Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиотехники

РАЗРАБОТКА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

для выполнения практических и лабораторных работ по дисциплинам «Схемотехника аналоговых и электропреобразовательных устройств» и «Компьютерное моделирование радиоэлектронных устройств» для студентов направления подготовки 11.03.01 «Радиотехника» (профиль «Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов») дневной и заочной формы обучения и по дисциплине «Электропреобразовательные устройства радиоэлектронных средств»[1] для студентов направления подготовки 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» (профиль «Радиоэлектронные системы передачи информации») дневной формы обучения[1]

Воронеж 2021

УДК 64.38
ББК 32.844

Составитель

канд. ф.-м. наук В.В. Горбатенко

Разработка силового трансформатора:
методические указания для выполнения практических и лабораторных работ по дисциплинам «Схемотехника аналоговых и электропреобразовательных устройств» и «Компьютерное моделирование радиоэлектронных устройств» для студентов направления подготовки 11.03.01 «Радиотехника» (профиль «Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов») дневной и заочной формы обучения и по дисциплине «Электропреобразовательные устройства радиоэлектронных средств»[1] для студентов направления подготовки 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» (профиль «Радиоэлектронные системы передачи информации») дневной формы обучения[1]/ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: В.В. Горбатенко. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. 38 с.

Методические указания содержат краткие теоретические сведения для выполнения практических и лабораторных работ дисциплинам «Схемотехника аналоговых и электропреобразовательных устройств», «Компьютерное моделирование радиоэлектронных устройств» и «Электропреобразовательные устройства радиоэлектронных средств»[1], содержат справочную информацию по выбору конструкции и используемых материалов для маломощного силового трансформатора, а также описание методики расчета конструкции.

Методические указания предназначены для студентов направления подготовки 11.03.01 «Радиотехника» (профиль «Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов») дневной и заочной формы обучения и направления подготовки 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» (профиль «Радиоэлектронные системы передачи информации») дневной формы обучения[1], подготовлены в электронном виде и содержатся в файле ЭПУ 21.pdf.

Ил. 8. Табл. 13. Библиогр.: 37 назв.

УДК 64.38
ББК 32.844

Рецензент: Л.Н. Коротков, д.ф.-м.н., профессор кафедры физики твердого тела ВГТУ

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с государственными требованиями, предъявляемыми к уровню подготовки бакалавров по направлению подготовки 11.03.01 «Радиотехника» (Целью изучения дисциплины “Схемотехника аналоговых и электропребразовательных устройств” является освоение студентами основ схемотехники аналоговых электронных устройств (АЭУ) и электропреобразовательных устройств (ЭПУ), формирование знаний по основам проектирования этих устройств, знаний о назначении, содержании и возможностях использования различных видов АЭУ и ЭПУ и перспективных направлениях создания устройств этого класса. “Схемотехника аналоговых и электропреобразовательных устройств” – дисциплина, изучающая схемотехнические особенности этих устройств, а также методы, используемые для их расчета и анализа.

Профиль «Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов»), в результате изучения дисциплины студенты должны знать:

- основы схемотехники и элементную базу аналоговых электронных устройств и электропреобразовательных устройств;
- принципы работы элементов современных АЭУ и ЭПУ и физические процессы, протекающие в них;
- методы поиска, хранения и представления в требуемом формате информации из различных электронных источников и баз данных, включая библиотеки современных пакетов прикладных программ, о параметрах и характеристиках радиоэлектронных изделий.

Студенты должны уметь:

- использовать методы расчета типовых аналоговых и электропреобразовательных функциональных узлов;
- осуществлять анализ физических и химических процессов, происходящих во время функционирования АЭУ и ЭПУ в номинальном и критическом режимах;
- обрабатывать и анализировать информацию, полученную из различных электронных источников и баз данных, включая библиотеки современных пакетов прикладных программ, о параметрах и характеристиках радиоэлектронных изделий, для выбора и обоснования элементной базы и схемотехнических решений с целью создания аналоговых и

электропреобразовательных устройств, соответствующих современному уровню науки и техники.

Студенты должны владеть:

- опытом выбора схем АЭУ и ЭПУ.
- практическими навыками регистрации и математическими методами обработки основных параметров и характеристик АЭУ и ЭПУ.
- практическими навыками поиска, хранения, обработки, анализа и представления в требуемом формате информации из различных электронных источников и баз данных, включая библиотеки современных пакетов прикладных программ, о параметрах и характеристиках радиоэлектронных изделий, соблюдая при этом основные требования информационной безопасности.

Для успешного усвоения материала дисциплины необходимо знание основных вопросов, излагаемых в курсах "Математика", "Физика", «Химия», «Физические основы микро- и наноэлектроники», «Основы теории цепей», «Радиотехнические цепи и сигналы», «Радиоматериалы и радиокомпоненты", "Электроника", «Метрология и радиоизмерения». Содержание дисциплины обеспечивает базу для освоения специальных дисциплин и дисциплин специализации: «Компьютерное моделирование радиоэлектронных устройств», «Радиопередающие устройства», «Радиоприемные устройства», «Радиотехнические системы».

Основной целью изучения дисциплины «Компьютерное моделирование радиоэлектронных устройств» является формирование у студентов знаний о методах и средствах моделирования, навыков компьютерного моделирования и анализа функциональных узлов радиоэлектронных устройств (РЭУ) с использованием компьютерной техники.

В соответствии с государственными требованиями, предъявляемыми к уровню подготовки бакалавров по направлению подготовки 11.03.01 «Радиотехника» (Профиль «Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов»), в результате изучения дисциплины студенты должны знать:

- принципы автоматизации моделирования и проектирования, методы схемотехнического проектирования и моделирования радиоэлектронных устройств;

Студенты должны уметь:

- использовать пакеты прикладных программ автоматизированного проектирования и моделирования из набора пакетов прикладных программ свободного доступа для автоматизированного проектирования и моделирования аналоговых, цифровых и аналого-цифровых радиоэлектронных устройств.

Студенты должны владеть:

- практическими навыками моделирования радиоэлектронных устройств с использованием пакетов прикладных программ автоматизированного проектирования и моделирования из набора пакетов прикладных программ свободного доступа.

Для успешного усвоения материала дисциплины необходимо знание основных вопросов, излагаемых в курсах "Математика", "Физика", «Химия», «Физические основы микро- и наноэлектроники», «Основы теории цепей», «Радиотехнические цепи и сигналы», «Радиоматериалы и радиокомпоненты", "Электроника", «Метрология и радиоизмерения». Содержание дисциплины обеспечивает базу для освоения специальных дисциплин и дисциплин специализации: «Компьютерное моделирование радиоэлектронных устройств», «Радиопередающие устройства», «Радиоприемные устройства», «Радиотехнические системы».

Основной целью изучения дисциплины «Электропреобразовательные устройства радиоэлектронных средств» является формирование у студентов знаний о назначении, принципах функционирования и возможностях использования различных видов электропреобразовательных устройств (ЭПУ) радиоэлектронных средств (РЭС) и перспективных направлениях создания устройств этого класса.

В соответствии с государственными требованиями, предъявляемыми к уровню подготовки бакалавров по направлению подготовки 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» (профиль «Радиоэлектронные системы передачи информации») дневной формы обучения, в результате изучения дисциплины студенты должны знать:

- принципы проектирования ЭПУ радиоэлектронных систем и комплексов;
- принципы функционирования ЭПУ РЭС, их параметры и характеристики;

- основные методы компьютерного проектирования электропреобразовательных устройств и их применения в радиоэлектронной аппаратуре различного назначения.

Студенты должны уметь:

- проводить электрический расчет типовых схем электропреобразовательных устройств радиоэлектронных систем и комплексов;
- осуществлять анализ основных параметров и характеристик ЭПУ РЭС;
- выбирать и обосновывать схемотехнические решения и элементную базу для создания электропреобразовательных устройств, соответствующих современному уровню науки и техники.

Студенты должны владеть:

- навыками разработки принципиальных схем электропреобразовательных устройств радиоэлектронных систем и комплексов радиоэлектронных устройств с применением современных систем автоматизированного проектирования и пакетов прикладных программ свободного доступа;
- практическими навыками регистрации основных параметров и характеристик ЭПУ РЭС.
- - практическими навыками проектирования и эксплуатации ЭПУ радиотехнических средств передачи, приема и обработки сигналов.

Для успешного усвоения материала дисциплины необходимо знание основных вопросов, излагаемых в курсах "Математика", "Физика", «Химия», «Основы теории цепей», «Радиотехнические цепи и сигналы», «Радиоматериалы и радиокомпоненты", "Электроника", «Метрология и радиоизмерения». Содержание дисциплины обеспечивает базу для освоения специальных дисциплин и дисциплин специализации: «Устройства генерирования и формирования сигналов», «Устройства приема и преобразования сигналов».

Структурно методические указания состоят из следующих разделов:

раздел «Введение» включает в себя информацию о цели изучения учебной дисциплины и ее основных характеристиках;

раздел «Разработка силового трансформатора» содержит теоретическую и справочную информацию по выбору конструкции и используемых материалов для маломощного силового трансформатора, а также описание методики расчета конструкции;

раздел «Заключение» содержит обобщения по методической направленности использования методических указаний.

1. РАЗРАБОТКА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Силовые трансформаторы маломощных выпрямителей, используемых для питания электронной аппаратуры, представляют собой электромагнитные устройства, состоящие из ферромагнитного сердечника (магнитопровода) и обмоток. Сердечники трансформаторов изготавливают из высоколегированных электротехнических сталей. При частоте сети 50 Гц для сердечников используют стали марок Э41, Э42, Э43, Э310, Э320, Э330, Э3100, Э3200 с толщиной стальных листов или ленты 0,5 и 0,35 мм. При повышенных частотах (400Гц и выше) используют стали марок Э44, Э45, Э46, Э47, Э48, Э340 и Э70 с толщиной пластин или ленты 0,2; 0,15; 0,1; 0,08 и 0,05 мм. Магнитные свойства некоторых марок электротехнической стали и величины их удельных потерь приведены в табл. 1.1 и 1.2.

Таблица 1.1

Основные свойства некоторых марок стали при частоте 50 Гц

Марка стали	Толщина стали, мм	Магнитная индукция (не менее), Тл, при напряженности магнитного поля, А/см			Удельные потери (не более), Вт/кг	
		10	25	50	1,0	1,5
Э41	0,50	1,30	1,46	1,57	1,55	3,50
Э41	0,35	1,30	1,46	1,57	1,35	3,00
Э42	0,50	1,29	1,45	1,56	1,40	3,10
Э42	0,35	1,29	1,45	1,56	1,20	2,80
Э43	0,50	1,29	1,44	1,55	1,25	2,90
Э43	0,35	1,29	1,44	1,55	1,05	2,50
Э43А	0,50	1,29	1,44	1,55	1,15	2,70
Э43А	0,35	1,29	1,44	1,55	0,90	2,20
Э310	0,50	1,60	1,75	1,83	1,25	2,45
Э310	0,35	1,60	1,75	1,83	0,80	1,75
Э320	0,50	1,65	1,80	1,87	0,95	2,10
Э320	0,35	1,65	1,80	1,87	0,70	1,50
Э330	0,50	1,70	1,85	1,90	0,80	1,75
Э330	0,35	1,70	1,85	1,90	0,60	1,30
Э330А	0,35	1,70	1,85	1,90	0,50	1,10
Э3100	0,50	-	1,50	1,60	1,70	3,70
Э3200	0,50	-	1,48	1,58	1,50	3,40

Таблица 1.2

Основные свойства некоторых марок стали при частоте 400 Гц

Марка стекла	Толщина стали, мм	Магнитная индукция (не менее), Тл, при напряженности магнитного поля, А/см			Удельные потери (не более), Вт/кг,	
		5	10	25	0,75	1,0
Э44	0,20	1,21	1,29	1,42	7,2	12,5
Э44	0,10	1,19	1,28	1,40	6,0	10,5
Э340	0,20	1,50	1,60	1,70	7,0	12,0

По конструктивному исполнению сердечники трансформаторов подразделяются на три основных типа; стержневые, броневые и тороидальные. В зависимости от конструкций сердечника трансформаторы также подразделяются на три указанных выше типа. Конструктивные особенности маломощных силовых трансформаторов иллюстрирует рис. 1.1. Магнитопроводы маломощных стержневых и броневых трансформаторов выполняются соответственно из П-образных и Ш-образных пластин трансформаторной стали (рис.1.1, а и б), а также ленточных сердечников подковообразной формы (рис. 1.1, в и г).

