслойной и межобмоточной изоляции. Межобмоточная изоляция должна выдерживать двух-трехкратное испытательное напряжение, устанавливаемое согласно табл. 5.

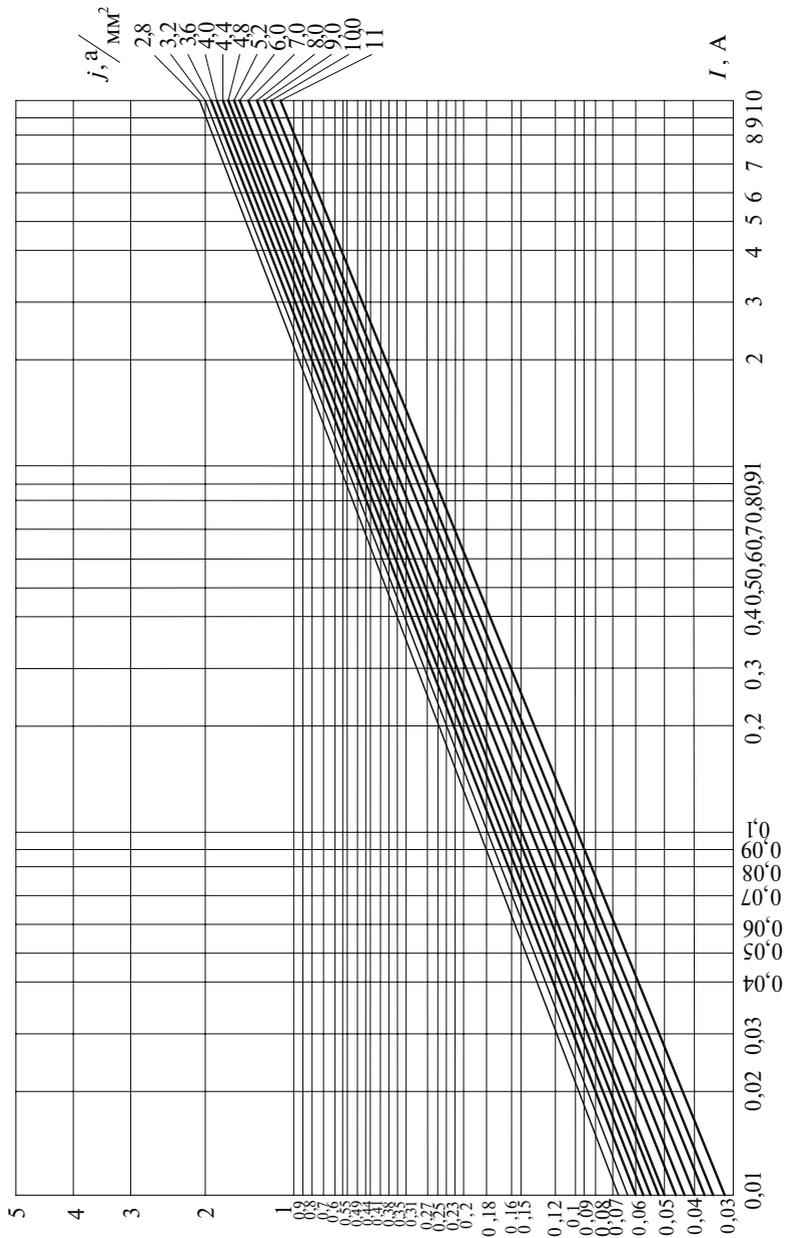


Рис. 16. Зависимость диаметра провода обмотки от величины и плотности тока

Т а б л и ц а 4

**Материал межслойной и межобмоточной изоляции**

| Материал прокладки   | Толщина прокладки, мм | Среднее пробивное напряжение прокладок, В |
|--|-----------------------|---|
| Конденсаторная бумага КОН-1                                  | 0,007                 | 275                                       |
|  | 0,012                 | 300                                       |
|  | 0,022                 | 475                                       |
| Телефонная бумага КТН  | 0,05                  | 500                                       |
| Кабельная бумага К-12  | 0,12                  | 1 000                                     |
| Пропиточная бумага ИП-63                                     | 0,11                  | 500                                       |
| Пленка электроизоляционная из фторопласта 4, ориентированная | 0,04                  | 4 000                                     |
| Стеклолакоткань ЛСК-7  | 0,11                  | 1 800                                     |
| Пленкоэлектрокартон  | 0,16                  | 3 500                                     |
| Лакоткань ЛШС  | 0,12                  | 4 500                                     |

Т а б л и ц а 5

**Испытательные напряжения межобмоточной изоляции**

| Потенциал обмоток (рабочее напряжение) | Испытательное напряжение, В                       |
|--|---|
| До 24                                  | 250   |
| От 24 до 100                           | 500   |
| От 100 до 500                          | 2 000   |
| Свыше 500                              | Двойной наибольший потенциал обмоток плюс 1 000 В |

Вычисляют толщину катушки в мм, с учетом разбухания ее при намотке и пропитке

$$H_k = H'_k \Psi, \quad (14)$$

$$\text{где } H'_k = h_k + \sum_{i=1}^n d_{\text{из}} m_i + \sum_{i=1}^n \delta_{(i-1), i} + \sum_{i=1}^n \delta_{\text{сл}} (m_i - 1),$$

$\psi = 1, 1-1, 2$  в зависимости от размеров катушки;

$H_K$  — толщина каркаса в мм;

$\delta_{(i-1),i}$  — толщина изоляции между обмотками в мм;

$\delta_{сл i}$  — толщина изоляции между слоями обмотки в мм.

