

УДК 621.314.632

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ДРОССЕЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Шевцов Д.А., Турченко И.С.*

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

** e-mail: i.s.turchenko.ing@mail.ru*

Предложена новая методика проектирования магнитного ключа на управляемом однообмоточном дросселе насыщения для регулируемых выпрямительных устройств перспективных авиационных систем электроснабжения. При проектировании проводятся конструктивный, энергетический и тепловой расчеты дросселей насыщения, выбор марки магнитопровода и расчет количества витков обмотки. По предложенной методике были рассчитаны параметры управляемых дросселей насыщения, включенных во вторичную цепь силового трансформатора для схемы нового однофазного выпрямительного устройства.

Ключевые слова: методика проектирования, регулируемое выпрямительное устройств, магнитный ключ, однообмоточный дроссель насыщения, магнитомягкие материалы, аморфный сплав, нанокристаллический сплав, прямоугольная петля магнитного гистерезиса.

Введение

Регулируемые выпрямительные устройства (РВУ) являются одними из ключевых функциональных узлов систем электроснабжения современных летательных аппаратов (ЛА) различных типов.

В настоящее время на борту ЛА находят применение тиристорные и транзисторные регулируемые выпрямители. Но стоит заметить, что в реализации задач регулирования и стабилизации электроэнергии полупроводниковым ключам предшествовали магнитные ключи (МК). В технической литературе для названия подобного устройства наряду с термином «магнитный ключ» встречается и термин «дроссель насыщения» (ДН). В настоящее время считается, что МК уже достаточно хорошо изуче-

ны, на тему проектирования таких устройств еще в 60-е—80-е годы было написано множество научных трудов, в частности такими учеными, как Г.С. Найвельт, М.А. Розенблат, В.П. Миловзоров [1—3].

Тем не менее в настоящее время можно по-новому взглянуть на проектирование и применение МК. Это обусловлено разработкой новых полупроводниковых приборов, а также освоением технологии производства высокоэффективных магнитомягких сплавов. Данные предпосылки позволяют пересмотреть энергетические и массогабаритные показатели МК, а также спектр выполняемых ими функций. В то же время подвергаются пересмотру и способы построения цепей управления МК.

Также стоит добавить, что об актуальности исследования подобного класса устройств свидетельствуют факты упоминания их в иностранных научно-технических публикациях. Причем речь идет о разработках и внедрении подобных устройств в системы электроснабжения (СЭС) современных конкурентоспособных ЛА [1—4].

В иностранной литературе особый акцент делается на применении для сердечников МК перспективных аморфных и нанокристаллических магнитомягких сплавов, что приводит к значительному улучшению их электромагнитных характеристик.

При этом преобразовательное устройство на таких магнитных ключах способно сохранить достоинства традиционного аналога-предшественника по сравнению с тиристорными и транзисторными конкурентами, такие, как:

- простота реализации и высокая надежность;
- лучшая электромагнитная совместимость;
- спецстойкость.

В дополнение к вышесказанному можно добавить, что в настоящее время появляется возможность реализовать на МК функцию защиты от аварийных режимов работы устройства.

Традиционные однофазные и трехфазные магнитно-регулируемые выпрямительные устройства (МРВУ) выполнялись на двух- и трехобмоточных МК, содержащих рабочую, управляющую обмотки и иногда дополнительную обмотку смещения. Структуры таких магнитно-регулируемых выпрямительных устройств описаны как в отечественной, так и в зарубежной литературе [1—4].

Авторами предложены новые структуры авиационных МРВУ, в которых в качестве МК применены управляемые однообмоточные дроссели насыщения (ОДН), построенные на магнитопроводах из современных аморфных (либо нанокристаллических) сплавов, обладающих прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ).

Применение в структуре РВУ управляемого ОДН, при сравнении с применением двухобмоточных и трехобмоточных аналогов, позволит построить новый класс устройств, отличающихся повышенной технологичностью, сниженной себестоимостью, улучшенными динамическими характеристиками. Также применение ОДН позволит сделать систему управления преобразователем проще и, следовательно, надежнее.

Надо отметить, что в настоящее время отсутствуют публикации, посвященные методикам проектирования расчета ОДН для данного класса устройств.

Поэтому авторы считают целесообразным предложить свою методику проектирования и расчета

управляемого ОДН для новых предложенных структур РВУ [5, 6].

Предлагаемая методика, которой посвящена настоящая статья, может применяться как для однофазных, так и для многофазных выпрямительных устройств с ОДН, включенными в цепь выпрямителя.

Исходные данные для расчета и проектирования

Исходными данными для проектирования управляемого ОДН служат технические требования к структуре преобразовательного устройства, в составе которого будут применены данные магнитные ключи (табл. 1).

При проектировании ОДН будем учитывать следующие критерии:

- 1) конструктивный — обмотки должны уместиться в окно сердечника;
- 2) тепловой — обмотки и сердечник не должны нагреваться выше температуры, оговоренной в ТУ на выбранные обмоточные провода.

РВУ могут быть запитаны от различных типов систем генерирования электроэнергии, которые могут иметь как стабильную, так и плавающую частоту выходного напряжения. В связи с тем что для разных типов таких систем установлены разные диапазоны изменения напряжений и частот, необходимо провести расчет максимального вольт-секундного интеграла (ВСИ) входного напряжения.