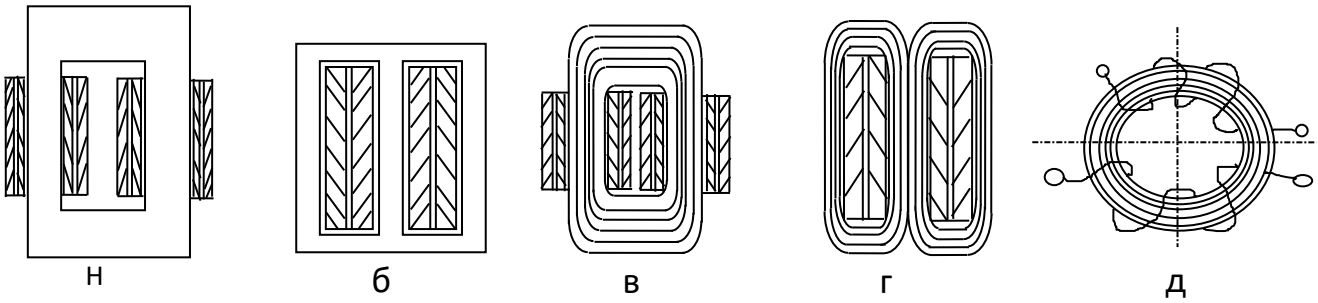


Рис. 1.1. Конструкция трансформаторов:
а,б - пластичные стержневой и броневой; в,г - ленточные стержневой и броневой; д - тороидальный

Основные достоинства *стержневого трансформатора*: большая поверхность охлаждения обмотки; малая индуктивность рассеяния; малый расход обмоточного провода; малая чувствительность к внешним магнитным полям (так как ЭДС помех, наводимые в обеих катушках трансформатора, имеют противоположные знаки и взаимно уничтожаются). Стержневые сердечники применяются для трансформаторов различной мощности.

Броневые сердечники расчитаны на малые мощности; к их достоинствам следует отнести: наличие только одной катушки с обмотками (вместо двух у стержневого сердечника), более высокий коэффициент заполнения окна сердечника обмоточным проводом, защита сердечником обмотки от механических повреждений.

Тороидальные сердечники (рис. 1.1, д) используют для трансформаторов малой мощности, работающих на повышенных частотах - от 400 Гц и выше. Достоинствами таких трансформаторов являются: относительно малое магнитное сопротивление, почти полное отсутствие внешнего потока рассеяния, нечувствительность к внешним магнитным полям.

Обмотки и другие токоведущие части трансформаторов изолируют с помощью специальных электроизоляционных материалов; основные данные некоторых из них приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Электроизоляционные материалы

Вид	Название	Марка	Толщина, мм	Класс нагревостой кости[1]
Бумага	Кабельная	К	0,08; 0,12; 0,17; 0,05;	А
	Телефонная	КТН	0,05	А
	Конденсаторная	КОН-11	0,005; 0,01; 0,012; 0,015; 0,022	
Тканевые материалы	Лакоткань	ЛШ1	0,01; 0,15	А
		ЛШ2	0,08; 0,10; 0,12; 0,15	А
		ЛСШ	0,04; 0,05; 0,06	А
		ЛСШ1	0,12	А
		ЛСШ2	0,12	А
	Стеклоткань	ЛСК1	0,12; 0,15	А
		ЛСК2	0,20	В
	Стекломикалента	ЛСК2ФК	0,13; 0,15; 0,17; 0,22	Н
Твердая изоляция	Электрокартон	ЭВ	0,1; 0,15; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 1,0; 1,25; 1,5; 1,75; 2,0; 2,5; 3,0	А
	Гетинакс	Б, В, Г	от 0,2 и выше	А
	Стеклотекстолит	СТ	от 0,5 и выше	F
Пленки	Фторопласт	Ф-4	0,01-0,1	С

[1] В зависимости от нагревостойкости изоляционные материалы разделяются на семь классов со следующими предельно допустимыми температурами; класс Y - 90^0С; класс А- 105^0С; класс Е (АВ) - 120^0С; класс В - 130^0С; класс F(ВС) - 155^0С; класс Н (СВ) - 180^0С; класс С - более 180^0С.

По способу размещения на магнитопроводе обмотки трансформатора могуть быть концентрическими и дисковыми (чередующимися). Концентрические обмотки выполняются в виде цилиндров, размещаемых на магнитопроводе: внутренняя обмотка, расположенная ближе к сердечнику, рассчитана на более низкое напряжение (НН); снаружи располагается обмотка более высокого напряжения (ВН) (рис. 1.2, а). Для уменьшения магнитного рассеяния применяют двойные или тройные концентрические обмотки (рис. 1.2, б). В дисковых чередующихся обмотках катушки низшего и высшего напряжений, изготовленные в виде отдельных дисков, подразделяются на группы и размещаются на магнитопроводе в чередующемся порядке (рис. 1.2, в). Наиболее широкое распространение в маломощных силовых трансформаторах получили концентрические обмотки.

Обмотки маломощных трансформаторов изготавливаются из медных проводов с эмалевой, волокнистой и комбинированной изоляцией. Номинальные данные медных обмоточных проводов круглого сечения приведены в табл. 1.4.

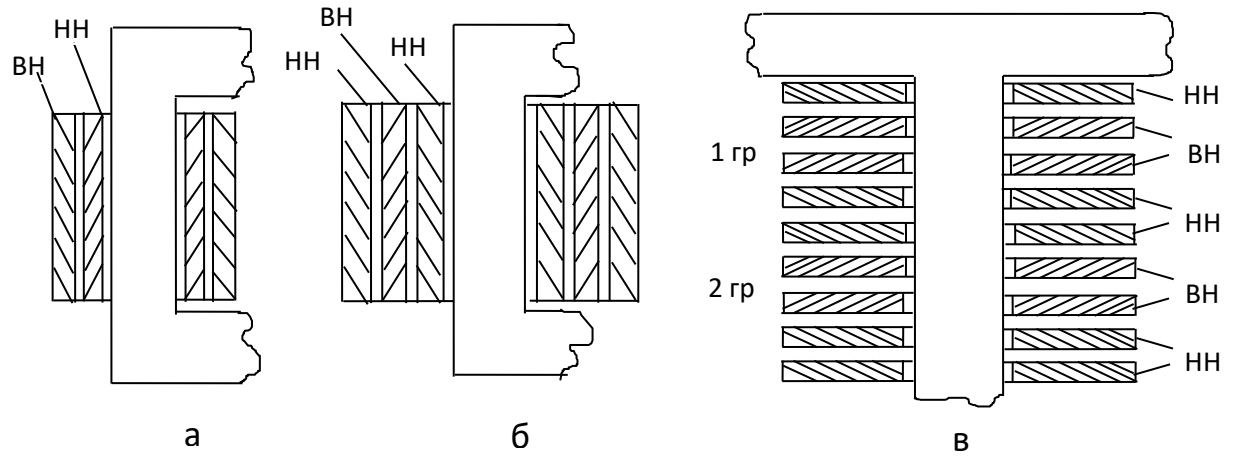


Рис. 1.2. Расположение обмоток на магнитопроводе:

а - простая концентрическая обмотка; б - двойная концентрическая обмотка; в - дисковые чередующиеся обмотки

Таблица 1.4

Номинальные данные обмоточных проводов круглого сечения[1]

Номинальный диаметр провода по меди, мм	Расчетное сечение мм^2	Масса 1 м медного провода, г	Максимальный наружный диаметр, мм								
			ПЭЛ	ПЭВ-1	ПЭВ-2	ПЭЛ–ШО	ПЭТВ-1 ПЭТВ	ПЭЛ–БО	ПБД	ПСД	ПЭТ, КСО
0,30	0,000706	0,0115	0,04	–	–	–	–	–	–	–	–
0,04	0,00126	0,0144	0,05	–	–	–	–	–	–	–	–
0,05	0,00196	0,0175	0,065	–	–	0,12	–	–	–	–	–
0,06	0,00283	0,0251	0,075	0,085	0,09	0,13	0,09	–	–	–	–
0,07	0,00385	0,0342	0,085	0,095	0,10	0,14	0,10	–	–	–	–
0,08	0,00503	0,0447	0,095	0,105	0,11	0,15	0,11	–	–	–	–
0,09	0,00636	0,0565	0,105	0,115	0,12	0,16	0,12	–	–	–	–
0,10	0,00785	0,0698	0,12	0,125	0,13	0,18	0,13	–	–	–	–
0,11	0,0095	0,0845	0,13	0,135	0,14	0,19	0,14	–	–	–	–
0,12	0,01131	0,101	0,14	0,145	0,15	0,20	0,15	–	–	–	–
0,13	0,01327	0,118	0,15	0,155	0,16	0,21	0,16	–	–	–	–
0,14	0,01539	0,137	0,16	0,165	0,17	0,22	0,17	–	–	–	–
0,15	0,01767	0,157	0,17	0,18	0,19	0,23	0,19	–	–	–	–
0,16	0,02011	0,179	0,18	0,19	0,20	0,24	0,20	–	–	–	–
0,17	0,02270	0,202	0,19	0,20	0,21	0,25	0,21	–	–	–	–
0,18	0,02545	0,226	0,20	0,21	0,22	0,26	0,22	–	–	–	–
0,19	0,02835	0,252	0,21	0,22	0,23	0,27	0,23	–	–	–	–
0,20	0,03142	0,279	0,225	0,23	0,24	0,29	0,24	–	–	–	–
0,21	0,34640	0,308	0,235	0,24	0,25	0,30	0,25	–	–	–	–
0,23	0,041155	0,369	0,255	0,27	0,28	0,32	0,28	–	–	–	–
0,25	0,04909	0,436	0,275	0,29	0,30	0,34	0,30	–	–	–	–
0,27	0,05726	0,509	0,31	0,31	0,32	0,37	0,32	–	–	–	–
0,29	0,6605	0,587	0,33	0,33	0,34	0,39	0,34	–	–	–	–
0,31	0,07548	0,671	0,35	0,35	0,36	0,42	0,36	–	–	–	–
0,33	0,08553	0,76	0,37	0,37	0,38	0,44	0,38	–	–	–	–
0,35	0,09621	0,855	0,39	0,39	0,41	0,46	0,41	–	–	–	–

