
УДК 621.314.632

Структуры магнитно-регулируемых выпрямителей для перспективных авиационных систем электроснабжения

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*

Аннотация

Предложены новые схемотехнические решения трехфазных магнитно-регулируемых выпрямительных устройств на основе управляемых однообмоточных дросселей насыщения для традиционных и перспективных авиационных систем электроснабжения. Особый акцент делается на то, что для сердечников магнитных ключей на дросселях насыщения предлагается использовать современные магнитомягкие аморфные и нанокристаллические сплавы, обладающие определенными преимуществами перед традиционными магнитными материалами для аналогичных применений. В статье представлены графики регулировочных характеристик предложенных структур при различных токах управления магнитными ключами. Приведены и проанализированы результаты моделирования предложенной структуры трехфазного магнитно-регулируемого выпрямителя с LC-выходным сглаживающим

фильтром в переходных, установившихся и аварийных режимах. На основе результатов имитационно-компьютерного моделирования показано, что управляемый однообмоточный дроссель насыщения, включенный во вторичную цепь выпрямителя способен регулировать выходное напряжение устройства и обеспечивать защиту от коротких замыканий нагрузки при применении LC-сглаживающего фильтра. Подчеркивается целесообразность применения предложенной структуры устройства для перспективных авиационных систем электроснабжения.

Ключевые слова: регулируемое выпрямительное устройство, стабилизированное выпрямительное устройство, быстродействующий магнитный ключ, однообмоточный дроссель насыщения, системы электроснабжения летательных аппаратов, короткое замыкание нагрузки.

Введение

Трехфазные стабилизированные (регулируемые) выпрямительные устройства (СВУ или РВУ) являются одними из ключевых преобразовательных узлов систем электроснабжения современных высоконадежных летательных аппаратов (ЛА).

Такие устройства преобразуют первичную энергию, вырабатываемую генератором в трехфазную сеть переменного тока постоянной или переменной частоты, в энергию, питающую бортовые потребители,

критичные к качеству питающей энергосети, стабилизированным напряжением постоянного тока с низким коэффициентом пульсаций. При всех допустимых переходных, установившихся и аварийных диапазонах изменения величины питающего напряжения, а также при изменении тока нагрузки в требуемых пределах, выходное напряжение СВУ должно оставаться стабильным и отвечающим заданной величине.

Задача обеспечения регулирования выходного напряжения имеет разные схемотехнические варианты решения, которые возможно реализовать применением как полупроводниковых (транзисторных и тиристорных), так и магнитных ключей (в частности, быстродействующих однообмоточных).

Современные системы электроснабжения (СЭС) летательных аппаратов характеризуются широким применением транзисторных и тиристорных устройств преобразования и регулирования электроэнергии. Данные устройства на первый взгляд, могут характеризоваться лучшими, по сравнению с традиционными магнитными аналогами, массогабаритными показателями, но в тоже время более чувствительны к внешним помехам, имеют высокий уровень излучаемых помех, а также сложные структуры силовой части и схемы управления, снижающие надежность устройства.

В то же время, на фоне интенсивного развития технологий производства высокоэффективных магнитомягких сплавов, освоенных и развиваемых отечественными производителями, актуализируется потребность пересмотреть традиционный подход к проектированию магнитно-

регулируемых устройств, как особого класса высоконадежной авиационной преобразовательной техники. В частности, вопрос проектирования перспективного авиационного стабилизированного выпрямительного устройства, отвечающего современным требованиям по надежности и электромагнитной совместимости, может быть решен с использованием новых принципов построения и новых схемотехнических решений магнитно-регулирующего узла.

Реализация новых схемотехнических решений авиационных магнитно-регулируемых выпрямительных устройств (МРВУ) на базе быстродействующих магнитных ключей (БМК), сердечники которых выполнены из перспективных магнитомягких материалов, позволит сохранить в новом устройстве достоинства его традиционных предшественников, такие как простота реализации и высокая надежность, низкий уровень излучаемых помех, а также получить новые улучшенные массогабаритные и энергетические показатели [1, 2].

Аморфные и нанокристаллические сплавы, представленные на примере продукции отечественных производителей (например, «Гаммамет» [3, 4]) имеют значительно меньшие удельные потери на перемагничивание, вихревые токи и магнитную вязкость, по сравнению с электротехнической сталью, пермаллоями и ферритами [5]. Также новые материалы имеют высокий коэффициент прямоугольности петли магнитного гистерезиса (при этом петля магнитного гистерезиса является более узкой и более

стабильной при повышении рабочей частоты), обладают высокой начальной и максимальной относительной магнитной проницаемостью.

Логично заключить, что применение технологий аморфных и нанокристаллических сплавов позволит построить БМК с высокими эксплуатационными параметрами и обеспечивать такие преимущества, как уменьшенные вес и объем, повышенная стабильность свойств, расширенный температурный диапазон (-60°C до $+155^{\circ}\text{C}$), повышенный КПД, а также значительно больший коэффициент усиления (равный 1000 и более) по сравнению с сердечниками из традиционных магнитных материалов.

Новые предложенные структуры трехфазных регулируемых выпрямительных устройств на однообмоточных дросселях насыщения.

При проектировании магнитно-регулируемого устройства важно отметить тот факт, что магнитные ключи могут быть включены как в первичную, так и во вторичную цепи выпрямителя. При этом, традиционные трехфазные МРВУ выполнялись на магнитных усилителях, которые выполнялись на двух- и трехобмоточных дросселях насыщения, содержащих отдельные рабочую, управляющую обмотки и иногда дополнительную обмотку смещения [6, 7, 8].

Новые предложенные авторами структуры МРВУ (которые, в частности, могут быть выполнены стабилизируемыми) отражают новые подходы к построению магнитно-регулируемых бортовых устройств, заключающиеся в следующем:

- 1) применены быстродействующие магнитные ключи на однообмоточных дросселях насыщения (ОДН), построенных на современных магнитомягких материалах с ППГ;
- 2) разработано простое схемотехническое решение схемы управления размагничиванием ОДН.