Проверяют верхний зазор между катушкой и магнитопроводом

$$\delta_B = \alpha - \delta_H - H_K, \quad (15)$$

где  $\alpha$  — ширина окна магнитопровода в мм;

$\delta_H$  — нижний зазор между каркасом катушки и средним стержнем магнитопровода в мм.

Катушка уложится нормально в окне магнитопровода, если  $\delta_A = (0,5-1)$  мм.

### Тороидальные трансформаторы

Определяют толщину, мм, изоляции с внутренней  $\tau_{BO}$  и наружной стороны ( $\tau_{HO}$ ) магнитопровода перед намоткой по формулам:

$$\tau_{HO} = \Delta_{из} N_\phi, \quad (16)$$

$$\tau_{BO} = \tau_{HO} \frac{D}{d}, \quad (17)$$

где  $\tau_{BO}$  — толщина изоляционного материала;

$N$  — число слоев;

$\phi$  — коэффициент намотки изоляции, равный в среднем 1,5.

По табл. 4 подбирают материал межслойной и межобмоточной изоляции. Последняя должна выдерживать трехкратное испытательное напряжение, устанавливаемое согласно табл. 5.

Определяют наружный  $\Delta H_i$  и внутренний ( $\Delta B_i$ ) диаметры обмотки по формулам:

$$D_{Hi} = \sqrt{\frac{4\omega_i S_{ИЗi}}{\pi k_y} + [D_{H(i-1)} + 2\tau_{H(i-1)}]^2}, \quad (18)$$

$$D_{Bi} = \sqrt{[D_{B(i-1)} - 2\tau_{B(i-1)}]^2 - \frac{4\omega_i S_{ИЗi}}{\pi k_y}}, \quad (19)$$

где  $k_y$  — коэффициент укладки обмоток; его величина зависит от диаметра провода и для диаметров от 0,08 до 0,31 мм составляет от 0,6 до 0,7, для 0,31–0,5 мм он равен 0,7 и для 0,5–2,1 мм падает с 0,7 до 0,45.

Для первичной обмотки  $D_{H(i-1)}$  и  $D_{B(i-1)}$  представляют собой наружный и внутренний диаметры сердечника трансформатора  $D$  и  $d$ ,  $\tau_{H(i-1)}$  и  $\tau_{B(i-1)}$  — соответственно толщины изоляции сердечника.

Определяют наружный и внутренний диаметры трансформатора, мм:

$$D_{H.ТР} = D_{Hi} + 2\tau_{Hi}, \quad (20)$$

$$D_{B.ТР} = D_{Bi} - 2\tau_{Bi}. \quad (21)$$

Определяют высоту трансформатора, мм:

$$H_{ТР} = h + d - D_{B.ТР}. \quad (22)$$

Если при расчете получается, что  $D_{B.ТР} \geq D_{\delta}$ , то обмотка нормально уложится в окне магнитопровода.

Здесь  $D_{\delta}$  — наименьший диаметр окна, остающегося после намотки трансформатора; определяется типом намоточного станка и составляет обычно не менее (8–14) мм.

## 1.5. РАСЧЕТ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ ХОЛОСТОГО ХОДА

Вычисляют индукцию,  $T_l$ , в среднем стержне магнитопровода при холостом ходе трансформатора

$$B_o = B_m \left(1 + \frac{\Delta U}{100}\right). \quad (23)$$

Определяют ток холостого хода

$$I'_o = \frac{H' l_{CP}}{\omega_1}, \quad (24)$$

где  $H'$  — определяют по кривой намагничивания для индукции  $B_m$  по графикам для броневых и для тороидальных трансформаторов.

Вычисляют напряжение холостого хода вторичных обмоток

$$U_{oi} = E_i \left(1 + \frac{\Delta U}{100}\right). \quad (25)$$

## 1.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНЫХ ПОТЕРЬ В МЕДИ

Суммарные потери в меди катушки вычисляют по формуле

$$P_M = \sum_{i=1}^n P_{Mi} = \sum_{i=1}^n I_i^2 r_i B_m, \quad (26)$$

где  $r_1$  — омическое сопротивление обмоток, равное

$$r_i = \rho \frac{L_i}{S_i} [1 + \alpha (t_1 - 20)], \quad (27)$$

$\rho$  — удельное сопротивление обмоточного провода, равное для меди  $0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ .

Здесь  $L_i$  — длина проводов обмоток, определяемая как

$$L_i = \omega_i l_{Mi} 10^{-3} \text{ м}, \quad (28)$$

где  $l_{Mi}$  — средняя длина витка обмотки в мм.

Для броневых трансформаторов

$$l_{Mi} = 2(\alpha'_0 + b') + 2\pi\psi R_{CPi}, \quad (29)$$

где

$$\left. \begin{aligned} R_{CP1} &= \frac{h_1}{2}, & R_{CP2} &= h_1 + \delta_{1,2} + \frac{h_2}{2}, \\ R_{CP3} &= h_1 + \delta_{1,2} + h_2 + \delta_{2,3} + \frac{h_3}{2}, & \text{мм} \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

и т. д.,

$h_1, h_2, h_3$  – высота соответствующих обмоток с учетом межслоевой изоляции в мм,

$b'$  – толщина магнитопровода с учетом толщины каркаса и изоляции на каркасе в мм,

$\alpha'_0$  – ширина среднего стержня пластины с учетом толщины каркаса и изоляции на каркасе в мм.