Окончание табл. 1.4

Номинальный диаметр провода по меди, мм	Расчетное сечение мм^2	Масса 1 м медного провода, г	Максимальный наружный диаметр, мм								
			ПЭЛ	ПЭВ-1	ПЭВ-2	ПЭЛ–ШО	ПЭТВ-1 ПЭТВ	ПЭЛ–БО	ПБД	ПСД	ПЭТ, КСО
0,38	0,1134	1,01	0,42	0,42	0,44	0,49	0,44	0,56	0,61	–	0,70
0,41	0,132	1,11	0,45	0,45	0,47	0,52	0,47	0,59	0,64	0,65	0,79
0,44	0,1521	1,35	0,49	0,48	0,50	0,55	0,50	0,62	0,67	0,68	0,79
0,47	0,1735	1,54	0,52	0,51	0,53	0,58	0,53	0,65	0,70	0,71	0,79
0,49	0,1886	1,68	0,54	0,53	0,55	0,60	0,55	0,67	0,72	0,73	0,81
0,51	0,2043	1,82	0,56	0,56	0,58	0,63	0,58	0,69	0,74	0,75	0,83
0,53	0,2206	1,96	0,58	0,58	0,6	0,65	0,60	0,71	0,76	0,79	0,85
0,55	0,2376	2,11	0,6	0,60	0,62	0,67	0,62	0,73	0,78	0,81	0,87
0,57	0,2552	2,27	0,62	0,62	0,64	–	0,64	0,75	0,80	0,83	0,89
0,59	0,2734	2,43	0,64	0,64	0,66	0,71	0,66	0,77	0,82	0,85	0,91
0,62	0,3019	2,68	0,67	0,67	0,69	0,74	0,69	0,80	0,85	0,88	0,94
0,64	0,3217	2,86	0,69	0,69	0,72	0,76	0,72	0,82	0,87	0,90	0,96
0,67	0,3526	3,13	0,72	0,72	0,75	0,79	0,75	0,85	0,90	0,93	0,99
0,69	0,3739	3,32	0,74	0,74	0,77	0,81	0,77	0,87	0,92	0,95	1,00
0,72	0,4072	3,6	0,78	0,77	0,80	0,85	0,80	0,92	0,96	0,99	1,08
0,74	0,4301	3,82	0,8	0,8	0,83	0,87	0,83	0.94	0,98	1,01	1,10
0,77	0,4657	4,14	0,83	0,83	0,86	0,90	0,86	0,97	1,01	1,04	1,13
0,80	0,5027	4,47	0,86	0,86	0,89	0,93	0,89	1,00	1,04	1,07	1,16
0,83	0,5411	4,81	0,89	0,89	0,92	0,96	0,92	1,03	1,07	1,10	1,19
0,86	0,5809	5,16	0,92	0,92	0,95	0,99	0,95	1,06	1,10	1,13	1,22
0,90	0,6362	5,66	0,96	0,96	0,99	1,03	0,99	1,10	1,14	1,17	1,26
0,93	0,6793	6,04	0,99	0,99	1,02	1,06	1,02	1,13	1,17	1,20	1,29
0,96	0,7238	6,44	1,02	1,02	1,05	1,09	1,05	1,16	1,20	1,23	1,32
1,00	0,7854	6,98	1,07	1,08	1,11	1,14	1,11	1,23	1,29	1,29	1,40
1,04	0,8495	7,55	1,12	1,12	1,15	1,18	1,15	1,27	1,33	1,33	–
1,08	0,9161	8,14	1,16	1,16	1,19	1,21	1,19	1,31	1,37	1,37	1,48
1,12	0,9852	8,76	1,2	1,2	1,23	1,26	1,23	1,35	1,41	1,41	–
1,16	1,0568	9,4	1,24	1,24	1,27	1,30	1,27	1,39	1,45	1,45	1,56
1,20	1,131	10,1	1,28	1,28	1,31	1,34	1,31	1,43	1,49	1,49	–
1,25	1,2272	10,9	1,33	1,26	1,39	1,39	1,36	1,48	1,54	1,54	1,65
1,30	1,327	11,8	1,38	1,38	1,41	1,44	1,41	1,53	1,59	1,59	–
1,35	1,4314	12,7	1,43	1,43	1,46	1,49	1,46	1,58	1,64	1,64	1,75
1,40	1,5394	13,7	1,48	1,48	1,51	1,54	1,51	1,63	1,69	1,69	–
1,45	1,6513	14,7	1,53	1,53	1,56	1,59	1,56	1,68	1,74	1,74	1,85
1,50	1,7672	15,7	1,58	1,58	1,61	1,66	1,61	1,73	1,79	1,79	–
1,56	1,9113	17,0	1,64	1,64	1,67	1,72	1,64	1,79	1,85	1,85	1,96
1,62	2,0612	18,3	1,71	1,7	1,73	–	1,73	1,85	1,91	1,91	–
1,68	2,217	19,7	1,77	1,76	1,79	–	1,79	1,92	1,98	1,98	–
1,81	2,573	22,9	1,9	1,9	1,93	–	1,93	2,05	2,11	2,11	–
1,88	2,776	24,7	1,97	1,97	2,00	–	2,00	2,12	2,18	2,18	–
1,95	2,987	26,5	2,04	2,04	2,07	–	2,07	2,19	2,25	2,25	–
2,02	3,205	28,5	2,12	2,11	2,14	–	2,14	2,26	2,32	2,32	–
2,10	3,46	30,8	2,2	2,2	2,23	–	2,23	2,34	2,40	2,40	–
2,26	4,012	35,7	2,36	2,36	2,39	–	2,39	–	2,62	2,62	–
2,44	4,676	41,6	2,54	2,54	2,57	–	2,57	–	2,80	2,80	–
2,63	5,433	–	–	–	–	–	–	–	2,99	2,99	–

[1] Медные провода с эмалевой изоляцией выпускаются следующих марок:

ПЭЛ - провод с эмалевой утолщенной лакостойкой изоляцией (по нагревостойкости относится к классу А); ПЭТ - провод с эмалевой изоляцией повышенной теплостойкости (нагревостойкость класса В); ПЭВ - 1 и ПЭВ - 2 - провода с одинарным и двойным эмалевым винифлексовым покрытием соответственно (нагревостойкость классов А, В для ПЭВ - 1 и классов А,Е для ПЭВ - 2).

Из проводов с волокнистой изоляцией в трансформаторах применяются ПБО и ПБД - провода с изоляцией из хлопчатобумажной пряжи в один и два слоя соответственно (нагревостойкость класса А).

Из проводов с комбинированной изоляцией в трансформаторах применяются: ПЭЛБО - провод с лакостойкой эмалевой изоляцией и одним слоем хлопчатобумажной пряжи (нагревостойкость класса А); ПЭЛШО - провод с лакостойкой эмалевой изоляцией и одним слоем шелковой пряжи (нагревостойкость класса А).Провода с комбинированной изоляцией имеют более толстую изоляцию, чем провода с эмалевой изоляцией, и их применение целесообразно при сечении провода 0,5 мм^2 и более. При таких сечениях применение провода с эмалевой изоляцией нежелательно, так как при намотке на прямоугольные каркасы набольших размеров может произойти растрескивание и отслоение эмали на сгибах.

При выборе сердечника необходимо руководствоваться рядом критериев: при минимальных массе, габаритах и стоимости трансформаторы должны быть простыми по конструкции и технологии изготовления. В табл. 1.5÷1.8 приведены основные данные стандартных сердечников с указанием унифицированных рядов типовых размеров, а в табл. 1.9. — оптимальные соотношения размеров сердечников трансформаторов разных типов при минимальной массе, объеме и стоимости. Для частоты 50 Гц по всем технико-экономическим показателям (масса, объем, стоимость) предпочтительны трансформаторы стержневого типа, выполненные на магнитопроводах оптимальной формы. Однако наиболее простыми по конструкции и наиболее технологичными считаются броневые сердечники. Поэтому для малых мощностей до 100÷200 В·А и при напряжениях на обмотках менее 1000 В целесообразно использовать броневые трансформаторы с пластинчатым или ленточным магнитопроводом, а при частоте 400 Гц и выше — трансформаторы с тороидальными ленточными сердечниками.

1.2. Порядок расчета маломощного силового трансформатора

Для расчета силового трансформатора необходимы следующие исходные данные:

- напряжение сети U_1;
- частота тока питающей сети f_c;
- напряжение вторичных обмоток U_2, U_3 и т.д. ;
- мощности S_2, S_3 и т.д. вторичных обмоток (или токи I_2, I_3 и т.д.).

В результате расчета требуется определить:

- оптимальные геометрические размеры магнитопровода;

- данные обмоток (число витков, марки и диаметры проводов);

- параметры трансформаторов (ток холостого хода; напряжение короткого замыкания, изменение вторичного напряжения; потери и КПД; температуру перегрева и рабочую температуру обмоток).

На основе расчета необходимо составить электрическую схему трансформатора (или автотрансформатора) с указанием всех обмоток (рис. 1.3.).

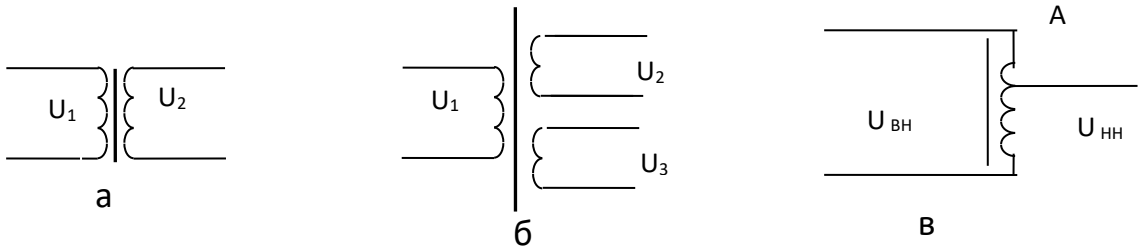


Рис. 1.3. Электрическая схема трансформатора

Расчет проводим в следующем порядке:

1. Определяем суммарную мощность вторичных обмоток для трансформатора

$$S_{тр} = S_2+S_3+. . ., \quad (1.1)$$

для автотрансформатора

$$S_{тр} = S_2(1 - U_{нн}/ U_{вн}), \quad (1.2)$$

где $S_{тр}$ - суммарная мощность, В · А; S_2, S_3 и т.д. - мощности вторичных обмоток, В · А; $U_{нн}$ - низкое напряжение автотрансформатора, В; $U_{вн}$ - высокое напряжение автотрансформатора, В.

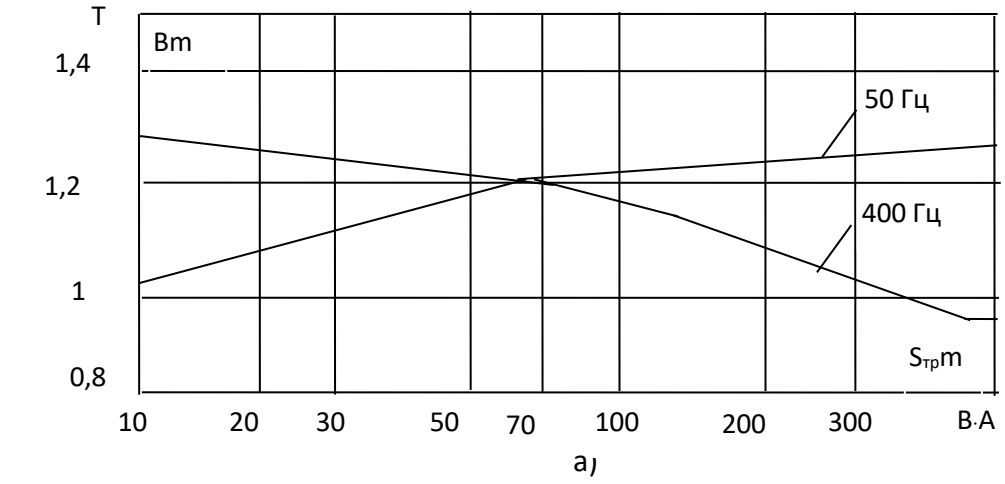
2. В соответствии с приведенными выше рекомендациями (табл. 1.1, 1.2, 1.5÷1.9) выбираем конфигурацию магнитопровода, марку стали, толщину пластин или ленты с учетом заданной частоты тока питающей сети.