Управляемый однообмоточный дроссель насыщения работает следующим образом: когда сердечник насыщен, его сопротивление стремится к нулю, когда не насыщен – к бесконечности [9].

Петля гистерезиса такого дросселя выбирается как можно более прямоугольной, для того, чтобы минимизировать и потери на намагничивание и размагничивание (вертикальный участок петли) и проводимость (горизонтальный участок петли).

Сердечник такого дросселя насыщается самостоятельно под действием сетевого переменного напряжения питания, и когда насыщается, проводит ток. Запертое состояние ОДН обеспечивается размагничиванием сердечника под действием внешнего напряжения управления. При этом процессы намагничивания и размагничивания осуществляются по одной и той же обмотке, но сдвинуты во времени: когда напряжение питания

меняет полярность, магнитный ключ перестает проводить ток, и рабочая точка петли гистерезиса возвращается из области насыщения в начальную. Эта особенность требует реализацию ДН на сердечнике из магнитомягкого материала, имеющего прямоугольную петлю магнитного гистерезиса (ППГ), варианты представления которой изображены на рис.1. Малая ширина ППГ таких магнитных сплавов позволяет построить БМК с коэффициентом усиления 1000 и более, что, в частности, позволит обеспечить работоспособность ОДН на холостом ходу при малых токах нагрузки.

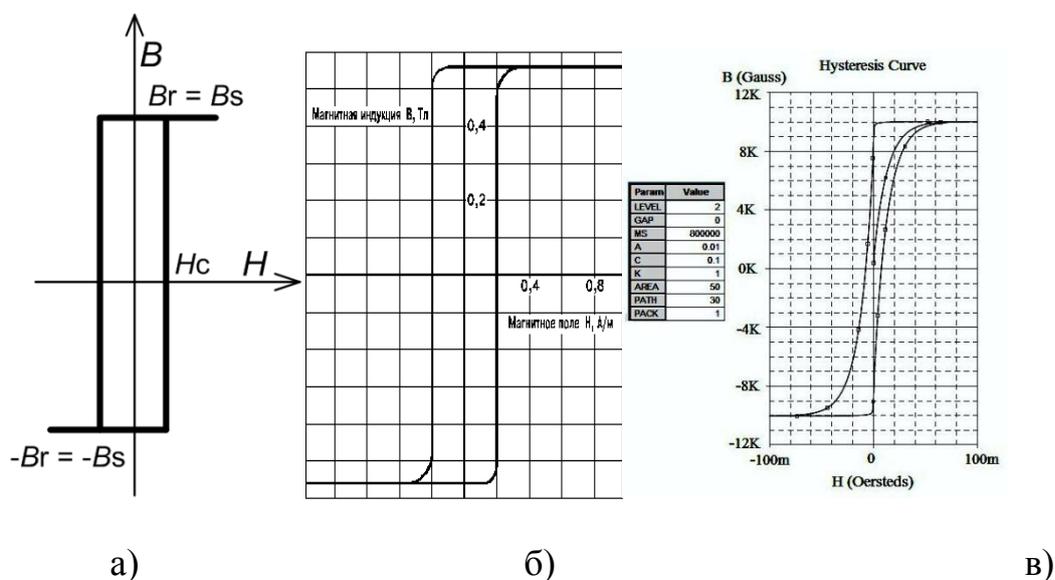
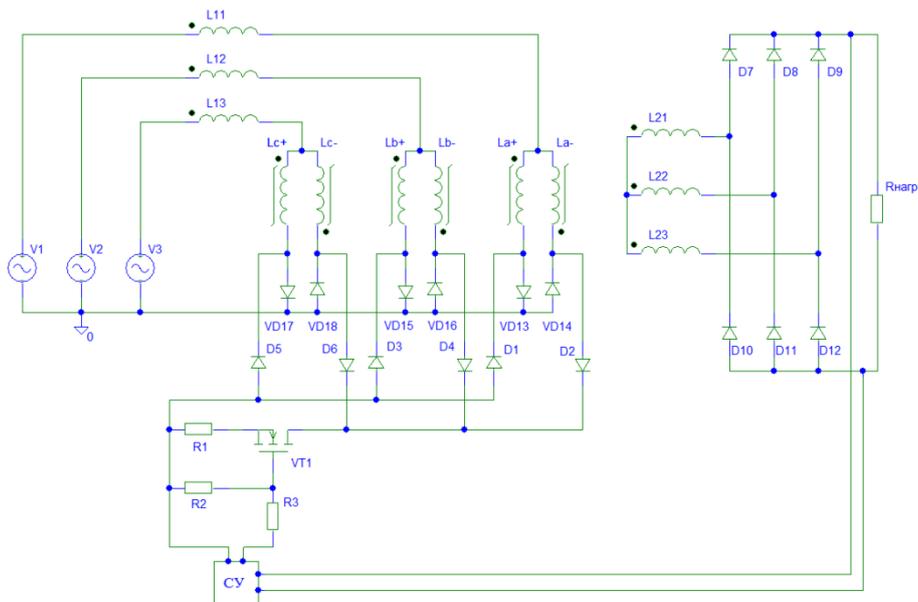
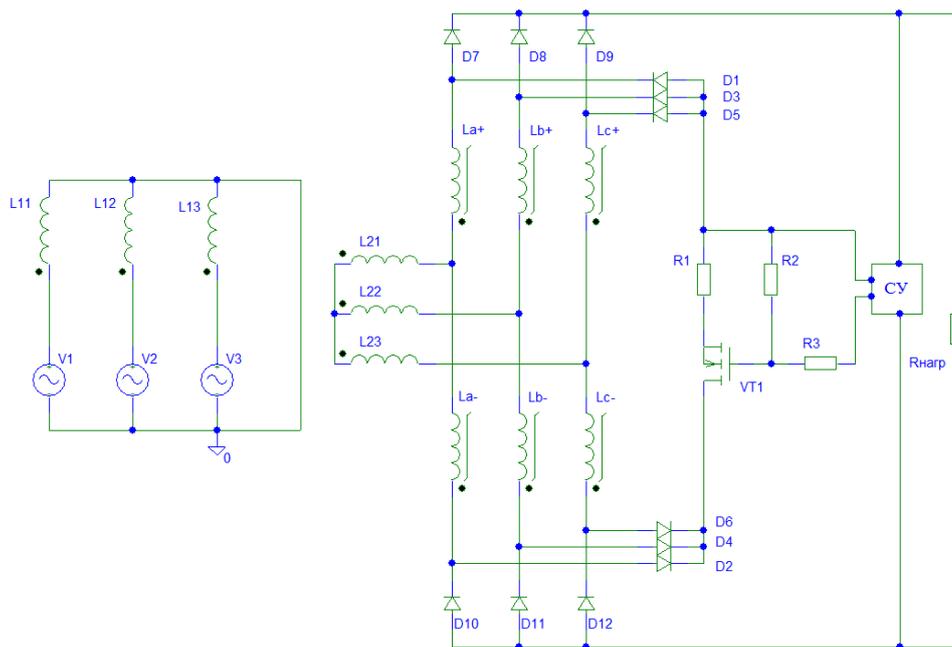