Для тороидальных трансформаторов

$$l_{Mi} = 2(\alpha + h) + 8 \left( \tau_0 + \sum_{i=1}^n \tau_{oi} \right) + \frac{8 \sum_{i=1}^n \omega_i S_{ИЗi}}{\pi k_{yi} (D + d)}, \quad (31)$$

где  $\alpha = \frac{D-d}{2}; \quad \tau_0 = \frac{\tau_{HO} + \tau_{BO}}{2}; \quad \tau_{oi} = \frac{\tau_{Hi} + \tau_{Bi}}{2}. \quad (32)$

## 1.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНЫХ ПОТЕРЬ В СТАЛИ

Суммарные потери в стали магнитопровода вычисляются в Вт по формуле

$$P_{CT} = G_{CT} P_y \quad (33)$$

где  $G_{CT}$  – берут из табл. 1–3.

## 1.8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕВА И КПД ТРАНСФОРМАТОРА

Вычисляют суммарную массу меди провода

$$G_M = \sum_{i=1}^n G_{Mi} = \gamma_M \sum_{i=1}^n L_i S_i. \quad (34)$$

Подсчитывают массу изоляции

$$G_{ИЗ} = \frac{G_M}{8,9k_M} (1 - k_M) k_{ИЗ}, \quad (35)^*$$

где  $k_{ИЗ}$  – коэффициент изоляции, равный 0,7 – для тороидальных и 1 – для броневых трансформаторов,

$$k_M = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \omega_i}{Q_0} 10^{-2}. \quad (36)$$

Определяют общий вес трансформатора в кг:

$$G_{ТР} = G_M + G_{СТ} + G_{ИЗ}. \quad (37)$$

Вычисляют теплоемкость трансформатора в Вт·с/°С:

$$c G_{ТР} = 0,48 G_{СТ} + 0,39 G_M + c_{ИЗ} G_{ИЗ}, \quad (38)$$

где  $c_{ИЗ}$  – удельная теплоемкость изоляционных материалов трансформатора; для пропитанных катушек  $c_{ИЗ} = 2$  Вт·с/г·°С и для непропитанных –  $c_{ИЗ} = 2,6$  Вт·с/г·°С.

Определяют тепловую постоянную времени, мин, трансформатора

---

\* Для броневых трансформаторов можно пользоваться формулой  $G_{ИЗ} = \sigma(1 - k_M)$ ,  $\sigma$  где находят по табл. 1 и 2.

$$T = 10 \frac{G_{\text{ТР}}}{S_{\text{ОХЛ}}}, \quad (39)$$

где  $S_{\text{ОХЛ}}$  – поверхность охлаждения трансформатора.

Для броневых трансформаторов  $S_{\text{ОХЛ}}$ , см<sup>2</sup>, находят по табл. 1 или 2, а для тороидальных трансформаторов рассчитывают по формуле

$$S_{\text{ОХЛ}} = \pi D_{\text{ТР}} \left( H_{\text{ТР}} + \frac{D_{\text{ТР}}}{2} \right). \quad (40)$$

Находят температуру перегрева трансформатора

$$\tau = \frac{(P_{\text{М}} + P_{\text{СТ}}) T \cdot 60}{c G_{\text{ТР}}} \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (41)$$

Если расчетная температура  $\tau$  больше  $\tau_{\text{доп}}$  или меньше ее на 25–30 %, то трансформатор следует пересчитать.

КПД трансформатора

$$\eta = \frac{P}{P + P_{\text{М}} + P_{\text{СТ}}} 100\% . \quad (42)$$

## 2. ПРИМЕР РАСЧЕТА ТОРОИДАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Задано:

$$\begin{aligned} U_{\text{С}} &= 220 \text{ В}; & f &= 400 \text{ Гц}; \\ U_2 &= 500 \text{ В}; & I_2 &= 0,0335 \text{ А}; \\ U_3 &= 400 \text{ В}; & I_3 &= 0,075 \text{ А}; \\ U_4 &= 250 \text{ В}; & I_4 &= 0,085 \text{ А}; \\ U_5 &= 52,5 \text{ В}; & I_5 &= 0,21 \text{ А}; \\ t_0 &= +70 \text{ } ^\circ\text{C}; & t_1 &= +120 \text{ } ^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Мощность, отдаваемая трансформатором,

$$P = 500 \cdot 0,0335 + 400 \cdot 0,075 + \\ + 250 \cdot 0,085 + 52,5 \cdot 0,21 = 79 \text{ В}\cdot\text{А}.$$

По формуле (2)

$$Q_0 Q_{\text{ст}} = \frac{79(1+0,946) \cdot 10^6}{4,44 \cdot 400 \cdot 12100 \cdot 4,25 \cdot 0,946 \cdot 0,85 \cdot 0,25} = 8,5 \text{ см}^4.$$

По табл. 3 выбирают магнитопровод из стали 3423 (электротехническая лента толщиной 0,08 мм размером 35/53–15 мм).

ЭДС одного витка

$$e_B = 4,44 \cdot 400 \cdot 1,35 \cdot 0,85 \cdot 12100 \cdot 10^{-8} = 0,247 \text{ В}.$$

$$\omega_1 = \frac{220(1-0,0265)}{0,247} = \frac{214}{0,247} = 866.$$

$$e_{\text{в.в}} = \frac{214}{866} = 0,247.$$

Числа витков вторичных обмоток

$$\omega_2 = \frac{500 \cdot (1+0,265)}{0,247} = 2080.$$

$$\omega_3 = \frac{400 \cdot (1+0,265)}{0,247} = 1665 ;$$

$$\omega_4 = \frac{250(1+0,0265)}{0,247} = 1040 ;$$

$$\omega_5 = \frac{52,5(1+0,0265)}{0,247} = 218 .$$

$$I_0 = \frac{0,46 \cdot 13,8}{866} = 0,0073 \text{ A.}$$

$$I_\mu = \sqrt{0,0073^2 - \left(\frac{0,1215 \cdot 10,65}{214}\right)^2} = \sqrt{0,0073^2 - 0,00605^2} = 0,0042 \text{ A.}$$