3. Находим основной расчетный параметр трансформатора - произведение Q_cQ_o:

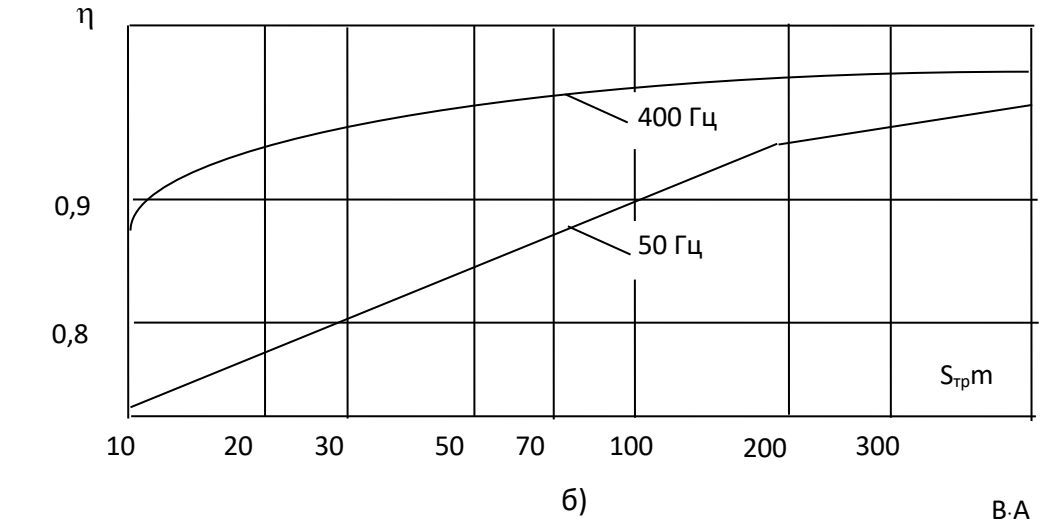
$$Q_cQ_o=[(1+\eta)/\eta] [(S_{тр}\cdot 10^2)/(4{,}44\ f_cB_mjk_мk_c)], \quad (1.3)$$

где Q_c и Q_o - площадь поперечного сечения стержня магнитопровода и площадь окна, см^2, η - КПД трансформатора; $S_{тр}$ - мощность трансформатора, В·А; f_c — частота тока питающей сети, Гц; B_m — амплитуда магнитной индукции, Тл; j — плотность тока в обмотках, А/мм^2; $k_м$ и k_c — коэффициенты заполнения медью окна сердечника и сталью площади поперечного сечения стержня магнитопровода.

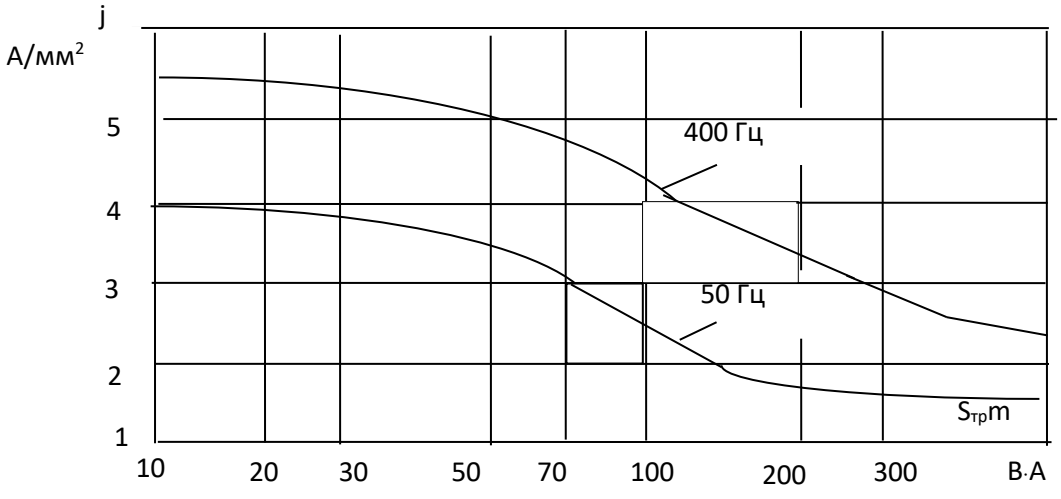
4. Определяем амплитуду магнитной индукции B_m, КПД трансформатора η и плотность тока j в обмотках. С этой целью используем графики, приведенные на рис. 1.4 и выражающие зависимость указанных параметров от мощности трансформатора $S_{тр}$.



а)



б)

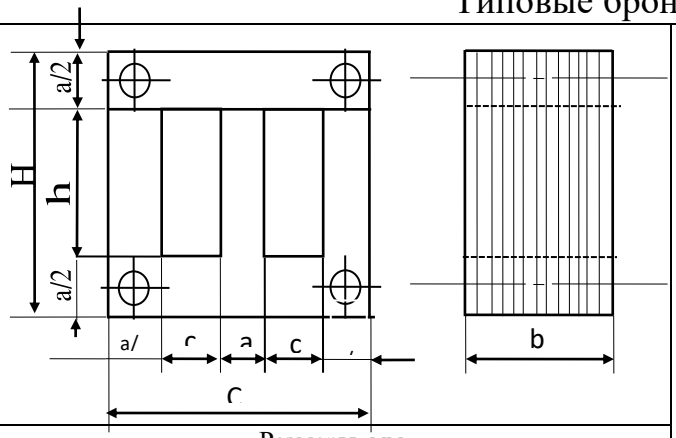


в)

Рис. 1.4. Зависимости амплитуды магнитной индукции (а), КПД (б) и плотности тока в обмотках (в) от мощности трансформатора

Таблица 1.5

Типовые броневые пластинчатые магнитопроводы

Обозначение магнитопровода							Активная площадь сечения среднего стержня Q_{ca}, см^2		Средняя длина магнитной силовой линии $l_{ср}$, см	Сечение стали х сечение окна $Q_c \cdot Q_o$, см^4	Активный объем магнитопровода $V_{ст}$, см^3		Масса магнитопровода $G_{ст}$, г		Ориентировочная мощность трансформатора на частотах, В·А	
	Размеры, мм														f_c=50 Гц	f_c=400 Гц
	a	h	c	C	H	b	0,2 мм	0,35 мм			0,2 мм	0,35 мм	0,2 мм	0,35 мм		
Ш12Х12	12	30	12	48	42	12	1,23	1,31	10,03	5,2	12,43	13,14	100	110	5,5	45
Ш12Х16	12	30	12	48	42	16	1,63	1,75	10,03	6,8	16,35	17,55	130	140	7,0	55
Ш12Х20	12	30	12	48	42	20	2,04	2,18	10,03	8,6	20,46	21,86	170	180	8,5	65
Ш12Х25	12	30	12	48	42	25	2,55	2,18	10,03	10,8	25,58	27,38	210	230	10,0	80
Ш16Х16	16	40	16	64	56	16	2,18	2,33	13,7	16,6	29,9	32,0	240	260	20	130
Ш16Х20	16	40	16	64	56	20	2,72	2,91	13,7	20,5	37,3	39,6	300	320	26	150
Ш16Х25	12	30	12	48	42	25	3,40	3,64	13,7	25,6	46,6	49,8	370	400	30	170
Ш16Х32	12	30	12	48	42	32	4,35	4,66	13,7	32,6	59,6	63,8	470	510	34	200
Ш20Х12	20	50	20	80	70	12	2,04	2,18	17,4	24,6	35,0	37,4	280	300	25	170
Ш20Х16	20	50	20	80	70	16	2,72	2,91	17,4	32	46,7	50	380	400	32	200
Ш20Х20	20	50	20	80	70	20	3,40	3,64	17,4	40	58,3	62,4	470	500	40	230
Ш20Х25	20	50	20	80	70	25	4,25	4,55	17,4	50	72,9	78,1	590	620	48	250
Ш20Х32	20	50	20	80	70	32	5,44	5,82	17,4	64	93,2	99,8	750	800	60	300
Ш20Х40	20	50	20	80	70	40	6,80	7,28	17,4	80	116,2	125	940	990	70	400
Ш20Х50	20	50	20	80	70	50	8,50	9,10	17,4	100	145,7	156,2	1150	1240	85	450
Ш25Х25	25	62,5	25	100	87,5	25	5,31	5,68	21,4	97,5	113,8	121,8	900	970	85	540
Ш25Х32	25	62,5	25	100	87,5	32	6,80	7,28	21,4	125	145,5	156,0	1160	1230	105	600
Ш25Х40	25	62,5	25	100	87,5	40	8,50	9,10	21,4	156	182,0	195,0	1440	1556	130	700
Ш25Х50	25	62,5	25	100	87,5	50	10,6	11,4	21,4	195	227	244	1800	1930	160	800

Окончание табл. 1.5

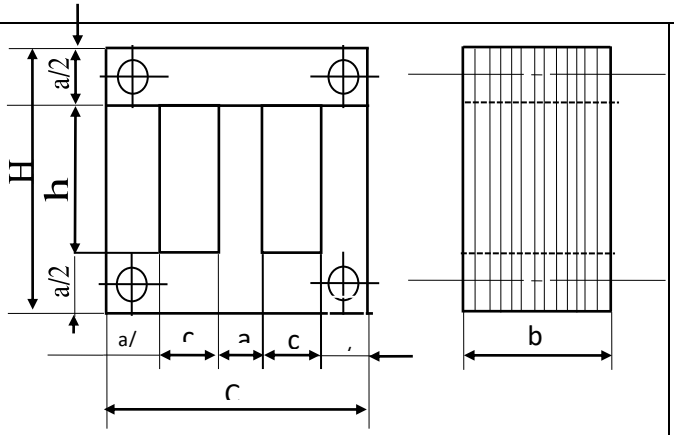
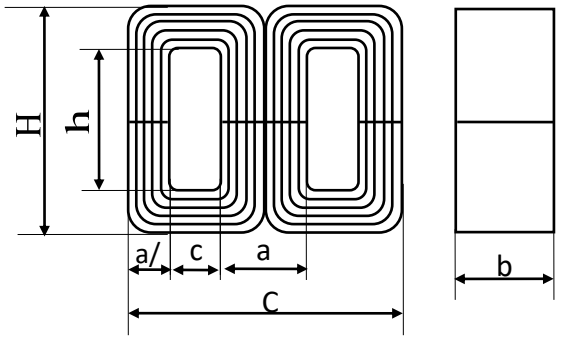
Обозначение магнитопровода							Активная площадь сечения среднего стержня Q_{ca}, см^2		Средняя длина магнитной силовой линии $l_{ср}$, см	Сечение стали х сечение окна $Q_c \cdot Q_o$, см^4	Активный объем магнитопровода $V_{ст}$, см^3		Масса магнитопровода $G_{ст}$, г		Ориентировочная мощность трансформатора на частотах, В·А	
	Размеры, мм														f_c=50 Гц	f_c=400 Гц
	a	h	c	C	H	b	0,2 мм	0,35 мм			0,2 мм	0,35 мм	0,2 мм	0,35 мм		
Ш32Х32	32	80	32	128	112	32	8,70	9,32	27,4	261	238,5	255,5	1890	2020	200	900
Ш32Х40	32	80	32	128	112	40	10,88	11,65	27,4	328	298	319,0	2370	2530	240	1000
Ш32Х50	32	80	32	128	112	50	13,6	14,56	27,4	410	373	399,0	2950	3170	300	1200
Ш32Х64	32	80	32	128	112	64	17,41	18,63	27,4	522	477	510,0	3790	4040	390	1400
Ш40Х40	40	100	40	160	140	40	13,6	14,56	34,3	640	466	500	3700	3960	430	1650
Ш40Х50	40	100	40	160	140	50	17,0	18,2	34,3	800	583	625	4610	4950	550	2000
Ш40Х64	40	100	40	160	140	64	21,76	23,29	34,3	1025	746	800	5910	6320	680	2400
Ш40Х80	40	100	40	160	140	80	27,20	29,12	34,3	1280	932	998	7390	7920	850	2500