Рис.1. Статическая прямоугольная петля гистерезиса сердечника ОДН: а) приближенная (идеальная, конечной ширины); б) петля гистерезиса материала ГМ 503А («ГАММАМЕТ»); в) модель ППГ в программе OrCAD 9.2

Ниже представлены новые схемы трехфазных выпрямителей, в каждой из которых выходное напряжение регулируется при помощи однообмоточных дросселей насыщения, работающих в первичной (рис.2а) и вторичной (рис.2б) цепях МРВУ. На входе МРВУ предполагается первичная авиационная 3х-фазного напряжения переменного тока постоянной или переменной частоты [10]. На выходе устройства формируется стабилизированное напряжение постоянного тока номиналом 27 В.



a)



б)

Рис.2. Схемы трехфазных МРВУ: а) на ОДН, расположенных в первичной цепи выпрямителя; б) на ОДН, расположенных во вторичной цепи выпрямителя.

Схема, представленная на рис.2а, содержит: источники однофазных напряжений переменного тока $V1, V2, V3$, имитирующие трехфазную сеть с заземленной нейтралью; трансформатор $TV1$, представленный первичными $L11, L12, L13$ и вторичными $L21, L22, L23$ обмотками; однообмоточные дроссели насыщения: $La+, La-, Lb+, Lb-, Lc+, Lc-$; рабочие диоды (диоды выпрямителя) $VD7-VD1$; силовые разделительные диоды $VD13-VD18$; управляющие диоды (разделительные диоды) $VD1-VD6$, нагрузочный резистор $R_{нагр}$.

Схема, представленная на рис.2б, содержит: источники однофазных напряжений переменного тока $V1, V2, V3$, имитирующие трехфазную сеть с заземленной нейтралью; трансформатор $TV1$, представленный первичными $L11, L12, L13$ и вторичными $L21, L22, L23$ обмотками; однообмоточные дроссели насыщения: $La+, La-, Lb+, Lb-, Lc+, Lc-$; рабочие диоды (диоды выпрямителя) $VD7-VD1$; управляющие диоды (разделительные диоды) $VD1-VD6$, нагрузочный резистор $R_{нагр}$.

Предложенные структуры обладают следующими общими особенностями:

- в качестве магнитного ключа применяется управляемый быстродействующий однообмоточный дроссель насыщения, который, при сравнении с двухобмоточным вариантом, является более быстродействующим и, следовательно, обладает лучшими динамическими свойствами при работе в переходных режимах;
- посредством ОДН возможно регулировать выходное напряжение PBU в широких пределах (от сотен мВ до 27В);
- процессы размагничивания всех дросселей насыщения схемы обеспечиваются одним управляющим элементом (УЭ), который может быть выполнен на биполярном, БПТИЗ-, МДП-, МОП-транзисторе;
- поскольку для аморфных и нанокристаллических магнитомягких сплавов петля магнитного гистерезиса является узкой и прямоугольной (коэффициент прямоугольности более 0,9), то величина напряженности насыщения сердечника является относительно маленькой (в отличие от

напряженности насыщения традиционных магнитомягких материалов), следовательно, будет относительно мал и ток размагничивания ОДН (составляет порядка десятков мА), что позволяет судить о низкой мощности потерь на управление в УЭ;

- фронты изменения тока через ОДН относительно плавные, что уменьшает уровень излучаемых помех;

Стоит заметить, что схема, представленная на рис.2а, выгодна для многоканальных МРВУ, т.к. позволяет регулировать напряжение всех выходных каналов одновременно через всего один УЭ. Но при этом необходимо учесть тот факт, что при такой структуре управления ОДН нельзя сделать прецизионными все выходные каналы устройства.

Для одноканальных МРВУ энергетически выгодна схема, представленная на рис. 2б, т.к. она реализуется при использовании меньшего количества силовых диодов, чем в предыдущей схеме, и, как следствие, имеет меньшие потери мощности и меньший вес и габариты (ведь уменьшение потерь в устройстве уменьшает габариты радиатора). Также, в данной схеме возможно связать СУ с «землей» вторичной цепи, в то время как в предыдущей схеме необходимо иметь дополнительный узел гальванической развязки в СУ, что вызывает усложнение структуры.

В дальнейшем мы будем рассматривать подробнее структуру МРВУ с ОДН во вторичной цепи, так как ее применение в авиационных системах электроснабжения выглядит более целесообразным в силу

массогабаритных и энергетических показателей. Рассмотрим принцип работы данной схемы и проведем моделирование ее рабочих и аварийных режимов.

В предлагаемой схеме МРВУ, модель которой представлена на рис.1б, используется 6-пульсное выпрямительное звено, в которое включены 6 быстродействующих магнитных ключей (ОДН), которые обеспечивают регулирование положительных и отрицательных рабочих токов трехфазного силового трансформатора.

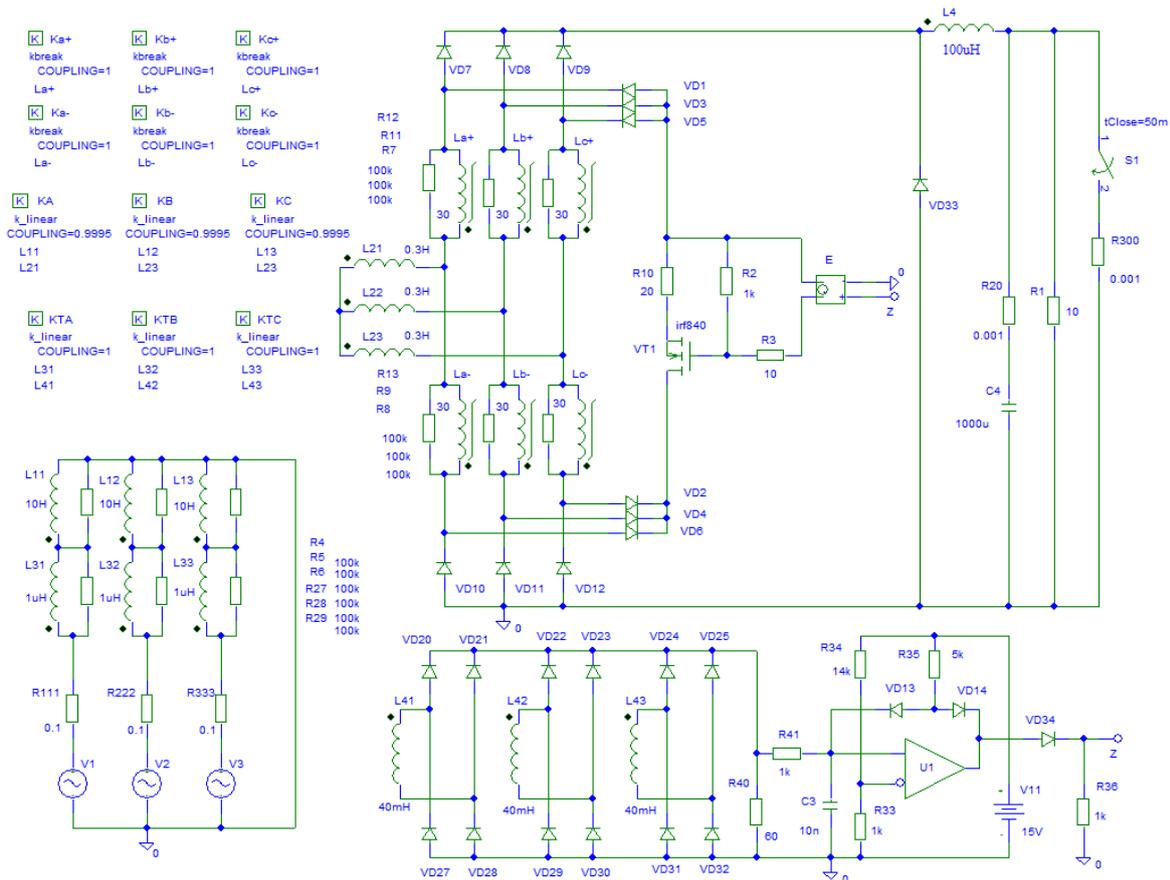


Рис. 3. Схема имитационно-компьютерной модели трехфазного 6-пульсного РВУ на ОДН во вторичной цепи силового трансформатора.

Модель трехфазного РВУ с 6-пульсным выпрямителем (3Ф6П-МРВУ) с магнитными ключами (ОДН) во вторичной цепи трансформатора, представленная на рис.3, содержит: источники однофазных напряжений переменного тока V_1, V_2, V_3 , имитирующие трехфазную сеть с заземленной нейтралью; трансформатор TV1 (на сердечниках КА, КВ, КС), представленный первичными L11, L12, L13 и вторичными L21, L22, L23 обмотками; однообмоточные дроссели насыщения $La+, La-, Lb+, Lb-, Lc+, Lc-$; диоды выпрямительного звена VD1–VD6; управляющие диоды D7 – D12 (разделительные диоды); управляющий элемент VT1; резистор ограничения тока управления R1; драйвер E транзистора VT1; выходной сглаживающий LC-фильтр на дросселе постоянного тока L4 и конденсаторе C4, нагрузочный резистор R1.

Для исследования аварийных режимов модель МРВУ содержит блок защиты (БЗ) и ключ S1, замыкающий нагрузку на резистор с сопротивлением 0.01 Ом, что в 1000 раз превышает номинальный ток нагрузки данной модели. При отключенном регуляторе, накопившийся ток в дросселе ВСФ замыкается через диод VD33.

На рис.3 блок защиты (БЗ) представлен трансформаторным датчиком тока (ТДТ) и триггером на операционном усилителе U1, диодах VD13-VD14 и резисторах R33-R35. ТДТ состоит из трансформатора TV2 (на сердечниках

КТА, КТВ, КТС) с обмотками L31, L32, L33 (первичные) и L41, L42, L43 (вторичные), выпрямителя, выполненного на диодах VD20-VD32, и резистора R40.

Модель сердечника дросселя ОДН задавалась с использованием элемента «Kbreak», являющегося стандартным в библиотеке программы OrCad 9.2 [11]. Петля гистерезиса модели сердечника ОДН приведена на рис.1б).

Модель сердечника трансформатора задавалась с использованием элемента «K_linear», являющегося стандартным элементом библиотеки.

Исследование переходных, установившихся и аварийных режимов в модели схемы, приведенной на рис.3, проводилось при следующих параметрах элементов: число витков ОДН равняется 30, активное сопротивление нагрузки равняется 10 Ом, индуктивность дросселя постоянного тока ВСФ равняется 100мкГн, емкость конденсатора ВСФ равняется 1000мкФ.