$$\begin{aligned} I'_1 &= \frac{500(1+0,0265)}{214} 0,0335 + \\ &+ \frac{400(1+0,0265)}{214} 0,075 + \frac{250(1+0,0265)}{214} 0,085 + \\ &+ \frac{52,5(1+0,0265)}{214} 0,21 = 0,379 \text{ A.} \end{aligned}$$

$$I_1 = \sqrt{(0,379 + 0,00605)^2 + 0,0042^2} = 0,385 \text{ A.}$$

По формуле (11)

$$d_1 = 1,13 \sqrt{\frac{0,385}{4,25}} = 0,339 \text{ мм.}$$

Выбирают привод ПЭЛШО диаметром 0,35 мм.

$$d_2 = 1,13 \sqrt{\frac{0,335}{4,25}} = 0,102 \text{ мм.}$$

Выбирают привод ПЭЛШО диаметром 0,1 мм

$$d_3 = 1,13 \sqrt{\frac{0,075}{4,25}} = 0,147 \text{ мм.}$$

Выбирают привод ПЭЛШО диаметром 0,15 мм

$$d_4 = 1,13 \sqrt{\frac{0,085}{4,25}} = 0,158 \text{ мм.}$$

Выбирают привод ПЭЛШО диаметром 0,16 мм

$$d_5 = 1,13 \sqrt{\frac{0,21}{4,25}} = 0,248 \text{ мм.}$$

Выбирают привод ПЭЛШО диаметром 0,25 мм

Основные данные выбранных проводов, необходимые для дальнейшего расчета, приведены в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

| Обмотки    | Диаметр по меди, мм | Диаметр с изоляцией, мм | $S_{ИЗ}$ , мм <sup>2</sup> | $k_y$ |
|------------|---------------------|-------------------------|----------------------------|-------|
| $\omega_1$ | 0,35                | 0,455                   | 0,1630                     | 0,70  |
| $\omega_2$ | 0,10                | 0,175                   | 0,0241                     | 0,63  |
| $\omega_3$ | 0,15                | 0,225                   | 0,0398                     | 0,65  |
| $\omega_4$ | 0,16                | 0,235                   | 0,0434                     | 0,66  |
| $\omega_5$ | 0,25                | 0,340                   | 0,0909                     | 0,68  |

С учетом двух слоев изоляции из латоткани ЛШС толщиной 0,12 мм:

$$\tau_{HO} = 1,5 \cdot 2 \cdot 0,12 = 0,36 \text{ мм}$$

$$\tau_{BO} = 0,36 \frac{53}{35} = 0,545 \text{ мм}.$$

$$\begin{aligned} D_{H1} &= \sqrt{\frac{4 \cdot 866 \cdot 0,163}{3,14 \cdot 0,7} + (53 + 2 \cdot 0,36)^2} = \sqrt{257 + 2880} = \\ &= \sqrt{3137} = 56 \text{ мм} \end{aligned}$$

$$D_{B1} = \sqrt{(35 - 2 \cdot 0,545)^2 - 257} = \sqrt{1150 - 257} = \sqrt{893} = 29,9 \text{ мм}$$

Поскольку  $\omega_1$  изолируется двумя слоями латоткани ЛШС толщиной 0,12 мм, то

$$\tau_{H1} = 1,5 \cdot 2 \cdot 0,12 = 0,36 \text{ мм}$$

$$\tau_{B1} = 0,36 \frac{56}{29,9} = 0,675 \text{ мм}$$

$$\begin{aligned} D_{H2} &= \sqrt{\frac{4 \cdot 2080 \cdot 0,0241}{3,14 \cdot 0,63} + (56 + 2 \cdot 0,36)^2} = \\ &= \sqrt{101,5 + 3210} = 57,6 \text{ мм}; \end{aligned}$$

$$D_{B2} = \sqrt{(29,9 - 2 \cdot 0,675)^2 - 101,5} = \sqrt{815 - 101,5} = 26,7 \text{ мм}$$

Обмотку  $\omega_2$  изолируют сверху двумя слоями лакоткани ЛШС–0,12 мм.

$$\tau_{H2} = 0,36 \text{ мм};$$

$$\tau_{B2} = 0,36 \frac{57,6}{26,7} = 0,777 \text{ мм};$$

$$D_{H3} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1665 \cdot 0,398}{3,14 \cdot 0,65} + (57,6 + 2 \cdot 0,36)^2} = \\ \sqrt{130 + (58,32)^2} = \sqrt{130 + 3400} = 59,4 \text{ мм};$$

$$D_{B3} = \sqrt{(26,7 - 2 \cdot 0,777)^2 - 130} = \sqrt{630 - 130} = 22,4 \text{ мм}.$$

Обмотку  $\omega_3$  изолируют также двумя слоями лакоткани ЛШС–0,12 мм.

$$\tau_{H3} = 0,36 \text{ мм};$$

$$\tau_{B3} = 0,36 \frac{59,4}{22,4} = 0,955 \text{ мм};$$

$$D_{H4} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1040 \cdot 0,0434}{3,14 \cdot 0,66} + (59,4 + 2 \cdot 0,36)^2} = \sqrt{87 + 3620} = 61 \text{ мм};$$

$$D_{B4} = \sqrt{(22,4 - 2 \cdot 0,955)^2 - 87} = \sqrt{420 - 87} = 18,25 \text{ мм}.$$