Таблица 1.6

Типовые броневые ленточные магнитопроводы

Обозначение магнитопровода							Актив-ная пло-щадь сечения магни-топро-вода $Q_{са}$, $см^2$	Средняя длина силовой линии $l_{ср}$, см	Сечение стали× сечение окна $Q_с \cdot Q_0$, $см^4$	Активный объем магнитопр овода $V_{ст}$, $см^3$	Масса магнитопр овода $G_{ст}$, г	Ориентировочная мощность трансформатора (В·А) на частотах, Гц	
	Размеры, мм											$f_с$= 50 Гц	$f_с$= 400 Гц
	a	h	c	C	H	b							
ШЛ10Х10	10	25	10	40	35	10	0,87	8,5	2,50	7,4	67	–	37
ШЛ10Х12,5	10	25	10	40	35	12,5	1,09	8,5	3,12	9,26	71	–	47
ШЛ10Х16	10	25	10	40	35	16	1,39	8,5	4	11,8	91	–	56
ШЛ10Х20	10	25	10	40	35	20	1,74	8,5	5	14,8	113	–	67
ШЛ12Х12,5	12	30	12	48	42	12,5	1,31	10,2	5,4	13,36	100	9	80
ШЛ12Х16	12	30	12	48	42	16	1,68	10,2	6,9	17,1	130	10	94
ШЛ12Х20	12	30	12	48	42	20	2,10	10,2	8,7	21,4	165	13	112
ШЛ12Х25	12	30	12	48	42	25	2,63	10,2	10,8	26,8	205	16	135
ШЛ16Х16	16	40	16	64	56	16	2,24	13,6	16,6	30,46	235	20	158
ШЛ16Х20	16	40	16	64	56	20	2,80	13,6	20,5	38,1	295	26	195
ШЛ16Х25	16	40	16	64	56	25	3,50	13,6	25,6	47,6	370	33	250
ШЛ16Х32	16	40	16	64	56	32	4,50	13,6	32,6	61,2	470	43	300
ШЛ20Х20	20	50	20	80	70	20	3,50	17,1	40	59,9	460	54	330
ШЛ20Х25	20	50	20	80	70	25	4,40	17,1	50	75,2	575	68	380
ШЛ20Х32	20	50	20	80	70	32	5,60	17,1	64	95,8	735	86	450

Окончание табл. 1.6

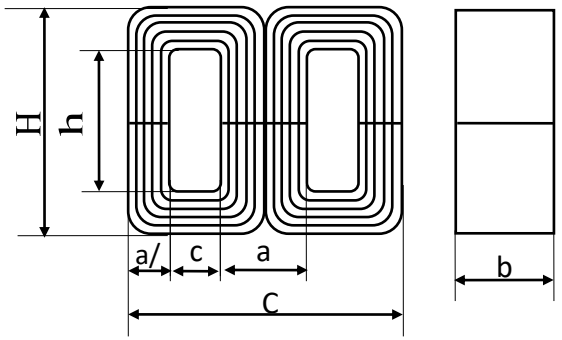
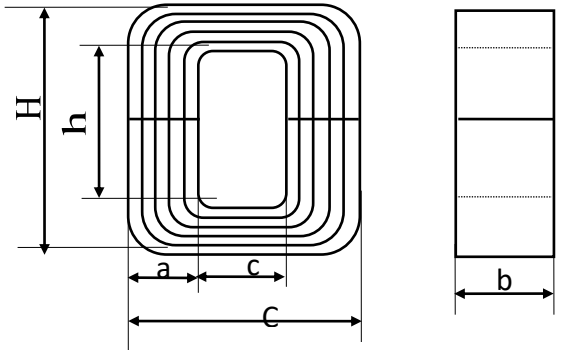
Обозначение магнитопровода							Актив-ная пло-щадь сечения магни-топро-вода $Q_{са}$, $см^2$	Средняя длина силовой линии $l_{ср}$, см	Сечение стали× сечение окна $Q_с \cdot Q_0$, $см^4$	Активный объем магнитопр овода $V_{ст}$, $см^3$	Масса магнитопр овода $G_{ст}$, г	Ориентировочная мощность трансформатора (В·А) на частотах, Гц	
	Размеры, мм											$f_с$= 50 Гц	$f_с$= 400 Гц
	a	h	c	C	H	b							
ШЛ20Х40	20	50	20	80	70	40	7,10	17,1	80	121,4	920	110	510
ШЛ25Х25	25	62,5	25	100	87,5	25	5,50	21,3	98	117	900	135	610
ШЛ25Х32	25	62,5	25	100	87,5	32	7,10	21,3	125	151,2	1150	170	730
ШЛ25Х40	25	62,5	25	100	87,5	40	8,80	21,3	156	187,4	1440	210	810
ШЛ25Х50	25	62,5	25	100	87,5	50	11	21,3	195	234	1800	260	990
ШЛ32Х32	32	80	32	128	112	32	9,10	27,3	261	284,4	1900	310	1200
ШЛ32Х40	32	80	32	128	112	40	11,30	27,3	328	308,5	2370	390	1400
ШЛ32Х50	32	80	32	128	112	50	14,20	27,3	410	388	2970	490	1650
ШЛ32Х64	32	80	32	128	112	64	18,10	27,3	523	494	3800	690	1940
ШЛ40Х40	40	100	40	160	140	40	14,20	27,3	640	486	3720	690	2200
ШЛ40Х50	40	100	40	160	140	50	17,70	34,2	800	605	4650	850	2500
ШЛ40Х64	40	100	40	160	140	64	22,70	34,2	1025	776	5960	1000	3000
ШЛ40Х80	40	100	40	160	140	80	28,40	34,2	1280	971	7430	1200	3500

Таблица 1.7

Типовые стержневые ленточные магнитопроводы

Обозначение магнитопровода							Активная площадь сечения магни-топровода $Q_{са}$, см^2	Средняя длина силовой линии $l_{ср}$, см	Сечение стали× сечение окна $Q_с$ Q_0, см^4	Активный объем магнитопровода $V_{ст}$, см^3	Масса магнитопровода $G_{ст}$,г	Ориентировочная мощность трансформатора (В·А) на частотах, Гц	
	Размеры, мм											$f_с$= 50 Гц	$f_с$= 400 Гц
	a	b	c	C	H	h							
ПЛ10Х12,5 20	10	12,5	12,5	32,5	40	20	1,1	9,6	3,1	10,56	81	7,5	46,5
ПЛ10Х12,5 25	10	12,5	12,5	32,5	45	25	1,1	10,6	3,9	11,65	89	8,8	52
ПЛ10Х12,5 32	10	12,5	12,5	32,5	52	32	1,1	11,6	5,0	12,76	98	10	60
ПЛ10Х12,5 40	10	12,5	12,5	32,5	60	40	1,1	13,6	6,3	14,95	114	12,5	73
ПЛ12,5Х16 25	12,5	16	16	41	50	25	1,77	12,0	8,0	21,2	163	13,5	91
ПЛ12,5Х16 32	12,5	16	16	41	55	32	1,77	13,2	10,2	23,7	182	16	110
ПЛ12,5Х16 40	12,5	16	16	41	65	40	1,77	15,0	12,8	26,6	203	19	130
ПЛ12,5Х16 50	12,5	16	16	41	75	50	1,77	17,0	16	30,1	230	22	156
ПЛ12,5Х25 30	12,5	25	20	45	55	30	2,76	13,8	18,7	38,1	292	28	200
ПЛ12,5Х25 40	12,5	25	20	45	65	40	2,76	15,8	25	43,6	334	35	248
ПЛ12,5Х25 50	12,5	25	20	45	75	50	2,76	17,8	31	49,1	376	44	300
ПЛ12,5Х25 60	12,5	25	20	45	85	60	2,76	19,8	37,6	54,6	418	55	340
ПЛ16Х32 40	16	32	25	57	72	40	4,54	18,0	51	81,7	620	70	430
ПЛ16Х32 50	16	32	25	57	82	50	4,54	20,0	64	90,8	690	90	510

Окончание табл. 1.7

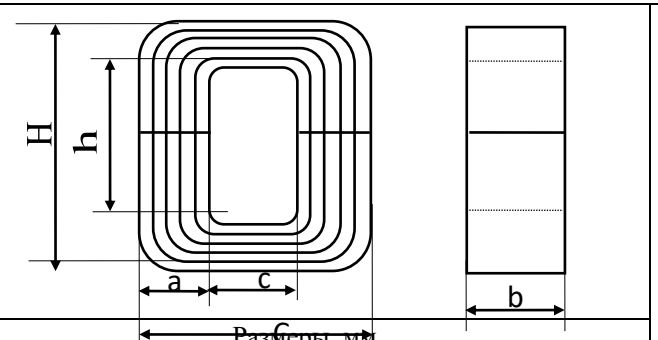
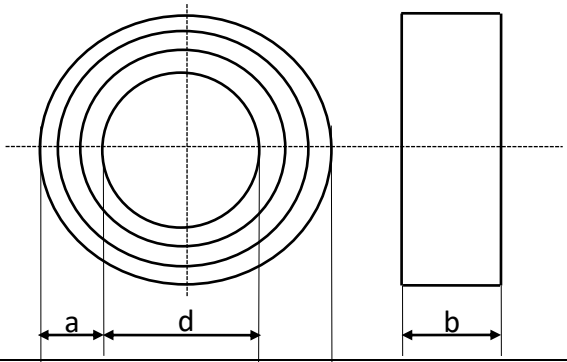
Обозначение магнитопровода	 Размеры, мм						Активная площадь сечения магни-топровода $Q_{са}$, см^2	Средняя длина силовой линии $l_{ср}$, см	Сечение стали× сечение окна $Q_с$ Q_0, см^4	Активный объем магнитопровода $V_{ст}$, см^3	Масса магнитопровода $G_{ст}$, г	Ориентировочная мощность трансформатора (В·А) на частотах, Гц	
	a	b	c	C	H	h						$f_с$ = 50 Гц	$f_с$ = 400 Гц
ПЛ16Х32 65	16	32	25	57	97	65	4,54	23,0	83	104,4	795	115	620
ПЛ16Х32 80	16	32	25	57	112	80	4,54	26,0	102	118	900	145	730
ПЛ20Х40 50	20	40	32	72	90	50	7,1	22,7	128	161,2	1230	180	860
ПЛ20Х40 60	20	40	32	72	100	60	7,1	24,7	154	175,4	1350	220	980
ПЛ20Х40 80	20	40	32	72	120	80	7,1	28,7	205	204,0	1550	280	1220
ПЛ20Х40 100	20	40	32	72	140	100	7,1	32,7	256	232,0	1770	350	1450
ПЛ25Х50 65	25	50	40	90	115	65	11,1	28,8	325	320,0	2440	420	1840
ПЛ25Х50 80	25	50	40	90	130	80	11,1	31,8	400	353,0	2700	500	2150
ПЛ25Х50 100	25	50	40	90	150	100	11,1	35,8	500	397,0	3040	620	2600
ПЛ25Х50 120	25	50	40	90	170	120	11,1	39,8	600	442,0	3380	740	2800
ПЛ32Х64 80	32	64	50	114	144	80	18,2	36,0	820	655,4	5000	1000	3500
ПЛ32Х64 100	32	64	50	114	164	100	18,2	40,0	1025	728,0	5600	1200	4000
ПЛ32Х64 130	32	64	50	114	194	130	18,2	46,0	1330	837,0	6480	1400	4800
ПЛ32Х64 160	32	64	50	114	224	160	18,2	52,0	1640	946,0	7250	1750	5600
ПЛ40Х80 100	40	80	64	114	180	100	28,6	45,8	2050	1296,0	9900	2400	6450
ПЛ40Х80 120	40	80	64	114	200	120	28,6	49,0	2460	1400,0	10700	2800	7700
ПЛ40Х80 160	40	80	64	114	240	160	28,6	57,3	3260	1670	12500	3500	9000
ПЛ40Х80 200	40	80	64	114	280	200	28,6	65,3	4100	1870,0	14300	4200	10000