Таблица 1

Основные технические требования к структуре преобразователя на ОДН

Параметр	Описание и единица
$U_{вх\ мин}$	Минимальное действующее значение входного напряжения переменного тока, В
$U_{вх\ макс}$	Максимальное действующее значение входного напряжения переменного тока, В
$f_{\ мин}$	Минимальная частота входного напряжения переменного тока, Гц
$f_{\ макс}$	Максимальная частота входного напряжения переменного тока, Гц
$I_{w\ мин}$	Минимальный ток через ОДН, А
$I_{w\ макс}$	Максимальный ток через ОДН, А
$N_{п}$	Пульсность схемы выпрямления
$U_{н\ ном}$	Номинальное значение напряжения нагрузки, В
$I_{н\ мин}$	Минимальный ток нагрузки, А
$I_{н\ макс}$	Максимальный ток нагрузки, А
$T_{ср\ мин}$	Минимальное значение температуры окружающей среды, °С
$T_{ср\ макс}$	Максимальное значение температуры окружающей среды, °С

Проектирование устройства всегда ведется на худший случай (в том числе на худшее для устройства сочетание параметров входной электроэнергии), поэтому следует так рассчитать параметры ОДН, чтобы устройство сохраняло работоспособность при максимальном ВСИ входного напряжения.

Для оценочного расчета максимального ВСИ необходимы параметры $U_{вх_мин}$, $U_{вх_макс}$, $f_{мин}$, $f_{макс}$, приведенные в табл. 1. Далее для различных сочетаний указанных параметров рассчитываются вольт-секундные интегралы, и среди них определяется максимальный.

В дальнейшем, при проектировании ОДН, будем учитывать те параметры входной сети, которые обеспечивают максимальный ВСИ.

1. Расчет габаритной мощности ОДН

Расчет параметров ОДН начнем с определения его габаритной мощности:

$$P_{г} = U_{макс} I_{w\ макс}, \quad (1)$$

где $U_{макс}$ — максимальное напряжение, подводимое к ОДН, В; $I_{w\ макс}$ — максимальный ток, протекающий через ОДН, А.

Максимальное подводимое к ОДН напряжение вычисляется согласно схемотехнике конкретной структуры преобразователя и связано с параметрами входной сети, обеспечивающими максимальный ВСИ входного напряжения.

Также напряжение на ОДН может быть найдено по формуле

$$U_{макс} = \frac{wS_{ст}K_{ст}\delta B}{\delta t}, \quad (2)$$

где w — количество витков обмотки ОДН;

$S_{ст}$ — площадь поперечного сечения сердечника ОДН, м²;

$K_{ст}$ — коэффициент использования стали сердечника (выбирается в диапазоне 0,7–0,8);

δB — размах изменения магнитной индукции сердечника (примем, что индукция в сердечнике ОДН изменяется от $-B_s$ до $+B_s$, что связано с обеспечением защиты от коротких замыканий), Тл;

δt — время восстановления индукции ОДН до исходной величины (B_p), с.

Следует заметить, что время восстановления δt зависит от структуры РВУ и в максимуме может принимать значение, равное половине периода напряжения сети:

$$\delta t = \frac{T_c}{2}, \quad (3)$$

где T_c — период напряжения сети, соответствующий той частоте f_c , которая обеспечивает максимальный ВСИ питающего напряжения

$$T_c = \frac{1}{f_c}. \quad (4)$$

В соответствии с вышесказанным, размах изменения магнитной индукции сердечника находится как

$$\delta B = 2B_s. \quad (5)$$

Максимальный ток, протекающий через ОДН в нагрузку, может быть найден как

$$I_{w\ макс} = jS_{пр}, \quad (6)$$

где j — плотность тока в обмотке ОДН, А/м²;

$S_{пр}$ — площадь поперечного сечения провода обмотки ОДН, м².

Плотность тока выбираем в соответствии с графиком, представленным на рис. 1. Данный график был сформирован при анализе данных, приводимых разными авторами в специализированной литературе [11–15].

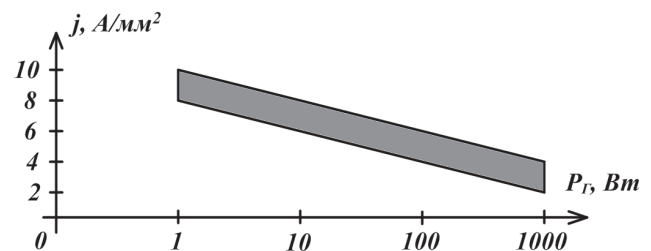


Рис. 1. Выбор плотности тока в обмотке в зависимости от габаритной мощности ОДН

С учетом (2)–(6), выражение (1) принимает вид

$$P_{г} = \frac{wS_{ст}K_{ст}2B_s j S_{пр}}{\frac{T_c}{2}}. \quad (7)$$

С учетом того, что

$$S_{пр} w = S_{окна} K_{окна}, \quad (8)$$

где $S_{окна}$ — площадь поперечного сечения окна кольцевого сердечника, м²; $K_{окна}$ — коэффициент заполнения окна кольцевого сердечника обмоткой (выбирается в диапазоне 0,4–0,7), выражение (7) принимает вид

$$P_{г} = \frac{S_{окна} K_{окна} S_{ст} K_{ст} 2B_s j}{\frac{T_c}{2}}. \quad (9)$$

Учитывая (4), выразим из (9) произведение $S_{ст} S_{окна}$, называемое геометрическим фактором (сердечника ОДН):

$$S_{ст} S_{окна} = \frac{P_{г}}{4B_s j f_c K_{окна} K_{ст}}. \quad (10)$$

2. Выбор марки магнитопровода

Для расчетов и проектирования ОДН потребуются магнитные и физические параметры, которые представлены в табл. 2 и могут быть взяты из технических условий (ТУ) на конкретный тип магнитопровода.