Обмотку  $\omega_4$  изолируют двумя слоями лакоткани ЛШС–0,12 мм.

$$\tau_{H4} = 0,36 \text{ мм};$$

$$\tau_{B4} = 0,36 \frac{61}{18,25} = 1,205 \text{ мм};$$

$$D_{H5} = \sqrt{\frac{4 \cdot 218 \cdot 0,0909}{3,14 \cdot 0,68} + (61 + 2 \cdot 0,36)^2} =$$

$$= \sqrt{37,1 + 3800} = 61,9 \text{ мм};$$

$$D_{B5} = \sqrt{(18,25 - 2 \cdot 1,205)^2 - 37,1} = \sqrt{250 - 37,1} = 14,58 \text{ мм}.$$

Снаружи трансформатор изолируют также двумя слоями лакокоткани ЛШС-0,12 мм.

$$\tau_{H.TP} = 0,36 \text{ мм};$$

$$\tau_{B.TP} = 0,36 \frac{61,9}{14,58} = 1,525 \text{ мм};$$

$$D_{H.TP} = 61,9 + 2 \cdot 0,36 = 61,9 + 0,72 = 62,62 \text{ мм};$$

$$D_{B.TP} = 14,58 - 2 \cdot 1,525 = 11,53 \text{ мм}.$$

$$H_{TP} = 15 + 35 - 11,53 = 38,47 \text{ мм}.$$

$$B_0 = 12100 (1 + 0,0265) = 1342 \text{ Тл} .$$

$$I_0 = \frac{0,55 \cdot 13,8}{866} = 0,00865 \text{ А} .$$

$$U_{02} = 514 (1 + 0,0265) = 528 \text{ В};$$

$$U_{03} = 411(1 + 0,0265) = 423,5 \text{ В};$$

$$U_{04} = 257(1 + 0,0265) = 265 \text{ В};$$

$$U_{05} = 54(1 + 0,0265) = 55,5 \text{ В}.$$

По формуле (31)

$$\begin{aligned} l_{M1} &= 2(9+15) + 8 \frac{0,36+5,45}{2} + 8 \frac{866 \cdot 0,163}{3,14 \cdot 0,7(35+53)} = \\ &= 48 + 8 \frac{0,905}{2} + 5,85 = 57,47 \text{ мм}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_{M2} &= 48 + 8 \frac{0,905+0,36+0,675}{2} + 8 \frac{2080 \cdot 0,0241}{3,14 \cdot 0,63 \cdot 88} + \\ &+ 5,85 \cdot 2 = 48 + 7,77 + 2,31 + 11,7 = 69,78 \text{ мм}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_{M3} &= 48 + 8 \frac{1,94+0,36+0,777}{2} + 11,7 + 2 \cdot 2,31 + \\ &+ 8 \frac{1665 \cdot 0,0398}{3,14 \cdot 0,65 \cdot 88} = 48 + 12,3 + 11,7 + 4,62 + \\ &+ 2,95 = 79,57 \text{ мм}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_{M4} &= 48 + 8 \frac{3,027+0,36+0,955}{2} + 11,7 + 4,62 + 2 \cdot 2,95 + \\ &+ 8 \frac{1040 \cdot 0,0434}{3,14 \cdot 0,66 \cdot 88} = 48 + 17,55 + 11,7 + 4,62 + 5,9 + 1,98 = 89,75 \text{ мм}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_{M5} &= 48 + 8 \frac{4,392+0,36+1,205}{2} + 11,7 + 4,62 + 5,9 + \\ &+ 2 \cdot 1,98 + 8 \frac{218 \cdot 0,0909}{3,14 \cdot 0,68 \cdot 88} = 48 + 23,9 + 11,7 + \\ &+ 4,62 + 5,9 + 3,96 + 0,847 = 98,93 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Длина провода обмоток:

$$L_1 = 866 \cdot 57,47 \cdot 10^{-3} = 49,7 \text{ м};$$

$$L_2 = 2080 \cdot 69,78 \cdot 10^{-3} = 145 \text{ м};$$

$$L_3 = 1665 \cdot 79,57 \cdot 10^{-3} = 132,5 \text{ м};$$

$$L_4 = 1040 \cdot 89,75 \cdot 10^{-3} = 93,4 \text{ м};$$

$$L_5 = 218 \cdot 98,93 \cdot 10^{-3} = 21,58 \text{ м}.$$

Омическое сопротивление обмоток:

$$r_1 = 0,0175 \frac{49,7}{0,09621} 1,4 = 12,65 \text{ Ом};$$

$$r_2 = 0,0175 \frac{145}{0,00785} 1,4 = 453 \text{ Ом};$$

$$r_3 = 0,0175 \frac{132}{0,01767} 1,4 = 184 \text{ Ом};$$

$$r_4 = 0,0175 \frac{93,4}{0,02011} 1,4 = 114 \text{ Ом};$$

$$r_5 = 0,0175 \frac{21,58}{0,049} 1,4 = 10,78 \text{ Ом}.$$

Потери в меди обмоток согласно:

$$P_{M1} = 0,385^2 \cdot 12,65 = 1,92 \text{ Вт};$$

$$P_{M2} = 0,335^2 \cdot 453 = 0,508 \text{ Вт};$$

$$P_{M3} = 0,075^2 \cdot 184 = 1,03 \text{ Вт};$$

$$P_{M4} = 0,085^2 \cdot 114 = 0,82 \text{ Вт};$$

$$P_{M5} = 0,21^2 \cdot 10,78 = 0,475 \text{ Вт}.$$

Суммарные потери в меди катушек

$$P_M = 1,92 + 0,508 + 1,03 + 0,82 + 0,475 = 4,753 \text{ Вт}.$$

Суммарные потери в стали

$$P_{CT} = 0,1215 \cdot 11,8 = 1,44 \text{ Вт}.$$

Масса меди провода обмоток

$$\begin{aligned} G_M &= 8,9(49,7 \cdot 0,09621 + 145 \cdot 0,00785 + 132,5 \cdot 0,011767 + \\ &+ 93,4 \cdot 0,02011 + 21,58 \cdot 0,04909) \cdot 10^{-3} = \\ &= 0,0426 + 0,01012 + 0,0209 + 0,01675 + 0,0943 = 0,1 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Масса изоляции

$$G_{ИЗ} = 0,028 \text{ кг}.$$

Общая масса трансформатора

$$G_{TP} = 0,1215 + 0,1 + 0,028 = 0,25 \text{ кг}.$$

Теплоемкость трансформатора

$$c G_{TP} = 0,48 \cdot 0,1215 + 0,39 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,028 = 0,153 \text{ Вт} \cdot \text{с} / ^\circ\text{C}.$$

Поверхность охлаждения трансформатора по формуле (40) составляет

$$S_{\text{охл}} = 3,14 \cdot 6,262 \left( 3,847 + \frac{6,262}{2} \right) = 130,8 \text{ см}^2,$$

т. е. постоянная времени трансформатора по формуле (39) будет равна

$$T = 10 \frac{0,25}{130,8} 0,0192 \text{ мин.}$$

Температура перегрева трансформатора

$$\tau = \frac{(4,753 + 1,44) 0,0192 \cdot 60}{0,153} 46^{\circ},7 \text{ С.}$$

Поскольку расчетная температура  $\tau$  отличается от предельно допустимой ( $50^{\circ}\text{С}$ ) не более чем на 15%, трансформатор рассчитан правильно.

$$\eta = \frac{79}{79 + 4,75 + 1,44} 100 = 92,7\%.$$

### 3. ПРИМЕР РАСЧЕТА БРОНЕВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Задано:

$$U_C = 40 \text{ В}; \quad f = 500 \text{ Гц};$$

$$U_2 = 3\,000 \text{ В}; \quad I_2 = 0,027 \text{ А};$$

$$U_3 = 150 \text{ В}; \quad I_3 = 0,26 \text{ А};$$

$$t_0 = +70^{\circ}\text{С}; \quad t_1 = +120^{\circ}\text{С}.$$

Мощность, отдаваемая трансформатором,

$$P = 3000 \cdot 0,027 + 150 \cdot 0,26 = 120 \text{ ВА.}$$

Выбирая ленточный магнитопровод из стали 3423 толщиной 0,08 мм, определяют величину произведения

$$Q_0 Q_{CT} = \frac{120(1 + 0,953)10^6}{4,44 \cdot 500 \cdot 11800 \cdot 3,4 \cdot 0,23 \cdot 0,85 \cdot 0,953} = 14,2 \text{ см}^4.$$

Следует отметить, что примерно то же значение  $Q_0 Q_{CT}$  можно получить без расчета, непосредственно по графику, приведенному на рис. 9.

По табл. 2 определяют, что  $Q_0 Q_{CT} = 14,2 \text{ см}^4$  соответствует ленточный магнитопровод типа ШЛ-16–15.

ЭДС одного витка

$$e_B = 4,44 \cdot 500 \cdot 2,4 \cdot 0,85 \cdot 11800 \cdot 10^{-8} = 0,535 \text{ В}$$

$$\omega_1 = \frac{40 \left( 1 - \frac{14}{100} \right)}{0,535} = \frac{40 \cdot 0,986}{0,535} = \frac{39,4}{0,535} = 73,8;$$

округляют  $\omega_1$  до 74 витков.

$$e_{By} = \frac{39,4}{74} = 0,533 \text{ В.}$$

$$\omega_2 = \frac{3000(1 + 0,14)}{0,533} = \frac{3042}{0,533} = 5707 ;$$

$$\omega_3 = \frac{150(1 + 0,014)}{0,533} = \frac{152,1}{0,533} = 285,5 ;$$

округляют  $\omega_3$  до 286 витков.

$$I_0 = \frac{1,8 \cdot 13,87}{74} = 0,338 \approx 0,34 \text{ A.}$$

$$I_\mu = \sqrt{0,34^2 - \frac{(0,232 \cdot 15,2)^2}{39,4}} = \sqrt{0,1156 - 0,0895^2} =$$

$$= \sqrt{0,1156 - 0,0080} = \sqrt{0,1076} = 0,328 \approx 0,33 \text{ A.}$$

$$I'_1 = \frac{3042}{39,4} 0,027 + \frac{152}{39,4} 0,26 = 2,08 + 1,05 = 3,13 \text{ A;}$$

$$I_1 = \sqrt{\left(3,13 + \frac{0,232 \cdot 15,2}{39,4}\right)^2 + 0,33^2} =$$

$$= \sqrt{3,22^2 + 0,33^2} = \sqrt{10,4 + 0,11} = \sqrt{10,51} = 3,24 \text{ A.}$$

$$d_1 = 1,13 \sqrt{\frac{3,24}{3,4}} = 1,13 \sqrt{0,95} = 1,1 \text{ мм.}$$

Выбирают провод марки ПЭВ-2 (ГОСТ 7262-54) диаметром 1,12 мм. Диаметр этого провода с изоляцией  $d_{1\text{ИЗ}} = 1,23$  мм, сечение по меди  $S_1 = 0,985 \text{ мм}^2$ ;

$$d_2 = 1,13 \sqrt{\frac{0,027}{3,4}} = 1,13 \sqrt{0,00795} = 1,13 \cdot 0,089 = 0,10 \text{ мм.}$$

Выбирают провод марки ПЭВ-2 диаметром  $d_2 = 0,1$  мм, имеющий  $d_{2\text{ИЗ}} = 0,13$  мм,  $S_2 = 0,00785 \text{ мм}^2$ ;

$$d_3 = 1,13 \sqrt{\frac{0,26}{3,4}} = 1,13 \sqrt{0,0765} = 1,13 \cdot 0,276 = 0,31 \text{ мм.}$$

Выбирают провод марки ПЭВ-2 диаметром  $d_3 = 0,31$  мм, имеющий  $d_{3\text{ИЗ}} = 0,36$  мм,  $S_3 = 0,0754$  мм<sup>2</sup>.

Уточняют плотности тока в обмотках:

$$j_1 = \frac{3,24}{0,985} = 3,29 \text{ А/мм}^2,$$

$$j_2 = \frac{0,027}{0,00785} = 3,44 \text{ А/мм}^2,$$

$$j_3 = \frac{0,26}{0,0754} = 3,45 \text{ А/мм}^2.$$

Число слоев каждой обмотки:

$$m_1 = \frac{74 \cdot 1,23}{36 \cdot 0,95} = 2,66 \approx 3 \text{ слоя,}$$

$$m_2 = \frac{5707 \cdot 0,13}{36 \cdot 0,8} = 25,8 \approx 26 \text{ слоев,}$$

$$m_3 = \frac{286 \cdot 0,36}{36 \cdot 0,9} = 3,18 \approx 4 \text{ слоя.}$$

В качестве изоляции между  $\omega_1$  и  $\omega_2$  выбирают пять слоев фторопластовой пленки толщиной 0,04 мм и сверху — один слой лакоткани ЛШС толщиной 0,12 мм, выдерживающие напряжение  $5 \cdot 4\,000 + 4\,500 = 24\,500$  В.

Действительно, как указывалось выше, межобмоточная изоляция должна обеспечить двух-трехкратное испытательное напряжение, устанавливаемое согласно табл. 5.

В нашем случае рабочее напряжение 3 000 В, следовательно, испытательное напряжение составляет согласно табл. 5.

$$2 \cdot 3\,000 + 1\,000 = 7\,000 \text{ В,}$$

т. е. утроенное испытательное напряжение равно 21 000 В.

Обмотку  $\omega_2$  укладываемой первой, при этом каркас обматывают предварительно двумя слоями фторопластовой пленки толщиной 0,04 мм.

Исходя из изложенных выше соображений, изоляция между  $\omega_1$  и  $\omega_3$  — один слой лакоткани ЛШС.

Между слоями обмотки  $\omega_2$  прокладывают конденсаторную бумагу

КОН-1 толщиной 0,022 мм в один слой. Сверху обмотки изолируют одним слоем ЛШС.

Полагая толщину каркаса  $h_K = 2,5$  мм, определяют  $H_K$  :

$$\begin{aligned} H_K &= 2,5 + 3 \cdot 1,23 + 26 \cdot 0,13 + 4 \cdot 0,36 + 25 \cdot 0,022 + 5 \cdot 0,04 + 0,12 + \\ &+ 2 \cdot 0,12 + 2 \cdot 0,04 = 2,5 + 3,69 + 3,38 = 1,44 + 0,55 + 0,2 + \\ &+ 0,12 = 0,24 = 0,08 = 12,2 \text{ мм;} \end{aligned}$$

$$H_K = 1,15 \cdot 12,2 = 14,02 \text{ мм.}$$

$$\delta_B = 16 - 1 - 14,02 = 0,98 \text{ мм.}$$

Следовательно, обмотка уложится нормально.

$$B_0 = 11800 \left( 1 + \frac{1,4}{100} \right) = 1,1965 \text{ Тл}$$

$$I'_0 = \frac{1,8 \cdot 13,87}{74} = 0,34 \text{ А}$$

$$U_{02} = 3042 \left( 1 + \frac{1,4}{100} \right) = 3090 \text{ В;}$$

$$U_{03} = 152,1 \left( 1 + \frac{1,4}{100} \right) = 154,5 \text{ В.}$$

По формулам (30)\*

$$R_{CP2} = \frac{26 \cdot 0,13 + 25 \cdot 0,022}{2} = \frac{3,38 + 0,55}{2} = 1,965 \text{ мм};$$

$$\begin{aligned} R_{CP1} &= 3,93 + 5 \cdot 0,04 + 0,12 + \frac{3 \cdot 1,23}{2} = \\ &= 3,93 + 0,2 + 0,12 + 1,84 = 6,09 \text{ мм}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{CP3} &= 3,93 + 5 \cdot 0,04 + 0,12 + 3 \cdot 1,23 + 0,12 + \frac{4 \cdot 0,36}{2} = \\ &= 3,93 + 0,2 + 0,12 + 3,69 + 0,12 + 0,72 = 8,78 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Откуда согласно формуле (29)

$$\begin{aligned} l_{M2} &= 2(19,58 + 18,58) + 2 \cdot 3,14 \cdot 1,15 \cdot 1,965 = \\ &= 76,32 + 7,225 \cdot 1,965 = 76,32 + 14,2 = 90,52 \text{ мм}; \end{aligned}$$

$$l_{M1} = 76,32 + 7,225 \cdot 6,09 = 76,32 + 44 = 120,32 \text{ мм};$$

$$l_{M3} = 76,32 + 7,225 \cdot 8,78 = 76,32 + 63,4 = 139,7 \text{ мм.}$$

Используя соотношение (28), получают:

$$L_1 = 74 \cdot 120,32 \cdot 10^{-3} = 8,9 \text{ м,}$$

$$L_2 = 5707 \cdot 90,52 \cdot 10^{-3} = 517 \text{ м,}$$

---

\* Сначала подсчитывают  $R_{CP2}$ , поскольку обмотка  $\omega_2$  наматывается первой на каркас.

$$L_3 = 286 \cdot 139,7 \cdot 10^{-3} = 40 \text{ м.}$$

Тогда согласно уравнению (27) омическое сопротивление обмоток определяют по формулам:

$$r_1 = 0,0175 \frac{8,9}{0,985} [1 + 0,004(120 - 20)] = 0,0175 \frac{8,9}{0,985} 1,4 = 0,22 \text{ Ом;}$$

$$r_2 = 0,0175 \frac{517}{0,00785} 1,4 = 1614 \text{ Ом;}$$

$$r_3 = 0,0175 \frac{40}{0,0754} 1,4 = 13 \text{ Ом.}$$

Суммарные потери в меди катушек согласно уравнению (26)

$$\begin{aligned} P_M &= 3,24^2 \cdot 0,22 + 0,027^2 \cdot 1614 + 0,26^2 \cdot 13 = \\ &= 2,31 + 1,177 + 0,879 = 4,37 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Суммарные потери в стали

$$P_{CT} = 0,232 \cdot 15,2 = 3,52 \text{ Вт.}$$

Масса меди провода обмоток

$$\begin{aligned} G_M &= 8,9(8,9 \cdot 0,985 + 517 \cdot 0,00785 + 40 \cdot 0,0754) = \\ &= 8,9(8,77 + 4,06 + 3,06) = 8,9 \cdot 15,89 = 141,6 \text{ г.} \end{aligned}$$

По формуле (36) находят

$$\begin{aligned} k_M &= \frac{0,985 \cdot 74 + 0,00785 \cdot 5707 + 0,0754 \cdot 286}{6,56} 10^{-2} = \\ &= \frac{72,8 + 44,8 + 21,58}{6,56} 10^{-2} = \frac{1,39}{6,56} = 0,212. \end{aligned}$$

Используя соотношение (35), найдем массу изоляции

$$G_{\text{из}} = \frac{141,6}{8,9 \cdot 0,212} (1 - 0,212) = 58,9 \text{ г} = 0,0589 \text{ кг.}$$

Общий вес трансформатора

$$G_{\text{ТР}} = 141,6 + 232 + 58,9 = 432,5 \text{ г} = 0,4325 \text{ кг.}$$

Теплоемкость

$$cG_{\text{ТР}} = 0,48 \cdot 232 + 0,39 \cdot 0,142 + 2 \cdot 0,059 = 0,285 \text{ Вт} \cdot \text{с} / ^\circ \text{С.}$$

Постоянная времени трансформатора

$$T = 10 \frac{0,433}{151} = 0,0285 \text{ мин.}$$

Температура перегрева трансформатора

$$\tau = \frac{(4,37 + 3,52) \cdot 0,0285 \cdot 60}{0,285} = \frac{7,89 \cdot 0,0285 \cdot 60}{0,285} = 47,8^\circ \text{С.}$$

$$\eta = \frac{120}{120 + 4,37 + 3,52} \cdot 100 = \frac{120}{127,89} \cdot 100 = 94\%.$$

## **ВАРИАНТЫ**

### **ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРА В КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ**

1. Если группа на курсе одна, то, в соответствии с порядковыми номерами студентов, по журналу, исходные данные на стр. 34 имеют вид (для первого):

$$\begin{array}{ll}
 U_C = 200 \text{ В}; & I_2 = 1 \text{ А}; \\
 U_2 = 5 \text{ В}; & I_3 = 2 \text{ А}; \\
 U_3 = 4 \text{ В}; & I_4 = 3 \text{ А}; \\
 U_4 = 10 \text{ В}; & I_5 = 4 \text{ А}; \\
 U_5 = 4 \text{ В}; & t_0 = 70 \text{ }^\circ\text{С}; \\
 t_1 = 120 \text{ }^\circ\text{С}; & f = 400 \text{ Гц}.
 \end{array}$$

При этом для каждого последующего студента токи  $I_2 \dots I_5$  увеличиваются на 1 А. Так второй по списку выполняет расчеты с токами:

$$I_2 = 2 \text{ А}; \quad I_3 = 3 \text{ А}; \quad I_4 = 4 \text{ А}; \quad I_5 = 5 \text{ А}.$$

2. Если групп на курсе 2 или 3, то дополнительно вводится изменение частоты : для первого по журналу студента второй группы частота равна 50 Гц, а каждый последующий увеличивает частоту на 50 Гц.

Для первого по журналу студента третьей группы вводится изменение мощности ; он начинает с мощности  $S = 100 \text{ ВА}$ , а каждый последующий увеличивает мощность на 20 ВА.

ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ ТЯГОВОГО  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Рабочая программа и задание на контрольную работу  
с методическими указаниями

Редактор *В.И. Чучева*  
Компьютерная верстка *Г.Д. Волкова*

---

|  |   |
|--|---|
| Тип.зак.                                     | Тираж 200 экз.                              |
| Подписано в печать 09.06.11 Гарнитура Newton | Формат 60 × 90 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> |
| Усл.печ.л. 3,25                              |   |

---

Редакционный отдел  
Информационно-методического управления РОАТ,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Участок оперативной печати  
Информационно-методического управления РОАТ,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2