Таблица 1.8

Типовые тороидальные ленточные магнитопроводы

Обозначение магнитопровода					Активная площадь сечения магни-топровода $Q_{са}$, см^2	Средняя длина силовой линии $l_{ср}$, см	Сечение стали× сечение окна $Q_с \cdot Q_0$, см^4	Активный объем магнитопровода $V_{ст}$, см^3	Масса магнитопровода $G_{ст}$, г	Ориентировочная мощность трансформатора (В·А) на частотах, Гц	
	d	a	b	D						$f_с$= 50 Гц	$f_с$= 400 Гц
ОЛ16/26 6,5	16	16	6,5	26	0,28	6,5	0,66	1,82	14,2	0,48	7,0
ОЛ16/26 8	16	5	8	26	0,35	6,5	0,80	2,28	17,6	0,6	8,8
ОЛ16/26 10	16	16	10	26	0,43	6,5	1	2,8	21,6	0,78	10,1
ОЛ16/26 12,5	16	16	12,5	26	0,54	6,5	1,36	3,51	27,1	0,92	13,6
ОЛ20/32 8	20	6	8	32	0,42	8,1	1,50	3,4	25	1,2	16,9
ОЛ20/32 10	20	6	10	32	0,52	8,1	1,86	4,21	32,2	1,4	20,8
ОЛ20/32 12,5	20	6	12,5	32	0,65	8,1	2,32	5,26	40,3	1,8	26
ОЛ20/32 16	20	6	16	32	0,84	8,1	3	6,8	52	2,3	33,7
ОЛ25/40 10	25	7,5	10	40	0,66	10,2	3,67	6,73	51,2	2,9	38
ОЛ25/40 12,5	25	7,5	12,5	40	0,82	10,2	4,60	8,36	64	3,7	47
ОЛ25/40 16	25	7,5	16	40	1,05	10,2	5,90	10,7	82	4,7	60
ОЛ25/40 20	25	7,5	20	40	1,30	10,2	7,35	13,26	102	5,8	75
ОЛ25/40 25	25	7,5	25	40	1,64	10,2	9,18	16,73	128	7,3	94
ОЛ32/50 16	32	9,0	16	50	1,27	12,8	11,5	16,25	125	9,3	120
ОЛ32/50 20	32	9,0	20	50	1,58	12,8	14,4	20,2	156	11,6	149

Окончание табл. 1.8

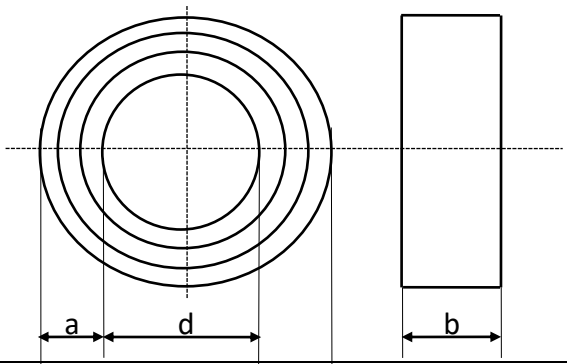
Обозначение магнитопровода					Активная площадь сечения магни-топровода $Q_{са}$, см^2	Средняя длина силовой линии $l_{ср}$, см	Сечение стали× сечение окна $Q_с \cdot Q_0$, см^4	Активный объем магнитопровода $V_{ст}$, см^3	Масса магнитопровода $G_{ст}$, г	Ориентировочная мощность трансформатора (В·А) на частотах, Гц	
	d	a	b	D						$f_с$= 50 Гц	$f_с$= 400 Гц
ОЛ32/50 25	32	9,0	25	50	1,98	12,8	18	25,3	194	14,6	187
ОЛ32/50 32	32	9,0	32	50	2,54	12,8	23	32,5	249	18,7	240
ОЛ40/64 20	40	12	20	64	2,12	16,3	30	34,6	264	24	278
ОЛ40/64 25	40	12	25	64	2,64	16,3	38	43	329	30	364
ОЛ40/64 32	40	12	32	64	3,38	16,3	48	55,1	421	39	444
ОЛ40/64 40	40	12	40	64	4,28	16,3	60	68,9	527	49,5	515
ОЛ50/80 25	50	15	25	80	3,32	20,4	75	67,7	518	58,5	550
ОЛ50/80 32	50	15	32	80	4,25	20,4	94	86,2	663	75	660
ОЛ50/80 40	50	15	40	80	5,31	20,4	118	108	829	93,5	825
ОЛ50/80 50	50	15	50	80	6,64	20,4	148	135	1035	117	1030
ОЛ64/100 32	64	18	32	100	5,10	25,8	187	131,5	1010	148	1300
ОЛ64/100 40	64	18	40	100	6,40	25,8	232	165	1265	186	1630
ОЛ64/100 50	64	18	50	100	8,00	25,8	200	206	1580	233	2040
ОЛ64/128 64	64	18	64	100	10,20	25,8	370	264	2020	293	2300
ОЛ80/128 40	80	24	40	128	8,5	32,6	482	277	2120	340	2500
ОЛ80/128 50	80	24	50	128	10,7	32,6	603	350	2670	428	2650
ОЛ80/128 64	80	24	64	128	13,7	32,6	775	446	3420	548	3340
ОЛ80/128 80	80	24	80	128	17,1	32,6	965	556	4250	685	4170

Таблица 1.9

Оптимальные соотношения размеров для трансформаторов

Конструкция (тип) трансформаторов	Значения								
	при минимальной массе			при минимальном объеме			при минимальной стоимости		
	b/a	c/a	h/a	b/a	c/a	h/a	b/a	c/a	h/a
Стержневая с двумя катушками	1÷2	1,5	2,0	1÷2	0,5	3,0	2	1,0	1,0
Броневая	1÷2	1,0	2,5	1÷2	1,0	2,5	2	0,5	1,0
Тороидальная	0,4÷1,0	2	—	1÷2	2,0	—	—	—	—

5. Находим коэффициент заполнения медью окна сердечника $k_м$. Этот коэффициент зависит от диаметра провода обмоток и мощности трансформатора и приведен в таблицах 1.10, 1.11.

6. Значение коэффициента заполнения сталью сечения сердечника определяем в зависимости от толщины стальных листов или ленты по таблице 1.12.

Таблица 1.10

Значения $k_м$ для некоторых марок проводов при напряжении менее 1000 В

Марка провода	Диаметр провода	$k_м$	Марка провода	Диаметр провода	$k_м$
ПЭЛ, ПЭВ, ПЭТ	0,05÷0,1	0,15÷0,20	ПЭЛШД	0,2÷0,5	0,15÷0,22
	0,1÷0,2	0,18÷0,25	ПШД		
	0,2÷0,5	0,22÷0,30	ПЭЛБО		
	0,5÷1,5	0,27÷0,35	ПБД	0,5÷1,5	0,16÷0,25
ПЭЛШО	0,1÷0,2	0,12÷0,19	ПЭЛБД	1,5÷4,5	0,22÷0,30
	0,2÷0,5	0,17÷0,25			

Табл. 1.11

Значения $k_м$ в зависимости от мощности трансформатора

$S_{тр}$, В·А	$k_м$	
	при f_c=50 Гц	при f_c=400 Гц
15÷30	0,22÷0,28	0,21÷0,25
50÷150	0,28÷0,34	0,25÷0,28
150÷300	0,34÷0,36	0,28÷0,30
300÷1000	0,36÷0,38	0,30÷0,37

Табл. 1.12

Значения коэффициента k_c от толщины листа

Толщина листа, мм	k_c для магнитопроводов	
	пластинча-тых	ленточных
0,35÷0,5	0,89÷0,93	0,95÷0,97
0,2÷0,35	0,82 — 0,89	0,93÷0,95
0,05÷0,01	—	0,75÷0,88

7. Используя оптимальные соотношения размеров для трансформаторов (табл. 1.9), определяем ширину стержня магнитопровода

$$a = \sqrt[4]{Q_c Q_o / (xyz)}, \quad (1.4)$$

где x = c/a; y = b/a; z = h/a (табл. 1.9).

Зная значение a и $Q_c Q_o$, по табл. 1.5÷1.8, выбираем магнитопровод и выписываем из таблиц все справочные данные, необходимые для дальнейшего расчета (геометрические размеры магнитопровода, его сечение, массу, среднюю длину магнитной силовой линии и др.).

8. Определяем потери в стали

$$P_{ст} = \sigma G_{ст}, \quad (1.5)$$

где σ - удельные потери (Вт/кг), которые зависят от марки стали, толщины пластин или ленты магнитной индукции и частоты сети (рис. 1.5); $G_{ст}$ - масса стали магнитопровода, кг (определяется из таблиц для заданного типа магнитопровода).

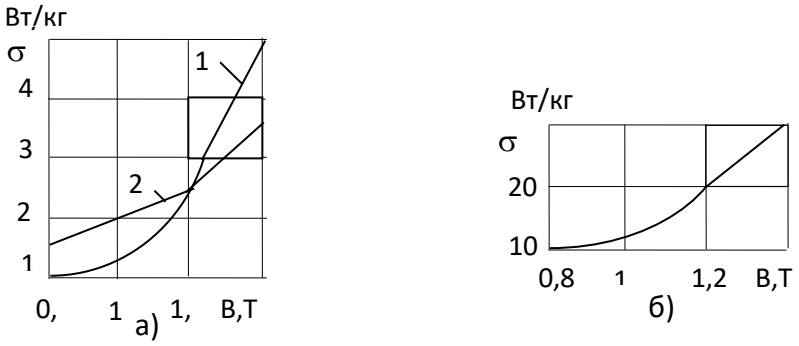


Рис. 1.5. Экспериментальные кривые зависимости удельных потерь в стали от магнитной индукции:
а - при частоте 50 Гц для стали Э42 (1) и Э310 (2) и толшине пластин 0,35; б - при частоте 400 Гц для стали Э340 при толщине пластин 0,15 мм

9. Находим ток холостого хода. Для этого необходимо:

а) определить активную составляющую тока холостого хода, потребляемого трансформатором на покрытие потерь в стали (выражается в процентах от номинального тока)

$$i_{ахол} = (P_{ст}/S_{тр})\ 100; \quad (1.6)$$

б) вычислить реактивную составляющую тока холостого хода, выраженную в процентах от номинального тока

$$i_{рхол} = (q_{ст} G_{ст} / S_{тр})\ 100, \quad (1.7)$$

где $q_{ст}$ - удельная намагничивающая мощность (вар/кг), зависящая от марки стали, частоты, конструкции магнитопровода и магнитной индукции (рис.1.6);

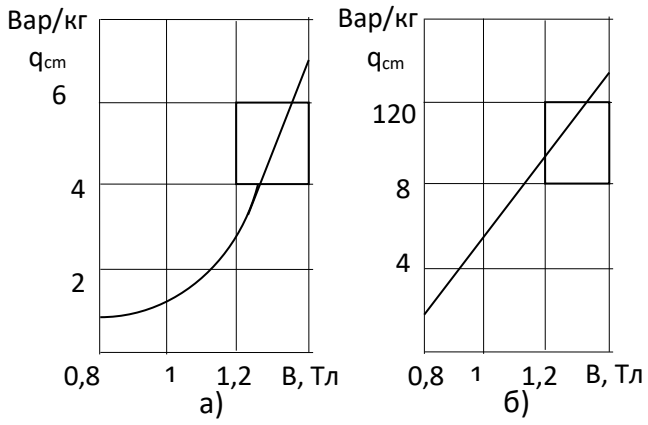


Рис. 1.6. Графики для определения удельной намагничивающей мощности для стали:
а - при частоте 50 Гц для стали Э42 толшиной 0,35; б - при частоте 400 Гц для стали Э340 при толшине пластин 0.15 мм

10. Определяем значение тока первичной обмотки

$$I_1 = S_{тр} / U_1 \eta \cos \varphi_1, \qquad (1.9)$$

где $\cos \varphi_1$ - коэффициент мощности (при частоте 50 Гц $\cos \varphi_1 = 0{,}9 \div 0{,}95$; при частоте 400 Гц $\cos\varphi_1 = 0{,}85 \div 0{,}95$; для автотрансформатора $S_{тр} = S_2$ и $\eta \cos\varphi_1 = 0{,}9 \div 0{,}95$).