Таблица 2

Магнитные и физические параметры магнитопровода ОДН

Параметр	Описание и размерность
B_s	Индукция насыщения, Тл
$H_{с стат}$	Статическая коэрцитивная сила, А/м
$H_{с дина}$	Динамическая коэрцитивная сила, А/м
$H_{д макс}$	Максимальная динамическая напряженность, А/м
α	Безразмерные коэффициенты, учитываемые при вычислении потерь в магнитопроводе
β	
P_0	Удельные потери в магнитопроводе, Вт/м ³
μ	Относительная магнитная проницаемость материала
$\rho_{серд}$	Плотность материала магнитопровода, кг/м ³

В табл. 3 представлены температурные параметры ОДН, необходимые для проведения теплового расчета.

Следует отметить, что в процессе проектирования должны быть выбраны такие материалы сердечника и изоляции обмоточных проводов, которые допускали бы работу при пониженной температуре $T_{ср мин}$, определяемую в ТЗ и указанную в табл. 1.

Таблица 3

Температурные параметры ОДН

Параметр	Описание и размерность
$T_{с мин}$	Минимальная рабочая температура сердечника, °С
$T_{с макс}$	Максимальная рабочая температура сердечника, °С
$T_{п мин}$	Минимальная рабочая температура провода, °С
$T_{п макс}$	Максимальная рабочая температура провода, °С

Перед тем как приступить к дальнейшим расчетам, стоит оговорить несколько особенностей представления ППГ и выбора материала магнитопровода ОДН.

Во-первых, при выборе магнитопровода нужно обращать внимание на величины B_s и H_c . От индукции насыщения обратно пропорционально зависят габариты сердечника при заданной габаритной мощности, а от коэрцитивной силы прямо пропорционально зависит ток размагничивания ОДН. Поэтому следует выбирать магнитопровод с такой ППГ, чтобы B_s была как можно больше, H_c была как можно меньше.

В-вторых, следует учесть тот факт, что формы петель гистерезиса типонаименованных современных аморфных и нанокристаллических сплавов не являются идеальными (рис. 2) и имеют некий коэффициент отклонения от прямоугольности, заключенный в параметре $K_{п}$ — коэффициенте прямоугольности, который не равен 1, а имеет значение 0,85–0,95 [5].

Разница между значениями B_s и B_r ППГ (рис. 2, б) отражается в значении индуктивности проводящего ОДН, которое определяет падения напряжения на открытом (проводящем) ОДН, а значит, потери на проводимость. Но в модели сердечника, созданной в программе Orcad 9.2 [6], построение ППГ возможно с еще большими искажениями и отклонением от прямоугольности, причем разница $B_s - B_r$ в модели будет больше, нежели в реальном магнитопроводе при фиксированной частоте работы и температуре (рис. 3, а). Данные искажения формы петли обусловлены ограничениями на точность вычислений внутри вычислительного ядра программы, при несоблюдении которых в программе возникает проблема конвергенции и процесс решения прерывается.

Это несоответствие параметров модели реальному образцу магнитопровода качественно выражается в большей разнице $B_s - B_r$, а значит, в завышенных потерях в ОДН в статике (в проводящем состоянии).

Поэтому при выборе магнитопровода для ОДН стоит также обратить внимание на разницу $B_s - B_r$, и выбрать сердечник с меньшим значением этой разности, иначе будет снижена эффективность ОДН.

В-третьих, при работе ОДН на переменном токе необходимо учитывать изменение величины H_c для материала сердечника [5], что должно быть указано производителем в технических условиях (ТУ) на конкретный тип магнитопровода. При увеличении рабочей частоты увеличиваются коэрцитивная сила H_c и динамическая напряженность $H_{д}$, что услов-

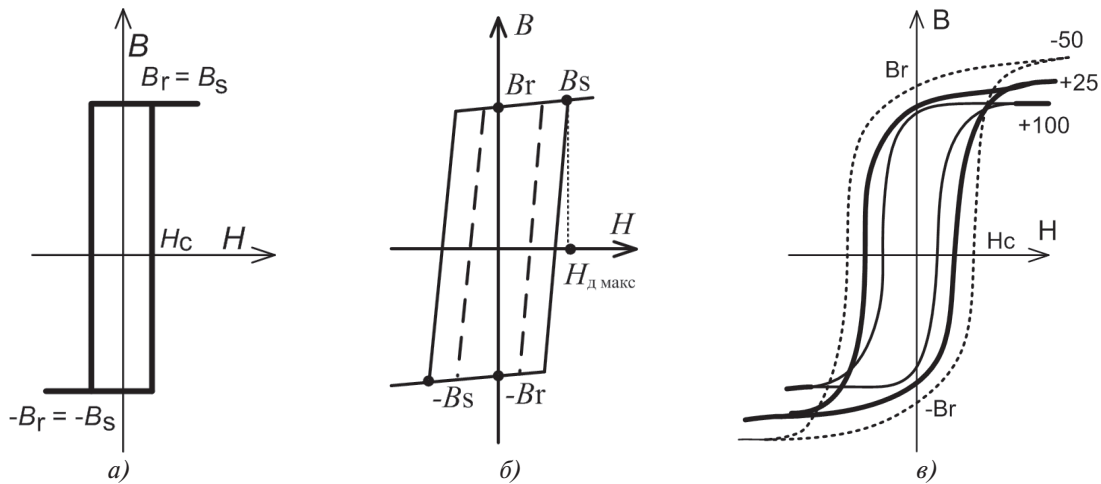


Рис. 2. Прямоугольные петли гистерезиса для магнитопровода ОДН: а — идеальная статическая, с учетом ширины петли; б — деформированная динамическая для различных частот работы; в — деформированная динамическая для различных температур работы

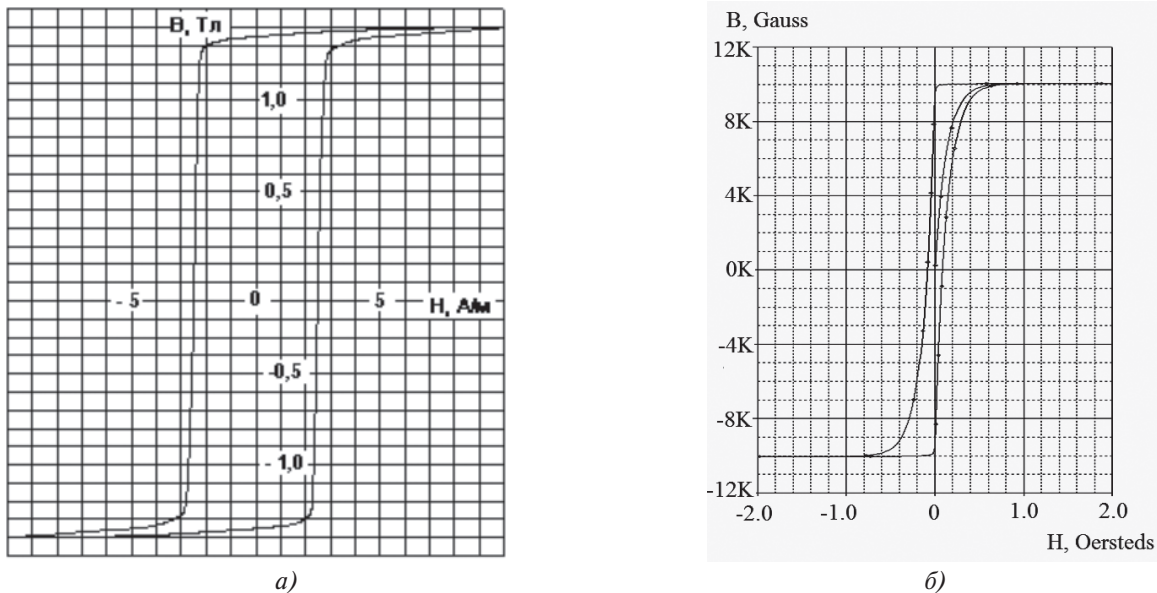


Рис. 3. Прямоугольная петля гистерезиса для магнитопровода ОДН: а — для сердечника ГМ440А ООО НПП «ГАММАМЕТ»; б — ППГ для модели ОДН в программе Orcad 9.2

но показано на рис. 2,б, где пунктиром обозначена ширина базовой петли (при минимальной частоте перемагничивания).

Знать и учитывать изменение напряженности важно при расчете максимального тока управления ОДН и тока холостого хода нагрузки РВУ.

Максимальный ток управления $I_{упр макс}$ при размагничивании ОДН зависит от максимальной динамической напряженности петли гистерезиса $H_{д макс}$ (рис. 2,б):

$$I_{упр макс} = \frac{H_{д макс} l_{ст}}{w}, \tag{11}$$

где $I_{упр макс}$ — максимальный ток управления (размагничивания магнитопровода ОДН), А; $l_{ст}$ — средняя

длина магнитной силовой линии (средняя длина магнитопровода); w — число витков обмотки.

Минимальный ток $I_{н мин}$ нагрузки РВУ — ток холостого хода, который определяется максимальным током намагничивания $I_{μ макс}$ ОДН, зависящим от параметров динамической ППГ, причем

$$I_{μ макс} = I_{упр макс}. \tag{12}$$

Сопротивление холостого хода нагрузки вычисляется как

$$R_{xx} = \frac{U_{н ном}}{I_{μ макс}}, \tag{13}$$

где $U_{н ном}$ — номинальное значение нагрузки.

В связи с тем что современные аморфные и нанокристаллические магнитомягкие сплавы имеют узкую петлю гистерезиса, значение $I_{\mu\text{макс}}$ имеет порядок 10—100 мА. Соответственно для напряжения номиналом 27 В сопротивление резистора холостого хода составляет 27 кОм — 270 Ом. Значение мощности, выделяемой на резисторе холостого хода, имеет порядок 2,7 Вт (при $I_{\mu\text{макс}} = 100$ мА), что будет лишь незначительно снижать КПД всего устройства, поэтому данный резистор можно конструктивно расположить в корпусе РВУ.

В-четвертых, следует отметить, что для любого типа магнитопровода значение индукции насыщения изменяется обратно пропорционально температуре сердечника: так, с ростом температуры значение индукции насыщения снижается. Также с ростом температуры наблюдается снижение коэрцитивной силы. Для каждого типа магнитомягкого материала характерны индивидуальные количественные зависимости изменений параметров от температуры. Кривые таких температурных зависимостей должны приводиться в ТУ на конкретный материал магнитопровода, но, к сожалению, такие данные не всегда предоставляются производителем.

Для довольно грубой оценки зависимости B_s от температуры сердечника T_c возможно применение следующей эмпирически установленной зависимости: для материала с максимальной индукцией порядка 1 Тл на каждые 100°С изменения температуры приходится 0,1—0,15 Тл изменения индукции насыщения, что наглядно показано на рис. 2, в и 4 [9, 10].

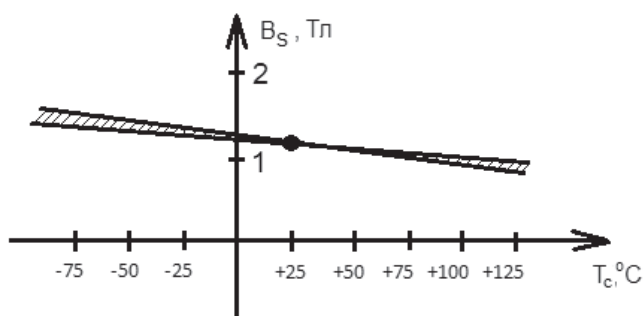


Рис. 4. График зависимости индукции насыщения материала магнитопровода от температуры

Для грамотного проектирования магнитных устройств разработчик должен знать все вышеуказанные изменения ключевых параметров выбранного им сердечника, на что стоит обратить внимание и представителям компаний—изготовителей таких сердечников при создании технической документации на выпускаемую продукцию.

Итак, из справочника или из таблицы, приведенной на сайте производителя, выбираем сердечник с тем значением геометрического фактора $S_{\text{ст}}S_{\text{окна}}$, которое является ближайшим к рассчитанному в (10) большим значением.

Выбрав сердечник, руководствуясь вышеизложенными критериями, получаем для дальнейших расчетов его геометрические параметры (табл. 4, рис. 5).

Таблица 4

Геометрические параметры магнитопровода ОДН

Параметр	Название и единица
D	Внешний диаметр кольца, м
d	Внутренний диаметр кольца, м
h	Высота магнитопровода, м

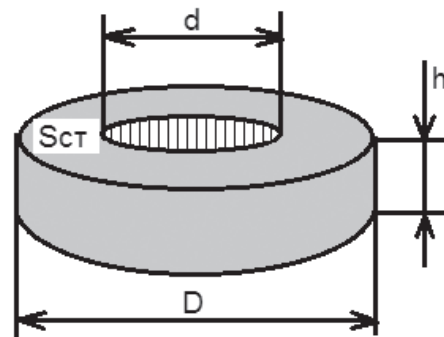


Рис. 5. Геометрические параметры магнитопровода кольцевого типа для ОДН

Далее определяем площадь поперечного сечения кольца, м^2 :

$$S_{\text{ст}} = \frac{(D - d)h}{2}. \tag{14}$$

Определяем площадь окна внутри кольца, м^2 :

$$S_{\text{окна}} = \frac{\pi d^2}{4}. \tag{15}$$

Определяем объем сердечника, м^3 :

$$V_{\text{серд}} = \frac{\pi(D^2 - d^2)h}{4}. \tag{16}$$

Определяем среднюю длину магнитопровода, м:

$$l_{\text{ст}} = \frac{\pi(D + d)}{2}. \tag{17}$$

Определяем длину первого витка обмотки, м:

$$l_0 = D - d + 2h. \tag{18}$$

Определяем массу магнитопровода, кг:

$$m_{\text{м}} = \rho_{\text{серд}} V_{\text{серд}}. \tag{19}$$

3. Определение количества витков обмотки ОДН

Из выражения (2), учитывая (3), (5), (8), находим количество витков:

$$w = \frac{U_{\text{макс}}}{4S_{\text{ст}} K_{\text{ст}} B_s f_c} \quad (20)$$

Полученное значение округляем до целого в большую сторону.

4. Конструктивный расчет

Проводим конструктивный расчет на размещение обмоток в окне выбранного магнитопровода. Для этого вычисляем площадь поперечного сечения провода обмотки:

$$S_{\text{обм}} = \frac{I_{w \text{ д макс}}}{j}, \quad (21)$$

где $I_{w \text{ д макс}}$ — максимальное действующее значение тока через обмотку ОДН, А.

Далее проверяем выполнение неравенства:

$$S_{\text{окна}} > \frac{S_{\text{обм}} w}{K_{\text{окна}}}, \quad (22)$$

где $K_{\text{окна}}$ — коэффициент запаса при заполнении окна сердечника проводами обмотки, выбирается в диапазоне 0,5–0,7.

Если неравенство (22) не выполняется, то следует вернуться к формуле (10) и выбрать следующий больший типоразмер магнитопровода. Также возможно увеличение принятого значения плотности тока j , но при таком подходе нужно будет внимательно оценить нагрев провода, не допуская его перегрева.

5. Энергетический расчет

Рассчитываем потери в магнитопроводе, Вт:

$$P_c = P_0 B_s^\alpha f_c^\beta V_{\text{серд}} \quad (23)$$

Рассчитываем потери в обмотке, Вт:

$$P_{\text{обм}} = I_{\text{макс}}^2 R_w \quad (24)$$

Здесь R_w — активное сопротивление обмоточного провода, Ом:

$$R_w = \rho_m \frac{l_0 w}{S_{\text{пр}}} K_t K_f, \quad (25)$$

где ρ_m — удельное сопротивление меди (при применении медных обмоточных проводов), равное 0,175E-7 Ом·м;

K_t — коэффициент учета возрастания удельного сопротивления магнитного материала с возрастанием температуры окружающей среды, выбирается в диапазоне от 1,1 до 1,2;

K_f — коэффициент учета скин-эффекта и эффекта близости, выбирается в диапазоне от 1,05 до 1,25.

Диапазоны изменения коэффициентов K_t , K_f предлагается выдерживать при частотах перемагничивания ОДН до значений порядка 100 кГц.

Суммарные потери в ОДН могут быть найдены, как

$$P_\Sigma = P_c + P_{\text{обм}} \quad (26)$$

6. Тепловой расчет

Целью теплового расчета является выявление факта перегрева обмотки и магнитопровода ОДН. Рассчитаем максимальную температуру ОДН

$$T_{\text{макс}} = T_{\text{ср макс}} + P_\Sigma R_t, \quad (27)$$

где R_t — тепловое сопротивление металл — окружающая среда, Ом:

$$R_t = \frac{1}{\alpha_{\text{охл}} S_{\text{охл}}}, \quad (28)$$

где $\alpha_{\text{охл}}$ — коэффициент охлаждения, зависит от способа охлаждения: естественное или принудительное;

$S_{\text{охл}}$ — площадь поверхности, с которой отводится тепло, м².

Для ОДН, выполненного на магнитопроводе кольцевого типа, $S_{\text{охл}}$ рассчитывается согласно следующей формуле:

$$S_{\text{охл}} = \frac{\pi D^2}{4} 2 + \pi Dh. \quad (29)$$

Далее проверяем выполнение неравенств

$$T_{\text{макс}} < T_{\text{п макс}}; \quad (30)$$

$$T_{\text{макс}} < T_{\text{с макс}}. \quad (31)$$

Если неравенства (30) и (31) не выполняются, то в формуле (10) следует либо снизить принятое значение плотности тока в обмоточном проводе j , либо снизить индукцию насыщения B_s .

Что касается диапазона изменений коэффициентов $K_{\text{ст}}$, $K_{\text{окна}}$, K_t , K_f , то они предлагаются нами на основании анализа данных, приводимых в литературе [11–15].

Пример проектирования МК по предложенной методике

По предложенной методике были рассчитаны ОДН для схемы однофазного выпрямительного устройства, включенные во вторичную цепь силового трансформатора [16].

Схема модели рассматриваемой структуры представлена на рис. 6. Регулирование выходного напря-

согласно ГОСТ Р 54073-2010 [17]. Напряжение нагрузки стабилизируется на уровне 27 В. Мощность нагрузки зададим равной 500 Вт. Напряжение, прикладываемое к ОДН, составляет 27 В, ток, пропускаемый ОДН, равен току нагрузки, габаритная мощность ОДН составляет 500 Вт. В качестве магнитопровода ОДН выбираем ГМ440А производства ООО НПП «Гаммамет» [7], габаритами 50/40/10

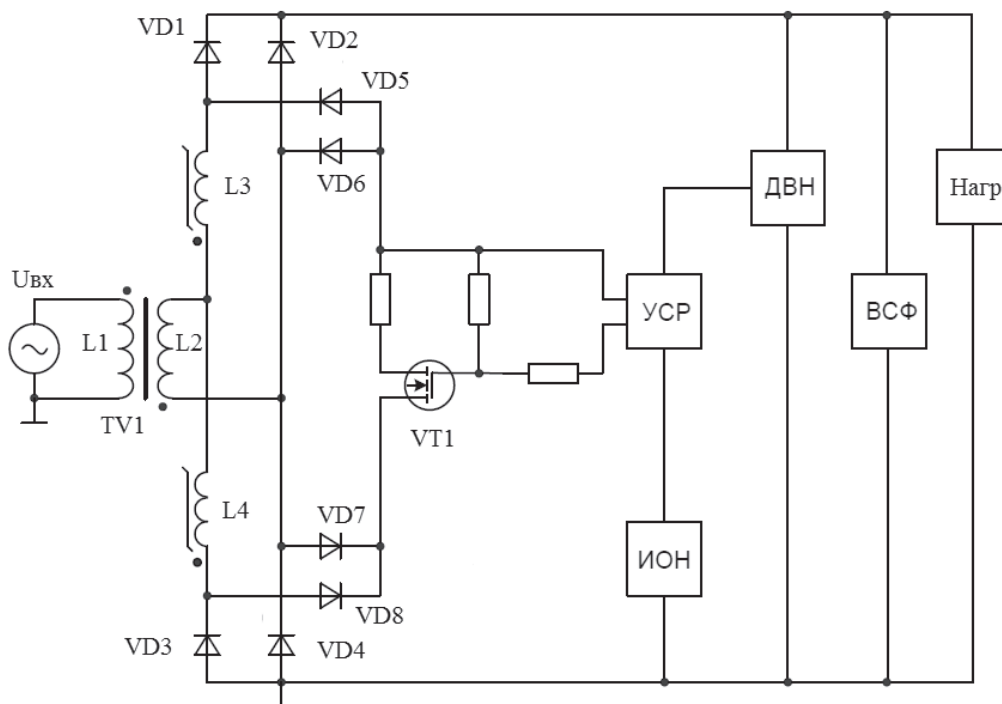


Рис. 6. Однофазное РВУ на ОДН, включенных во вторичную цепь трансформатора

жение обеспечивается размагничиванием однообмоточных дросселей насыщения L3, L4, включенных во вторичную цепь силового трансформатора. Действующее значение фазного напряжения питания в номинале составляет 115 В, частота 400 Гц

(внешний диаметр/ внутренний диаметр/ высота). Охлаждение ОДН примем как естественное при температуре окружающей среды 60°C. Рассчитанные параметры ОДН приведены в табл. 5, где m_{Σ} — суммарная масса двух ОДН (сердечников и обмоток); $P_{\Sigma 2}$ — суммарные потери в двух ОДН.

Таблица 5

Результаты расчета ОДН для схемы однофазного РВУ

Параметр	Значение
P_r , Вт	500
w	40
m_m , кг	0,052
m_c , кг	0,02
m_{Σ} , кг	0,144
P_c , Вт	0,05
$P_{обм}$, Вт	2,45
$P_{\Sigma 2}$, Вт	5,9
$T_{макс}$, °C	71,3

Выводы

Авторы предложили свою методику расчета и проектирования управляемого однообмоточного дросселя насыщения для авиационных регулируемых выпрямительных устройств нового поколения.

Построение выпрямительного устройства на современных магнитных ключах позволит получить следующие преимущества перед тиристорными и транзисторными конкурентами:

- простоту реализации и высокую надежность;
- лучшую электромагнитную совместимость (благодаря меньшему уровню излучаемых помех и лучшей помехозащищенности);
- спецстойкость.

Проектирование ОДН по предлагаемой методике ведется по конструктивному и тепловому критериям.

Данная методика является универсальной, ее можно применять при проектировании как трансформаторных, так и бестрансформаторных однофазных и многофазных выпрямителей, работающих на частоте питающего напряжения.

Библиографический список

1. *Найвельт Г.С., Мазель К.Б., Хусаинов Ч.И.* др. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Под ред. Найвельта Г.С. — М.: Радио и связь, 1985. — 576 с.
2. *Розенблат М.А.* Магнитные усилители с самонасыщением. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1963. — 128 с.
3. *Миловзоров В.П.* Электромагнитные устройства автоматики. — М.: Высшая школа, 1983. — 408 с.
4. *Austrin L.* On Magnetic Amplifiers in Aircraft Applications / Royal Institute of Technology Electromagnetic Engineering, Stockholm, Sweden, 2007, — 98 p.
5. *Шевцов Д.А., Турченко И.С.* Однообмоточные дроссели насыщения в авиационных источниках вторичного электропитания // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. №3. С. 145—153.
6. *Шевцов Д.А., Турченко И.С.* Структуры магнитно-регулируемых выпрямителей для перспективных авиационных систем электроснабжения // Труды МАИ, Электронный журнал, №76, 2014, ссылка: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=50092> (дата обращения 10.09.14).
7. Магнитопроводы из аморфных и нанокристаллических сплавов ООО НПП ГАММАМЕТ. www.gammamet.ru Дата обращения 20.07.2014.
8. *Шевцов Д. А., Крючков В.В., Манбеков Д.Р.* Создание нелинейной модели магнитного сердечника // Практическая силовая электроника. 2009. №4 (36). С. 49—51.
9. Аморфные магнитомягкие сплавы и их применение в источниках вторичного электропитания: Справочное пособие / Под ред. В.И. Хандогина. — М.: ВНИИ, 1990. — 171 с.
10. *Стародубцев Ю.Н., Белозеров В.Я.* Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов. — Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2002. — 384 с.
11. *Бальян Р.Х.* Трансформаторы малой мощности. — Л.: Судпромгиз, 1961. — 372 с.
12. *Бальян Р.Х.* Трансформаторы для радиоэлектроники. — М.: Советское радио, 1971. — 581 с.
13. *Белопольский И.И., Пикалова Л.Г.* Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. — Л.—М.: Госэнергоиздат, 1963. — 273 с.
14. *Бертинов А.И., Кофман Д.Б.* Торoidalные трансформаторы статических преобразователей. — М.: Энергия, 1970. — 96 с.
15. *Горский А.Н., Русин Ю.С., Иванов Н.Р., Сергеева Л.А.* Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания. — М.: Радио и связь, 1988. — 176 с.
16. *Шевцов Д.А., Турченко И.С.* Стабилизированный источник электропитания. Патент на полезную модель RU 135204 U1. Бюлл. №33 от 27.11.2013.
17. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. ГОСТ Р 54073-2010. — М.: Стандартинформ, 2011. — 40 с.

A DESIGN METHODOLOGY OF CONTROLLABLE INDUCTORS FOR NEW GENERATION OF AVIATION RECTIFYING UNITS

Shevtsov D.A., Turchenko I.S.*

Moscow Aviation Institute (National Research University),
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia
* e-mail: i.s.turchenko.ing@mail.ru

Abstract

Regulated rectifying units are the key functional units of power supply systems for different types of modern aircrafts.

At present thyristor and transistor controlled rectifiers are used on board an aircraft. However it should be noted that magnetic switches (MSs) preceded

implementation of semiconductor switches used for electric power regulation and stabilization.

Highly efficient soft magnetic alloys development allows reconsideration of MS's energy and size efficiency indexes as well as their functional area spectrum.

The relevance of such class of devices studying is clearly indicated by the facts of their mentioning in foreign scientific and technical publications.

The foreign sources discuss design and implementation problems of such devices for modern and competitive aircraft power supply systems.

Special emphasis is made on application of advanced soft magnetic amorphous and nanocrystalline alloys for cores of MSs, which leads to a significant improvement of their electromagnetic properties.

New converter unit based on such magnetic switches is able to preserve the best features of its traditional prototype predecessor, in comparison with thyristor and transistor competitors, such as:

- ease of implementation;
- higher reliability;
- better electromagnetic compatibility;
- resistibility to special factors effect.

The authors have proposed new structures of aviation magnetic-regulated rectifying units (MRRUs), based on controllable single-winding saturable inductors based on modern amorphous (or nanocrystalline) alloys cores with rectangular hysteresis loop.

At present, there are no publications concerning engineering philosophy and design methods for this class of devices. Thus, the authors consider it expedient to offer their own methodology of design and estimation of controllable single-winding saturable inductors for proposed new MRRU structures.

The proposed method is universal and broad-based for transformer and transformer-less single-phase and multi-phase rectifiers.

Keywords: design methodology, regulated rectifying unit, magnetic switch, single-winding saturable inductor, soft magnetic materials, amorphous alloy, nanocrystalline alloy, rectangular hysteresis loop.

References

1. Naivel't G.S., Mazel' K.B., Khusainov Ch.I., Zatikyan G.P., Sharov L.N., Kuznetsov S.A., Alekseev V.A., Kiselev L.M., Tihonov V.I., Shuvaev Y.N. *Istochniki elektropitaniya radioelektronnoi apparatury* (Power supplies for radio and electronic equipment), Moscow, Radio i svyaz', 1985, 576 p.
2. Rozenblat M.A. *Magnitnye usiliteli s samonasyshcheniem* (Self-saturated magnetic amplifiers), Moscow - Leningrad, Gosenergoizdat, 1963, 128 p.
3. Milovzorov V.P. *Elektromagnitnye ustroystva avtomatiki* (Electromagnetic devices for automatics), Moscow, Vysshaya shkola, 1983, 408 p.
4. Austrin L. On Magnetic Amplifiers in Aircraft Applications. *Royal Institute of Technology Electromagnetic Engineering*, Stockholm, Sweden, 2007, 98 p.
5. Shevtsov D.A., Turchenko I.S. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2013, vol. 20, no. 3, pp. 145-153.
6. Shevtsov D.A., Turchenko I.S. *Elektronnyi zhurnal «Trudy MAI»*, 2014, no. 76, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/eng/published.php?ID=50092> (accessed 10.09.14).
7. *Magnitoprovody iz amorfnykh i nanokristallicheskikh splavov GAMMAMET. OOO NPP GAMMAMET.* www.gammamet.ru (accessed 20.07.2014).
8. Shevtsov D.A., Kryuchkov V.V., Manbekov D.R. *Prakticheskaya silovaya elektronika*, 2009, no. 4 (36), pp. 49 - 51.
9. Khandogin V.I. *Amorfnye magnitomyagkie splavy i ikh primeneniye v istochnikakh vtorichnogo elektropitaniya* (Amorphous soft magnetic alloys in secondary power supplies), Moscow, VNII, 1990, 171 p.
10. Starodubtsev Yu.N., Belozero V.Ya. *Magnitnye svoystva amorfnykh i nanokristallicheskikh splavov* (Magnetic properties of amorphous and nanocrystalline alloys), Ekaterinburg, Ural'skii universitet, 2002, 384 p.
11. Bal'yan R.Kh. *Transformatory maloi moshchnosti* (Low-power transformers), Leningrad, Sudpromgiz, 1961, 372 p.
12. Bal'yan R.Kh. *Transformatory dlya radioelektroniki* (Transformers for radio electronics), Moscow, Sovetskoe radio, 1971, 581 p.
13. Belopol'skii I.I., Pikalova L.G. *Raschet transformatorov i drosslei maloi moshchnosti* (Design of low-power transformers and inductors), Leningrad—Moscow, Gosenergoizdat, 1963, 273 p.
14. Bertinov A.I., Kofman D.B. *Toroidal'nye transformatory staticheskikh preobrazovatelei* (Toroidal transformers for static converters), Moscow, Energiya, 1970, 96 p.
15. Gorskii A.N., Rusin Yu.S., Ivanov N.R., Sergeeva L.A. *Raschet elektromagnitnykh elementov istochnikov vtorichnogo elektropitaniya* (Design of electromagnetic elements of secondary power supplies), Moscow, Radio i svyaz', 1988, 176 p.
16. Shevtsov D.A., Turchenko I.S. *Patent RU 135204 U1*, 27.11.2013.
17. *Sistemy elektrosnabzheniya samoletov i vertoletov. Obshchie trebovaniya i normy kachestva elektroenergii, GOST R 54073-2010* (Systems of power supply for aircrafts and helicopters, General requirements and quality standards of electric energy, State Standard 54073-2010), Moscow, Standarty, 2011, 40 p.