В модели, схема которой показана на рис.3, режимом работы обоих ОДН управляет МДП-транзистор VT1. Транзистор VT1 подключается ко всем дросселям насыщения через дополнительные развязывающие диоды VD7 – VD12, при этом VT1 работает в активной области как управляемый источник тока. Все внутренние объединяющие контуры управления дросселей каждой фазы соединены параллельно через один транзистор, поэтому управление всеми 6-ю дросселями насыщения (их

размагничивание) осуществляться одним и тем же током, величиной которого управляет всего один УЭ.

При работе на переменном напряжении с некой частотой, петля гистерезиса динамически расширяется. При этом максимальный требуемый ток управления размагничиванием ОДН будет зависеть от максимальной напряженности динамической петли гистерезиса сердечника ОДН.

$$i_{\text{упр треб макс}} = \frac{Hd_{\text{макс}}l}{w}, \quad (1)$$

где l – средняя длина магнитной силовой линии;

w – число витков обмотки.

$Hd_{\text{макс}}$ – максимальная напряженность с учетом расширения петли гистерезиса при работе на переменном токе.

Как уже было отмечено в [5], поскольку значение $Hd_{\text{макс}}$ у аморфных сплавов очень мало, то управляющий ток также будет мал (десятки мА). При этом потери в управляющем транзисторе будут относительно невелики.

Устройство 3Ф6П-МРВУ с ОДН во вторичной цепи трансформатора работает следующим образом.

Входной трехфазный источник питания 3Ф6П-МРВУ представлен тремя однофазными источниками V1–V3. Трехфазное напряжение источников

V1–V3 поступает на первичные обмотки L11– L13 силового трансформатора TV1, который обеспечивает изменение уровня напряжения и гальваническую развязку входных и выходных цепей МРВУ. Из вторичных обмоток L21 – L23 силового трансформатора ток течет через однообмоточные дроссели насыщения La+, La–, Lb+, Lb–, Lc+, Lc– и диоды VD7 – VD12 мостового выпрямителя через выходной сглаживающий LC-фильтр (L4 и C4) в нагрузку R1.

Рабочие полупериоды ОДН совпадают с периодами пропускания тока соответствующими диодами выпрямительного звена. Управляющие полупериоды работы ОДН совпадают с периодами непроводящего состояния диодов выпрямителя. Так, полупериод питающего напряжения, соответствующий проводящему состоянию диода VD7, является рабочим для дросселя La+. Полупериод, соответствующий непроводящему состоянию VD7, является управляющим для La+.

Например, источник напряжения V1 имитирует фазу А трехфазной сети, тогда источник V2 будет фазой В, напряжение которой сдвинуто и будет отставать во времени относительно напряжения фазы А на угол в 120 градусов, а источник V3 будет фазой С, напряжение которой сдвинуто и будет опережать во времени напряжение фазы А на угол в 120 градусов (рис.2).

Напряжение фазы А будет приложено к обмотке L11, напряжение фазы В будет приложено к обмотке L12, а напряжение фазы С будет приложено к обмотке L13.

В установившемся режиме работы, в интервале времени t_1-t_2 напряжение фазы А положительно и преобладает над напряжением фазы С, в отрицательной области преобладает напряжение фазы В. Ток в интервале t_1-t_2 вытекающий из обмотки L23 положителен, после насыщения L_{c+} , проходит через открытый диод VD9 в нагрузку, далее возвращается через диод VD11 и L_{b-} в обмотку L22 (ток обмотки L22 отрицателен). Далее к моменту времени t_3 положительное напряжение фазы А достигает своего максимума, в отрицательной области в это время значения напряжений фаз В и С становятся равны. Ток в интервале t_2-t_3 положителен в обмотке L21 и после насыщения L_{a+} протекает через ВСФ в нагрузку и далее через диод VD11 и L_{b-} в обмотку L22 (ток обмотки L22 отрицателен). Далее в интервале t_3-t_4 ток проводят диоды VD7 и VD12, дроссели L_{a+} и L_{c-} , и контур протекания тока замыкается через обмотку L23 и так далее.

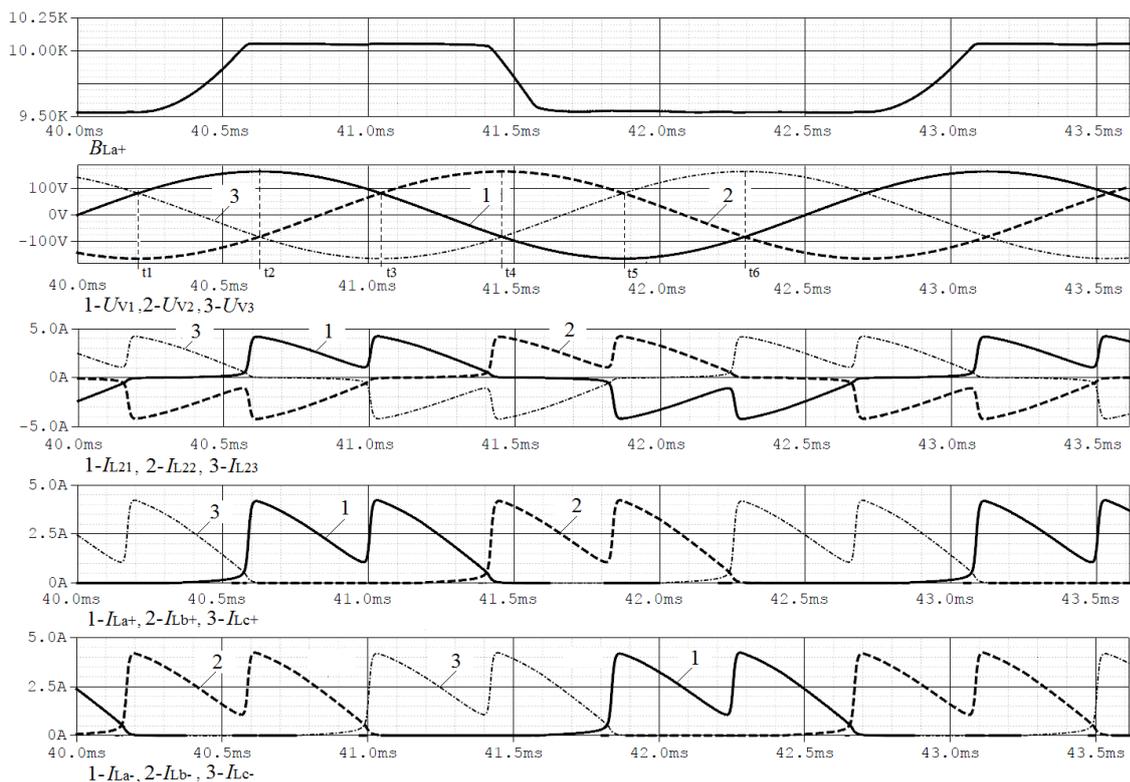


Рис.4. Графики процессов в модели 3ФБП-МРВУ с ОДН во вторичной цепи трансформатора в установившемся режиме работы

На интервале t_4 – t_6 , являющемся управляющим для $La+$, необходимо размагнитить его сердечник до уровня индукции B_{x1} рис.3 Другими словами необходимо «возвратить» рабочую точку в первоначальное положение на петле гистерезиса. При этом, размагничивание $La+$ производится через управляющий транзистор $VT1$ на интервале t_4 – t_5 по контуру: $VT1 - R10 - VD1 - La+ - L21 - L22 - Lb- - VD4 - VT1$ и на интервале t_5 – t_6 по контуру: $VT1 - R10 - VD1 - La+ - L21 - L23 - Lc- - VD2 - VT1$ (причем на интервале t_4 – t_5 также размагничивается $Lb-$, а на

интервале t_5-t_6 размагничивается L_c). По аналогии размагничиваются остальные дроссели насыщения.

Регулировочная характеристика 3Ф6П-МРВУ с ОДН во вторичной цепи трансформатора

Как уже было сказано в [5], разным токам управления ОДН соответствуют разные циклы его перемагничивания, при этом различаются и времена пропускания им силового тока, а значит, меняются величины тока и напряжения нагрузки (при условии постоянства нагрузки). Так разным временам включения ОДН соответствуют разные токи нагрузки.

На рис.5 представлена регулировочная характеристика МРВУ, связывающая выходной ток с током управления. При снятии данной характеристики, номинальный ток нагрузки устанавливался равным 30А (при $R_{нагр} = 1 \text{ Ом}$), а также учитывался LC-выходной фильтр ($L_4 = 100\text{мкГн}$, $C_4 = 1000\text{мкФ}$).

Исследование показало, что для перекрытия всего диапазона тока нагрузки от 0 до порядка 30А достаточно тока управления, значение которого лежит в интервале от 0 до порядка десятков мА(!) при использовании современных аморфных и нанокристаллических магнитных материалов с прямоугольной петлей гистерезиса [5].

По результатам проведенного моделирования построена регулировочная характеристика устройства, отражающая зависимость тока нагрузки ($I_{нагр}$) от различных токов управления ($I_{упр}$) (рис.5).



Рис.5. Регулировочная характеристика модели 3Ф6П-МРВУ с ОДН во вторичной цепи, с LC-фильтром

Исследование модели 3Ф6П-МРВУ с ОДН во вторичной цепи трансформатора в переходном режиме работы

На рис.6 приведены графики процессов в 3Ф6П-МРВУ с ОДН во вторичной цепи в переходном режиме (при выходе на номинальный режим работы) с LC-фильтром. Показаны диаграммы изменения индукции B_{La+} в сердечнике дросселя $La+$, напряжения нагрузки U_{R1} , тока вторичной обмотки трансформатора (одной из фаз) I_{L23} .

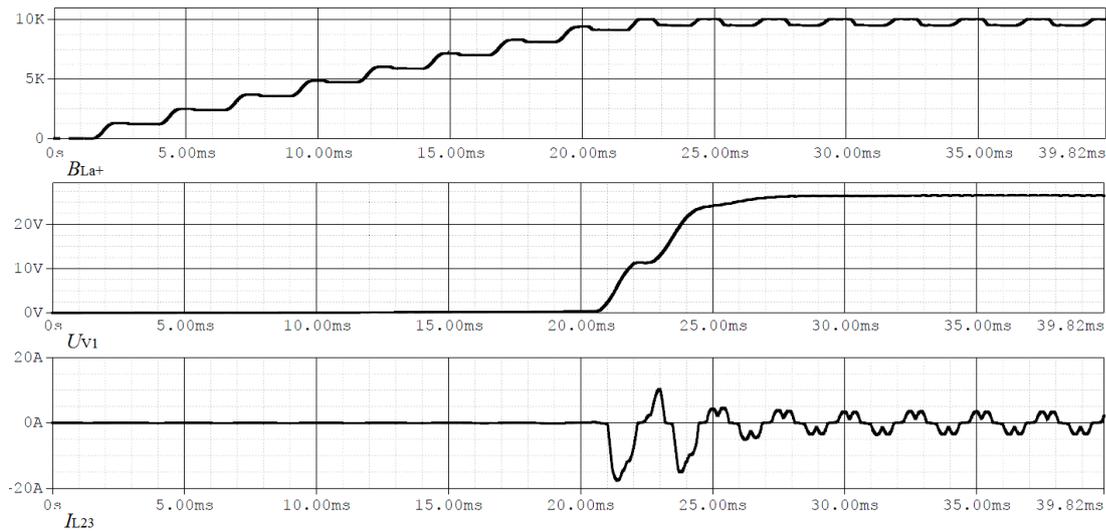


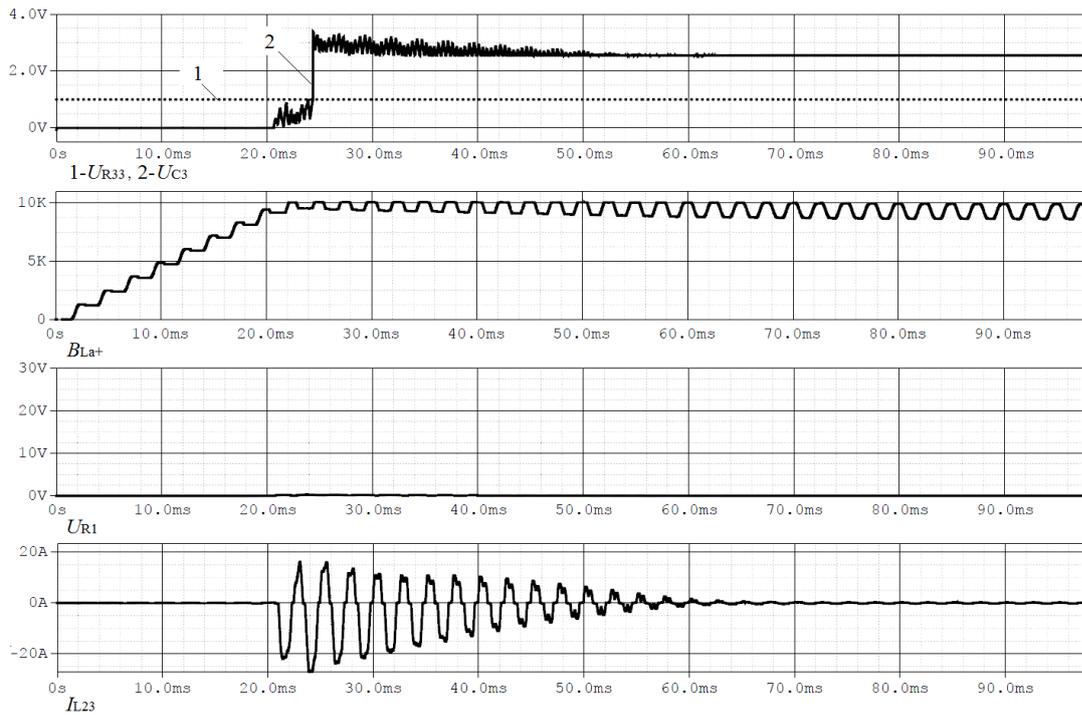
Рис.6. Графики процессов в модели 3Ф6П-МРВУ с ОДН во вторичной цепи, с LC-фильтром, в переходном режиме работы

Защита от аварийных режимов 3Ф6П-МРВУ с ОДН во вторичной цепи трансформатора с LC-фильтром

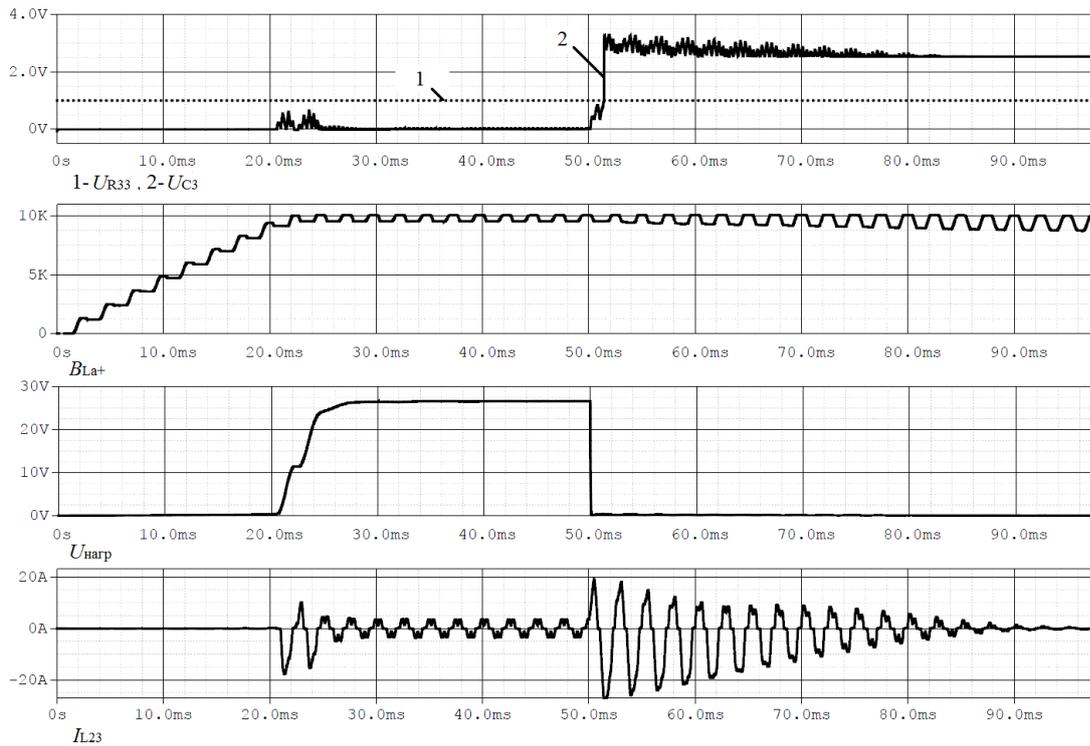
Как было отмечено в [12], однообмоточные дроссели насыщения, при включении во вторичную цепь выпрямителя, способны обеспечивать защиту от коротких замыканий (КЗ) нагрузки. Для моделирования аварийных режимов трехфазного 6-ти пульсного РВУ на ОДН с ОДН во вторичной цепи трансформатора использовалась схема, представленная на рис.3. Короткое замыкание нагрузки имитируется включением ключа S1. При этом включение S1 при режиме включения на короткозамкнутую нагрузку происходило в момент времени 0мс. В режиме короткого замыкания нагрузки в установившемся режиме работы включение S1 происходило в момент времени, равный 50мс.

При возникновении тока короткого замыкания, ТДТ выдает сигнал, который через усилитель сигнала рассогласования $U1$ поступает на управляющий элемент $VT1$, выходной ток которого обеспечивает размагничивание дросселей, находящихся в управляющем режиме. Далее с наступлением рабочего режима, размагниченные ОДН не успевают намагнититься для того, чтобы открывшись, пропустить через себя в нагрузку весь силовой ток, а пропускает только малую его часть, тем самым обеспечивая защиту силовой цепи от протекания тока короткого замыкания.

На рис. 7 представлены графики изменения во времени тока вторичной обмотки трансформатора $TV1$ при: а) включении на короткозамкнутую нагрузку при работающем БЗ (схема на рис.3); б) при коротком замыкании уже работающей нагрузки при работающем БЗ (схема на рис.3) в установившемся режиме работы.



a)



б)

Рис. 7. Результаты моделирования защиты от аварийных режимов работы 3Ф6П-МРВУ с ОДН во вторичной цепи, с LC-фильтром при: а) включении

на короткозамкнутую нагрузку; б) при коротком замыкании нагрузки в установившемся режиме работы. На рис.7 показано, что при включении на короткозамкнутую нагрузку (а) и при коротком замыкании нагрузки (б), ток вторичной обмотки TV1 ограничен на уровне и снижается до нуля. Следовательно, демонстрируется способность ОДН, включенных в цепь вторичной обмотки силового трансформатора, обеспечивать защиту 3Ф6П-МРВУ с LC-фильтром при данных аварийных режимах коротких замыканий цепей нагрузки.

Выводы

Задача регулирования выходного напряжения бортовых выпрямителей имеет разные схемотехнические варианты решения, которые возможно реализовать применением как полупроводниковых (транзисторных и тиристорных), так и магнитных ключей (в частности, быстродействующих однообмоточных).

В статье рассматривались предложенные авторами новые структуры трехфазных 6-пульсных магнитно-регулируемых выпрямителей, которые отражают новые подходы к построению магнитно-регулируемых бортовых устройств, заключающиеся в следующем:

- 1) в применении быстродействующих магнитных ключей на однообмоточных дросселях насыщения, построенных на современных магнитомягких материалах с ППГ;

2) в разработке простого схемотехнического решения схемы управления размагничиванием ОДН.

Современные магнитные аморфные и нанокристаллические сплавы обладают высокими эксплуатационными параметрами и имеют значительные преимущества перед традиционными с точки зрения энергетики, массы, габаритов, температурной стабильности магнитных свойств, температурного диапазона работы. Малая ширина ППГ таких магнитных сплавов позволяет построить БМК с коэффициентом усиления 1000, что, в частности, позволит обеспечить работоспособность магнитного регулятора на холостом ходу.

Из предложенных авторами структур, более предпочтительной для авиационного применения выглядит схема трехфазного МРВУ с ОДН во вторичной цепи выпрямителя, более выгодная по массо-габаритным и энергетическим показателям, нежели структура с ОДН в первичной цепи.

В статье дается описание принципа работы нового трехфазного 6-пульсного МРВУ на однообмоточных дросселях насыщения во вторичной цепи и приводится его регулировочная характеристика. Показано, что ток размагничивания ОДН составляет порядка 10 мА при токе намагничивания в десятки А.

Проведенные исследования подтверждают, что ОДН, включенные в вторичную цепь выпрямителя, способны регулировать выходное напряжение трехфазного МРВУ с LC-ВСФ, а также способны

обеспечивать защиту силовой цепи при аварийных режимах включения на короткозамкнутую нагрузку и при коротком замыкании нагрузки в установившемся режиме работы.

В частности, МРВУ может быть выполнено стабилизируемым, и, в силу высокой надежности и низкого уровня излучаемых помех, востребовано в традиционных и перспективных СЭС летательных аппаратов, обеспечивая питание потребителей стабильным постоянным напряжением номиналом 27В.

Библиографический список:

1. Austrin L., Krah J.H., Engdahl G. A Modeling Approach of a Magnetic Amplifier. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Proc. of the International Conference of Magnetism (ICM 2003), May 2004, pp. E1709–E1710.
2. Austrin L. On Magnetic Amplifiers in Aircraft Applications. Royal Institute of Technology Electromagnetic Engineering, Stockholm, Sweden, 2007, – 98 pages.
3. Стародубцев Ю.Н., Белозеров В.Я. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов.– Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2002, – 384 с.
4. Стародубцев Ю.Н., Белозеров В.Я. Аморфные металлические материалы. // *Силовая электроника*, №2, 2009, с. 86 – 89.

5. Шевцов Д.А., Турченко И.С. Однообмоточные дроссели насыщения в авиационных источниках вторичного электропитания // Вестник Московского авиационного института, №3 т.20, 2013, с.145 – 153.
6. Розенблат М.А. Магнитные усилители с самонасыщением. – Москва–Ленинград: Госэнергоиздат,1963, – 128 с.
7. Миловзоров В.П. Электромагнитные устройства автоматики.– Москва: Высшая школа, 1983, – 408 с.
8. Найвельт Г.С., Мазель К.Б., Хусаинов Ч.И. др. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры. Справочник под ред. Найвельта Г.С. – Москва: Радио и связь, 1985, – 576 с.
9. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. ГОСТ Р 54073-2010, – Москва: Стандартиформ, 2011, – 40 с.
10. Хруслов Л.Л. Магнитные ключи в многоканальных источниках питания. // Электропитание, №2, 1992, с. 47 – 57.
11. Шевцов Д. А., Крючков В.В., Манбеков Д.Р. Создание нелинейной модели магнитного сердечника // Практическая силовая электроника, №4 (36), 2009, с.49 – 51.
12. Шевцов Д.А., Турченко И.С. Моделирование рабочих и аварийных режимов в регулируемом выпрямительном устройстве на основе управляемого однообмоточного дросселя насыщения // Практическая силовая электроника, №4 (52), 2013, с.39 – 42.