Абсолютное значение тока холостого хода равно

$$I_{хол} = (i_{хол} /100)\, I_1. \qquad (1.10)$$

Ток холостого хода $I_{хол}$ в трансформаторах малой мощности обычно составляет 25÷40% от номинального значения при частоте 50 Гц и 10÷30% при частоте 400 Гц. Если найденный ток холостого хода оказался выше указанных значений, то следует уменьшить магнитную индукцию; если же этот ток оказался меньше указанных значений, то магнитную индукцию следует увеличить и вновь призвести расчет.

11. Находим токи в обмотках трансформатора

$$I_i = S_i / U_i, \qquad (1.11)$$

где i - номер обмотки трансформатора; S_i - мощность соответствующей обмотки В·А; U_i - напряжение обмотки, В.

12. Поперечные сечения проводов обмоток ($мм^2$) определяем по формулам

$$q_1' = I_1 /j; \qquad q_2' = I_2 /j; \qquad q_3' = I_3 /j. \ldots, \qquad (1.12)$$

где I_1, I_2, I_3 и т.д. - токи в соответствующих обмотках, А; j - плотность тока, которая определена по графику рис. 1.4, в, $А/мм^2$.

По табл. 1.4 определяем ближайшие к рассчитанным значения стандартных сечений проводов q_1, q_2, q_3 . . . для всех обмоток и уточняем марку проводов (при напряжении обмоток до 500 В рекомендуется провод ПЭЛ или ПЭВ-1 при токах в обмотках до 5 А и провод ПЭЛБО или ПБД при токах более 5 А; при напряжении обмоток более 500 В целесообразно выбрать провод ПЭВ-2).

Далее для выбранных проводов каждой обмотки необходимо выписать из табл. 1.4 их диаметры с изоляцией (максимальный наружный диаметр d_1, d_2, d_3, . . .) и без нее (номинальный диаметр провода по меди d_1, d_2, d_3, . . .), а также массу 1 м провода (g_1, g_2, g_3 . . .).

Действительная плотность тока в обмотках составляет

$$j_2 = I_1/ q_1; \qquad j_2 = I_2 / q_2; \qquad j_3 = I_3 / q_3. . . \quad . \tag{1.13}$$

Средняя плотность тока для трансформатора, содержащего n обмоток, равна

$$j = \sqrt[n]{j_1 j_2 j_3 \cdots j_n} \ . \tag{1.14}$$

13. Находим амплитуду магнитного потока в магнитопроводе трансформатора Ф (Вб)

$$\Phi = BQ_{ca} \cdot 10^{-4} = BQ_c k_c 10^{-4}, \tag{1.15}$$

где Q_{ca} - активное сечение магнитопровода (табл. 1.5 ÷ 1.8), см^2.

14. Число витков каждой обмотки определяем по формуле

$$W_i = E_i /(4{,}44\, f_c\, \Phi), \tag{1.16}$$

где i - номер обмотки (i = 1, 2, 3...); E_i - ЭДС соответствующей обмотки.

При работе трансформатора под нагрузкой на сопротивлениях его обмоток происходит падение напряжения. Поэтому для вычисления ЭДС первичной (вторичных) обмоток необходимо воспользоваться формулой

$$E_i = U_i\,(1 - \Delta u_i/100) \quad (E_i = U_i\,/(1 - \Delta u_i/100)), \tag{1.17}$$

где U_i - напряжение на соответствующей обмотке; Δu_i - процентное падение напряжения на ней.

Ориентировочные значения процентного падения напряжения на первичной Δu_1 и вторичных Δu_2 обмотках в зависимости от мощности трансформаторов (броневого типа) с напряжением обмоток до 1000 В и температурой перегрева до 50^0 С приведены на рис. 1.7.

При использовании трансформаторов стережневого типа значения Δu_1 и Δu_2 следует уменьшить на 20-30% по сравнению с приведенными на рис 1.7.

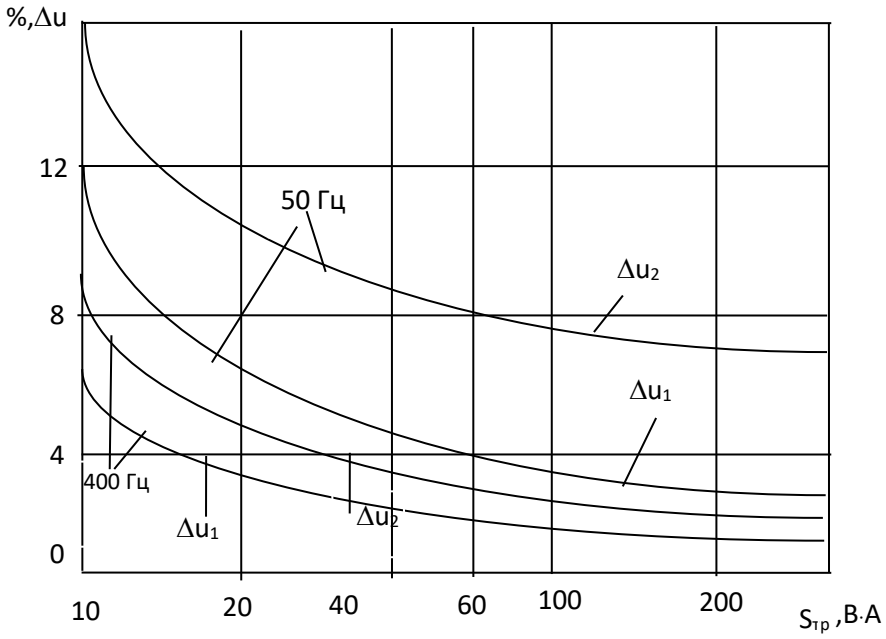


Рис. 1.7. Зависимость процентного падения напряжения в первичной Δu_1 и вторичной Δu_2 обмотках от мощности трансформатора

15. Составляем эскиз размещения обмоток (рис. 1.8). Обмотки трансформатора укладывают на каркасе из изоляционного материала (электрокартон, гетинакс, пластмасса и др.).

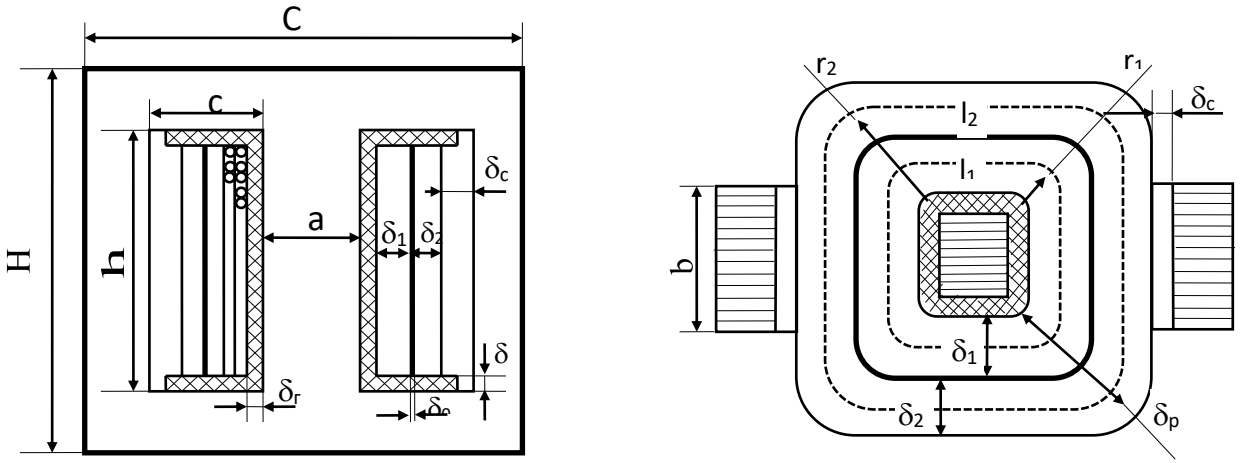


Рис. 1.8. Размещение обмоток на магнитопроводе

Каркас состоит из гильзы, представляющей собой трубку прямоугольного, квадратного или круглого сечения; на концах гильзы укрепляются боковые щеки. Обычно гильза и боковые щеки имеют одинаковую толщину ($\delta_1=\delta_{щ}$). Ближе к стержню магнитопровода располагают первичную

обмотку толщиной δ_1, а затем вторичную толщиной δ_2. После намотки каждого ряда укладывается межслойная изоляция, в качестве которой применяется конденсаторная, кабельная или телефонная бумага толщиной 0,01 мм при диаметре провода обмотки менее 0,1 мм, толщиной 0,05 мм при диаметре провода 0,1÷0,5 мм и толщиной 0,12 мм при диаметре провода более 0,5 мм (табл. 1.3).

16. Для определения высоты обмотки $h_{об}$ используем формулу

$$h_{об} = h — 2\delta_{щ} — 2\delta_{э}, \quad (1.18)$$

где h — высота окна магнитопровода, мм; $\delta_{щ}$ — толщина боковой щеки каркаса (обычно $\delta_{щ} = \delta_{г} = 1÷3$ мм); $\delta_{э}$ — ширина зазора между щекой каркаса и магнитопроводом, мм (обычно принимают $\delta_{э} = 0,5÷1$ мм на сторону).

17. Находим число витков в одном слое каждой обмотки N_i

$$N_i = (h_{об}/k_y d_i) — 1, \quad (1.19)$$

где d_i — диаметр провода данной обмотки с изоляцией, мм; k_y — коэффициент, учитывающий неплотность намотки (обычно принимают $k_y = 1,1÷1,15$).

18. Определяем число рядов (слоев) каждой обмотки

$$M_i = W_i/N_i, \quad (1.20)$$

где W_i — число витков рассчитываемой обмотки для броневого трансформатора.

Для стержневого трансформатора

$$M_i = W_i/2N_i. \quad (1.21)$$

Между обмотками укладывается изоляционная прокладка из локоткани или изоляционной бумаги (табл. 1.3). При напряжении обмоток до 1000 В толщина этой изоляции составляет $\delta_0 = 0,2÷0,3$ мм.

Радиальный размер каждой обмотки подсчитывается по формуле

$$\delta_i = 1,2M_i d_i, \quad (1.22)$$

где множитель 1,2 учитывает межслоевую изоляцию и разбухание обмотки при намотке и пропитке.

19. Определяем радиальный размер всех обмоток с учетом межслоевой и межобмоточной изоляции

$$\delta_p = \delta_1 + \delta_2 + ... + \delta_n + (n — 1)\,\delta_0, \quad (1.23)$$

где n — число обмоток.

О приемлемости размещения обмоток в окне сердечника судят по величине свободного промежутка между поверхностью последней обмотки до ярма в броневом трансформаторе

$$\delta_c = c — \delta_э — \delta_г — \delta_p \quad (1.24)$$

и между поверхностями наружных обмоток двух стержней в трансформаторе стержневого типа

$$\delta_c = c - 2(\delta_э - \delta_г - \delta_р), \quad (1.25)$$

где c — ширина окна магнитопровода; $\delta_э$ — зазор между гильзой каркаса и магнитопроводом ($\delta_э$ = 0,5÷1мм).

Свободный промежуток δ_c должен быть не менее 1÷4 мм и не более 5÷8 мм в зависимости от мощности трансформатора (чем больше мощность, тем больше δ_c). Таким образом,

$$1 \div 4 \text{ мм} \le \delta_c \le 5 \div 8 \text{ мм}. \quad (1.26)$$

Если условие (1.26) не выполняется, то необходимо произвести новый вариант расчета трансформатора, выбрав другой типоразмер магнитопровода.

20. Находим массу меди каждой обмотки, кг

$$G_{мi} = W_i g_i l_i \cdot 10^{-3}, \quad (1.27)$$

где i — номер обмотки; W_i — число витков обмотки; g_i — масса одного метра провода, г (табл. 1.4); l_i — средняя длина витков обмотки, м.

Для определения средней длины витков обмоток используется следующая формула (рис. 1.8):

$$l_i = 2(a + b + \pi r_i)10^{-3}, \quad (1.28)$$

где

$$r_i = \delta_э + \delta_г + (i-1)\delta_0 + \sum_1^i \delta_i - \delta_i / 2. \quad (1.29)$$

Масса меди всех обмоток

$$G_{мо} = \sum_{i=1}^{n} G_{мi}. \quad (1.30)$$

Потери в меди каждой обмотки при температуре провода 100÷150^{0}С составляют (Вт)

$$P_{мi} = 2{,}7\, j_i^2 G_{мi}, \quad (1.31)$$

где j_i — плотность тока в i-той обмотке, А/мм^2; $G_{мi}$ — масса этой обмотки, кг.

Суммарные потери в меди всех обмоток

$$P_{мо} = \sum_{i=1}^{n} P_{мi}. \quad (1.32)$$

21. Определяем коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = P/(P + P_{ст} + P_{мо}), \quad (1.33)$$

где $P = S_{тр}\cos\varphi$ — полезная мощность в нагрузке трансформатора (автотрансформатора), Вт.

22. Находим активное сопротивление каждой обмотки трансформатора по формуле:

$$R_i = \rho_м l_i W_i / q_i, \quad (1.34)$$

где $\rho_м$ — удельное сопротивление медного провода (при температуре 105^0C $\rho_{м105} = 0{,}0234 \cdot 10^{-6}$Ом·м); q_i — поперечное сечение провода рассчитываемой обмотки, мм^2.

23. Определяем температуру перегрева обмоток относительно окружающей среды по формуле

$$\Delta T = (P_{ст} + P_{мо})/(\alpha_т(Q_k + Q_c)), \quad (1.35)$$

где $\alpha_т$ — коэффициент теплоотдачи трансформатора (обычно принимают $\alpha_т$ = 11 ÷ 13 Вт/м^2 · ^{0}C); Q_k — поверхность охлаждения обмотки, м^2; Q_c — поверхность охлаждения магнитопровода, м^2.

Для броневого трансформатора

$$Q_k = 2h_{об}[a + \pi(c — 4)] \cdot 10^{-6}; \quad (1.36)$$

$$Q_c = 2[(C + H)b + (C + h)a + hb] \cdot 10^{-6}. \quad (1.37)$$

Для стержневого трансформатора

$$Q_k = 2h_{об}[2a + b + 2\pi(c/2 — 2)] \cdot 10^{-6}; \quad (1.38)$$

$$Q_c = 2[2Ca + b\,(e + 2a)] \cdot 10^{-6}. \quad (1.39)$$

24. Находим рабочую температуру обмоток

$$T_р = t_{окр} + \Delta T, \quad (4.40)$$

где $t_{окр}$ — температура окружающей среды. Найденное значение $T_р$ не должно превышать предельно допустимую величину, на которую рассчитана изоляция применяемого провода (см. примечания к табл. 1.3 и 1.). Например, для провода ПЭЛ предельно допустимая температура равна 105^0, а для ПЭВ-2 в зависимости от класса и изоляции — 120^0C и 130^0C.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев О.В., Китаев В.Е., Шихин А.Я. Электрические устройства / Под ред. А.Я. Шихина: Учебник.-М.: Энергоиздат, 1981. -336 с.
2. Иванов-Цыганов А.И. Электропреобразовательные устройства РЭС: Учебник для вузов. - 4-е изд., перераб и доп. - М.: Высш. шк., 1991. - 272 с.
3. Электропитание устройств связи: Учебник / А.А. Бокуняев, Б.В. Горбачев, В.Е. Китаев и др. Под ред. В.Е. Китаева. - М.: Радио и связь, 1988. - 280 с.
4. Горбатенко В.В., Горбатенко С.А., Кудряш В.И. Электропреобразовательные устройства радиоэлектронных систем. Учебно-методические пособие. - Воронеж: ВВШ МВД РФ, 1997.
5. Аналоговые интегральные микросхемы: Справочник / Кудряшов Б.П., Назаров Ю.В., Тарабрин Б.В. и др. - М.: Радио и связь, 1981. - 61 с.
6. Артамонов Б.И., Бокуняев А.А. Источники электропитания радиоустройств. - М.: Энергоиздат, 1982. - 296 с.
7. Артамонов В.В. Маломощные выпрямители. Основы теории и расчет. - М.: Связь, 1970. - 240 с.
8. Басовский В.Ф. Транзисторные преобразователи. - Киев: Техника, 1974. - 140 с.
9. Белопольский И.И., Репин А.М., Христианов А.С. Стабилизаторы низких и милливольтных напряжений. - М.: Энергия, 1974. - 160 с.
10. Бочаров Л.Н., Жебряков С.К., Колесников И.Ф. Расчет электронных устройств на транзисторах. - М.: Энергия, 1978. - 208 с.
11. Векслер Г.С. Расчет электропитающих устройств. - Киев: Техника, 1978. - 208 с.
12. Векслер Г.С., Штильман В.И. Транзисторные сглаживающие фильтры. - Киев: Техника, 1972. - 208 с.
13. Гурлев Д.С. Справочник по электронным электроприборам. - Киев: Техника, 1979. - 464 с.
14. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. - Л.: Энергия, 1980. - 248 с.
15. Диоды и тиристоры / Чернышев А.А., Иванов В.И., Галахов В.Д. и др. Под общ. ред. А.А. Чернышева. - М.: Энергия, 1980. - 176 с.
16. Додик С.Д. Полупроводниковые стабилизаторы напряжения и тока (с непрерывным регулированием). -М.: Сов. радио, 1980. - 344 с.
17. Ермолин Н.П. Расчет трансформаторов малой мощности. -Л.: Энергия, 1969. - 192 с.
18. Источники электропитания на полупроводниковых приборах: Проектирование и расчет / Под ред. С.Д. Додика, Е.И. Гальперина. - М.: Сов. радио, 1969. - 448 с.
19. Каретникова Е.И., Рычина Т.А., Ермаков А.И. Трансформаторы питания и дроссели фильтров для радиоэлектронной аппаратуры. - М.: Сов. радио, 1973. - 180 с.

20. Китаев В.Е., Бокуняев А.А. Расчет источников электропитания устройств связи. - М.: Связь, 1979. - 216 с.

21. Лавриненко В.Ю. Справочник по полупроводниковым приборам. - Киев: Техника, 1980. - 464 с.

22. Мазель К.Б. Трансформаторы электропитания. - М.: Энергоиздат, 1982. - 80 с.

23. Назаров С.В. Транзисторные стабилизаторы напряжения. -М.: Энергия, 1980. - 96 с.

24. Обеспечение тепловых режимов изделий электронной техники / Чернышев А.А., Иванов В.И., Аксенов А.И. и др. - М.: Энегрия, 1980. - 216 с.

25. Петин Г.П. Транзисторные усилители, генераторы и стабилизаторы. - М.: Энергия, 1978. - 18 с.

26. Полупроводниковые выпрямители / Беркович Е.И., Ковалев В.Н., Ковалев Ф.И. и др. Под ред. Ф.И. Ковалева, Г.П. Мостковой. - М.: Энергия, 1978. - 448 с.

27. Полянин К.П. Интегральные стабилизаторы напряжения. - М.: Энергия, 1979.- 192 с.

28. Проектирование стабилизированных источников электропитания радиоэлектронной аппаратуры / Краулс Л.А., Гейман Г.В., Лапиров-Скобло М.М. и др. - М.: Энергия, 1980. - 288 с.

29. Скрипников Ю.Ф. Радиаторы для полупроводниковых приборов. - М.: Энергия, 1973. - 48 с.

30. Справочник по интегральным микросхемам / Под общ. ред. Б.В. Тарабрина. -М.: Энергия, 1977. - 584 с.

31. Справочник по полупроводниковым диодам / Бородин Б.А., Дроневич В.М., Егорова Р.В. и др. Под ред И.Ф. Николаевского. - М.: Связь, 1979. - 432 с.

32. Стальбовский В.В., Четвертаков И.И., Резисторы. - М.: Сов. радио, 1973. - 64 с.

33. Терещук Р.М., Терещук К.М., Седов С.А. Полупроводниковые приемно-усилительные устройства: Справочник радиолюбителя. - Киев: Наукова Думка, 1981. - 671 с.

34. Транзисторы / Чернышев А.А., Иванов В.И., Галахов В.Д и.др. Под общ. ред. Чернышева А.А. - М.: Энергия, 1980. - 144 с.

35. Шило В.А. Линейные интегральные схемы в радиоэлектронной аппартуре. - М.: Сов. радио, 1979. - 368 с.

36. Штильман В.И. Микроэлектронные стабилизаторы напряжения. - Киев: Техника, 1976. - 168 с.

37. Рогинский В.Ю. Расчет устройств электропитания аппаратуры электросвязи. - М.: Связь, 1972. - 250 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методические указания для выполнения практических и лабораторных работ предназначены для освоения студентами очной и заочной формы обучения направления подготовки 11.03.01 «Радиотехника» (профиль «Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов») и направления подготовки 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» (профиль «Радиоэлектронные системы передачи информации») методики расчета маломощного силового трансформатора. В теоретической части приведена теоретическая и справочная информация по выбору конструкции и используемых материалов для маломощного силового трансформатора.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение……3
1. Разработка силового трансформатора…….....7
1.1. Общие сведения……7
1.2. Порядок расчета маломощного силового трансформатора ……..12
Библиографический список……..…….28
Заключение……..34

Выходные данные

РАЗРАБОТКА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ПОМОЩИ ПАКЕТА ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ МК-10

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

для выполнения практических и лабораторных работ по дисциплинам «Схемотехника аналоговых и электропреобразовательных устройств», «Компьютерное моделирование радиоэлектронных устройств» и «Электропреобразовательные устройства радиоэлектронных средств»[1] для студентов направления подготовки 11.03.01 «Радиотехника» (профиль «Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов») дневной и заочной формы обучения и направления подготовки 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» (профиль «Радиоэлектронные системы передачи информации») дневной формы обучения[1]

Составитель
В.В. Горбатенко

Компьютерный набор В.В. Горбатенко

Подписано к изданию _____
Уч.-изд. л. _____

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп.