

Рис. 1. Реализация траектории управляемого движения ЛА вблизи морской поверхности

Иллюстративный материал к статье А.Ю. Княжского, А.В. Небылова  
«Оптимизация продольного и бокового движения летательного аппарата  
вблизи неровной поверхности по критерию минимума средней геометрической высоты полета»

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

### СОДЕРЖАНИЕ БОРТОВАЯ И НАЗЕМНАЯ АППАРАТУРА КОМПЛЕКСОВ УПРАВЛЕНИЯ

Сафина И.А., Сабитов А.Ф., Гаркушенко В.И.  
Идентификация номинальных динамических характеристик авиационных датчиков температуры газовых потоков ..... 3

### СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, СТАБИЛИЗАЦИИ, НАВИГАЦИИ, ОРИЕНТАЦИИ И НАВЕДЕНИЯ

Скуднева О.В.  
Лабораторный стенд для отладки программно-математического обеспечения и контроля технических характеристик инерциальных навигационных систем летательных аппаратов ..... 13

Быковский А.В.  
Коррекция курса при выставке бесплатформенной инерциальной навигационной системы ..... 23

Княжский А.Ю., Небылов А.В.  
Оптимизация продольного и бокового движения летательного аппарата вблизи неровной поверхности по критерию минимума средней геометрической высоты полета ..... 28

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ И ПРИБОРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Резников С.Б., Харченко И.А., Храмцов К.Н., Жегов Н.А.  
Резервно-аккумуляторный источник бесперебойного питания для авиакосмических транспортных электроэнергетических комплексов ..... 37

Хандорин М.М., Букреев В.Г.,  
Экспериментальная проверка алгоритма оценки остаточной емкости литий-ионной аккумуляторной батареи для применения на космическом аппарате ..... 45

Правила оформления статей ..... 56

Учредители и издатели журнала:  
ООО Издательство «НАУЧТЕХЛИТИЗДАТ»  
ООО «САТАГЕ»

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-9355

Подписной индекс ОАО «Роспечать» 81187

Подписной индекс «Пресса России» 44038

Главный редактор:

д-р техн. наук, проф. Т.Г. Самхарадзе

РЕДАКЦИЯ: Е.А. Боброва, В.Б. Гончарова

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Бабиченко А.В. – д-р техн. наук, проф.

Галиев А.Л. – д-р техн. наук, проф.

Громов Ю.Ю. – д-р техн. наук, проф.

Джанджава Г.И. – д-р техн. наук, проф.

Дидрих В.Е. – д-р техн. наук, проф.

Зольников В.К. – д-р техн. наук, проф.

Коновалов С.Ф. – д-р техн. наук, проф.

Матвеев В.А. – д-р техн. наук, проф.

Михайлов Ю.Б. – д-р техн. наук

Нартов Б.К. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Небылов А.В. – д-р техн. наук, проф.

Орехов М.И. – д-р техн. наук, проф.

Охтилев М.Ю. – д-р техн. наук, проф.

Пешехонов В.Г. – д-р техн. наук, проф., акад. РАН

Пиралишвили Ш.А. – д-р техн. наук, проф.

Реутов В.Г. – д-р техн. наук, проф.

Романов А.А. – д-р техн. наук

Рыбин В.М. – д-р техн. наук, проф.

Скрыль С.В. – д-р техн. наук, проф.

Сыров А.С. – д-р техн. наук, проф.

Хачумов В.М. – д-р техн. наук, проф.

Щербаков Н.С. – д-р техн. наук, проф.

*Опубликованные статьи реферированы в реферативных журналах ВИНТИ РАН.*

*Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются.*

*Публикация статей бесплатная. Правом внеочередной публикации пользуются аспиранты и докторанты*

Материалы, опубликованные в настоящем журнале, не могут быть полностью или частично воспроизведены, тиражированы и распространены без письменного разрешения редакции.

При перепечатке отдельных частей статей ссылка обязательна.

Подписано в печать 07.03.2017 г.

Формат 66×88 1/8, бумага офсетная.

Печать офсетная.

Усл.-печ. л. 9. Уч.-изд. л. 10.8. Заказ № 1075.

Тираж 1 200 экз.

Адрес редакции:

107258, Москва, Алымов пер., д. 17, корп. 2.

Тел.: 8 (499) 168-21-28, 8 (499) 168-04-95, 8 (916) 008-20-70

Факс: 8 (499) 168-23-58. Бухгалтерия: 8 (499) 168-24-28.

E-mail: [aviakosmos@mail.ru](mailto:aviakosmos@mail.ru),

<http://www.tgizd.ru/aviakos.html>

Оригинал-макет, электронная версия подготовлены

ООО Издательство «Научтехлитиздат»

Отпечатано в ООО Издательство «Научтехлитиздат»

107258, Москва, Алымов пер., д. 17, стр. 2.

# AEROSPACE INSTRUMENT-MAKING

## № 3/2017

ISSN: 2073-0020

MONTHLY SCIENTIFIC JOURNAL

### CONTENTS

#### AIRBORNE AND GROUND EQUIPMENT CONTROL COMPLEXES

- Safina I.A., Sabitov A.F., Garkushenko V.I.**  
Identification of nominal dynamic  
characteristics gas temperature  
sensors of aircraft ..... 4

#### CONTROL, STABILIZING, NAVIGATION, ORIENTATION AND AIMING SYSTEMS

- Skudneva O.V.**  
Laboratory installation  
for debugging mathematical software  
and control the technical characteristics  
of inertial navigation systems of aircraft ..... 14
- Bykovsky A.V.**  
Course correction during alignment  
of the strapdown inertial  
navigation system ..... 23
- Knyazhsky A.Y., Nebylov A.V.**  
Optimization of longitudinal  
and lateral motion  
of vehicle near disturbed surface ..... 28

#### ENERGY AND SPACE COMPLEX INSTRUMENTATION

- Reznikov S.B., Kharchenko I.A.,  
Khramtsov K.N., Jegov N.A.**  
Backup-rechargeable  
source of power for the aerospace  
vehicle power systems ..... 37
- Khandorin M.M., Bukreev V.G.**  
Experimental verification  
of lithium-ion battery residual  
capacity estimation algorithm  
for application in spacecraft ..... 45
- Rules of Reviewing and Publication of Papers 58

**Founder and Publisher:**

**Ltd. the Publishing House «Naughtehlitizdat»  
LLC «SATAGE»**

*The journal is registered with the Ministry of Press,  
Television, Radio and Mass Communication of the  
Russian Federation*

*Certificate of print media registration № 77-9355*

*Subscription numbers the public corporation «Rospechat»  
81187*

*Subscription numbers «Pressa Rossii» 44038*

**Editor-in-chief, Doctor of Technical Science, Professor  
T.G. SAMKHARADZE**

Editorial staff: **E.A. Bobrova, V.B. Goncharova**

EDITORIAL BOARD:

- Babichenko A.V.** – Doctor of Technical Sciences, Professor  
**Galiev A.L.** – Doctor of Technical Sciences, Professor  
**Gromov Yu.Yu.** – Doctor of Technical Sciences, Professor  
**Dzhandzhgava G.I.** – Doctor of Technical Sciences, Professor  
**Didrikh V.E.** – Doctor of Technical Sciences, Professor  
**Zolnikov V.K.** – Doctor of Technical Sciences, Professor  
**Kononov S.F.** – Doctor of Technical Sciences, Professor  
**Matveev V.A.** – Doctor of Technical Sciences, Professor  
**Mihaylov Yu.B.** – Doctor of Technical Sciences  
**Nartov B.K.** – Candidate of Technical Sciences, Associate  
Professor  
**Nebylov A.V.** – Doctor of Technical Sciences, Professor  
**Orehov M.I.** – Doctor of Technical Sciences, Professor  
**Okhtilev M.Iu.** – Doctor of Technical Sciences, Professor  
**Peshchonov V.G.** – Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Academician of the RAS  
**Piralishvili Sh.A.** – Doctor of Technical Sciences, Professor  
**Reutov V.G.** – Doctor of Technical Sciences, Professor  
**Romanov A.A.** – Doctor of Technical Sciences  
**Rybin V.M.** – Doctor of Technical Sciences, Professor  
**Skryl' S.V.** – Doctor of Technical Sciences, Professor  
**Syrova A.S.** – Doctor of Technical Sciences, Professor  
**Khachumov V.M.** – Doctor of Technical Sciences, Professor  
**Shcherbakov N.S.** – Doctor of Technical Sciences, Professor

Sent to the press 07.03.17.

Format: 60×88 1/8. Text magazine paper. Offset printing.  
14,3 conventional printer's sheets, 32,1 conventional ink mileages  
19,2 conventional publisher's signatures. The order № 1075.  
Circulation: 2 700 copies.

✉ Editorial office address:

107258, Moscow, Alymov pereulok, 17, bldg 2.

☎ Phone: (916) 008-20-70; (499) 168-04-95,

Fax: (499) 168-23-58.

The accounting department: (499) 168-13-69.

✉ E-mail: aviakosmos\_@mail.ru

<http://www.tgizd.ru>

The layout and the electronic version of the journal are made by Ltd. the  
Publishing House «Naughtehlitizdat»

Printed in Ltd. the Publishing House «Naughtehlitizdat»  
107258, Moscow, Alymov pereulok, 17, bldg. 2.

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ И ПРИБОРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

---

## РЕЗЕРВНО-АККУМУЛЯТОРНЫЙ ИСТОЧНИК БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ ДЛЯ АВИАКОСМИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

**С.Б. Резников**, доктор техн. наук, профессор

ФГБОУВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

**И.А. Харченко**, канд. техн. наук, доцент

ФГБУ «ЦНИИИ ИВ» Минобороны России

**К.Н. Храмцов**, аспирант

ФГБОУВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

**Н.А. Жегов**, ведущий инженер

МОКБ «Марс»

E-mail: mrkhrantsov@gmail.com

*Предлагается нетрадиционное схемотехническое решение для многофункционального вторичного источника электропитания (ВИЭП): резервно-аккумуляторного источника бесперебойного питания (ИБП), предназначенного для авиакосмических транспортных электроэнергетических комплексов (ЭКК), в частности – для полностью электрифицированных самолетов (ПЭС). Решение件годно для реализации модульно-масштабируемой архитектуры ЭЭК на базе параллельных унифицированных модулей, позволяющих повысить производственную, монтажную и эксплуатационно-ремонтную технологичность, снизить трудозатраты и простои транспорта и повысить надежность ЭЭК. Решение защищено приоритетом РФ и представляет интерес для широкого круга специалистов в области силовой электроники ЛА и других транспортных ЭЭК..*

**Ключевые слова:** ИБП, электроснабжение, полностью электрифицированный самолет.

## BACKUP-RECHARGEABLE SOURCE OF POWER FOR THE AEROSPACE VEHICLE POWER SYSTEMS

**S.B. Reznikov**, Doctor of Techn. Sciences, Professor  
Moscow aviation institute

**I.A. Kharchenko**, Cand. of Techn. Sciences, Associate Professor  
«Central Research and Development Testing Institute of the Engineering Troops  
of the Ministry of Defense of the Russian Federation»

**K.N. Khramtsov**, Postgraduate Student  
Moscow aviation institute

**N.A. Jegov**, Lead Engineer  
MEDB «MARS»

E-mail: mrkhrantsov@gmail.com

*This article reviews offers an alternative engineering solution for multifunction secondary power source (SPS): backup battery of the uninterruptible power supply (UPS) designed for aerospace vehicle power systems (AVPS), in particular for all-electric aircraft (AEA). The solution is suitable to implement modular and scalable architecture of AVPS on the basis of unified parallel modules to increase manufacturing, installation, maintenance and adaptability, reduce labor costs and downtimes and increase the reliability of AVPS. The decision protected the priority of the Russian Federation and of interest to a wide circle of specialists in the field of power electronics LA and other transport of AVPS.*

**Keywords:** UPS, vehicle power system, all-electric aircraft.

## **Введение**

В авиакосмических транспортных электроэнергетических комплексах (ЭЭК) наряду с первичными источниками электропитания (химическими, топливными, электромашиными и солнечно-батарейными или суперконденсаторными-ионисторными) обязательно используются вторичные источники электропитания (ВИЭП) и в частности – так называемые источники бесперебойного питания (ИБП). К указанным ИБП в общем случае предъявляются следующие основные требования:

– мощность ИБП должна быть достаточной для обеспечения питанием всех жизненно-важных потребителей (обеспечение «живучести» летательного аппарата); при этом напряжение питающей аккумуляторной или суперконденсаторной батареи может иметь минимально-допустимое для нее значение;

– выходными напряжениями ИБП являются: а) постоянное повышенное напряжение 270 (или 540) В с заземленным на корпус «минусом» или среднотенциальным выводом (униполярное или дифференциальное звено постоянного повышенного напряжения – УЗППН  $\pm 270$  ( $\pm 540$ ) В или ДЗППН  $0 \pm 135$  (270) В; б) постоянное низкое напряжение  $\pm 27$  В с заземленным «минусом» и в) переменное трехфазное напряжение 115/200 В, 400 Гц; при этом должны быть обеспечены нормируемые ГОСТом параметры качества электроэнергии;

– ИБП должен быть обратимым (двуправленным), т.е. обеспечивать зарядку аккумуляторной (суперконденсаторной) батареи нормированным максимальным током; кроме этого должно быть обеспечено обратимое

выпрямительно-инверторное преобразование постоянного повышенного и переменного напряжений с коррекцией коэффициента мощности (ОВИП – ККМ);

– должна обеспечиваться гальваническая развязка между входными и выходными выводами (кроме развязки между ЗППН и 115/200 В, 400 Гц);

– ДЗППН  $0 \pm 135$  ( $0 \pm 270$ ) В должен предусматривать уравнивающее деление напряжений (УДН);

– для обеспечения электромагнитной совместимости и высокой функциональной надежности ИБП в его схеме должны быть установлены ограничители коммутационных перенапряжений и исключены цепи для возможных «сквозных сверхтоков» из-за несанкционированных включений электронных ключей и вентилях при воздействии на блок и каналы управления электромагнитных импульсов (ЭМИ) молний, а также должна быть обеспечена «мягкая» коммутация силовых ключей (включения при нулевых токах, а выключения при нулевых напряжениях), снижающая помехоизлучения и коммутационные перегревы ключей (с помощью так называемых нерассеивающих демпферно-снабберных цепочек – ДСЦ с демпфирующими дросселями и снабберными конденсаторами).

К перечисленным обязательным требованиям целесообразно добавить желательную пригодность силовой схемы ИБП для реализации модульно-масштабируемой архитектуры (гибкость наращивания установочной мощности за счет параллельного включения унифицированных модулей, имеющих внешние вольтамперные характеристики «источников тока»).

Указанная архитектура позволяет существенно повысить производственную, монтажную и эксплуатационно-ремонтную технологичность ИБП, снизить трудозатраты и простои авиатранспорта и повысить надежность ЭЭК.

Исходя из вышеизложенного авторами предлагается нетрадиционное схемотехническое решение для ИБП авиакосмического ЭЭК, в частности – системы электроснабжения (СЭС) полностью электрифицированного самолета (ПЭС) с повышенной энергообеспеченностью [1,2].

### Силовая схема ИБП, ее состав и назначение узлов (рис. 1)

Схема содержит: дифференциальное звено постоянных повышенных напряжений (ДЗППН:  $C\phi_2-C\phi_3$ ), звено высокой частоты на базе многообмоточного трансформатора прямоугольного тока (ЗВЧ-ТПТ), два коммутационных импульсных модулятора (ИМ<sub>1,2</sub>), Виенна-выпрямитель с коррекцией коэффициента мощности (В-В-ККМ), два импульсных уравнивающих делителя напряжений (УДН<sub>1,2</sub>), шунтирующих входную двухконденсаторную

стойку с фильтровым и буферным конденсаторами ( $C\phi_1-C_B$ ) и фильтровую стойку ДЗППН ( $C\phi_2-C\phi_3$ ), три однофазных циклоконвертора ( $ЦК_{A,B,C}$ ) и два распределительных устройства – постоянного низкого напряжения ( $PV\pm 27В$ ) с подключаемой аккумуляторной батареей (АБ) и переменного трехфазного напряжения стабильной частоты (115/200 В, 400 Гц).

Следует отметить, что внешние выводы ДЗППН с разнополярными выпрямительными потенциалами ( $\pm V_d$ ) используются для параллельного включения аналогичных каналов ЭЭК (для повышения общей установочной мощности и качества электроэнергии в переходных режимах, а также обеспечения «горячего» резерва и питания наиболее мощных трехфазных инверторов и регуляторов напряжения (например, полумостовых трехфазных трехуровневых инверторов, питающих при запуске силовых установок магистральные стартер-генераторы (Ст-Г), а также мощные исполнительные механизмы (например, тяговые электродвигатели «мотор-колесного» шасси, электродвигатели топливных насосов и др.). Что касается подсистемы распределения

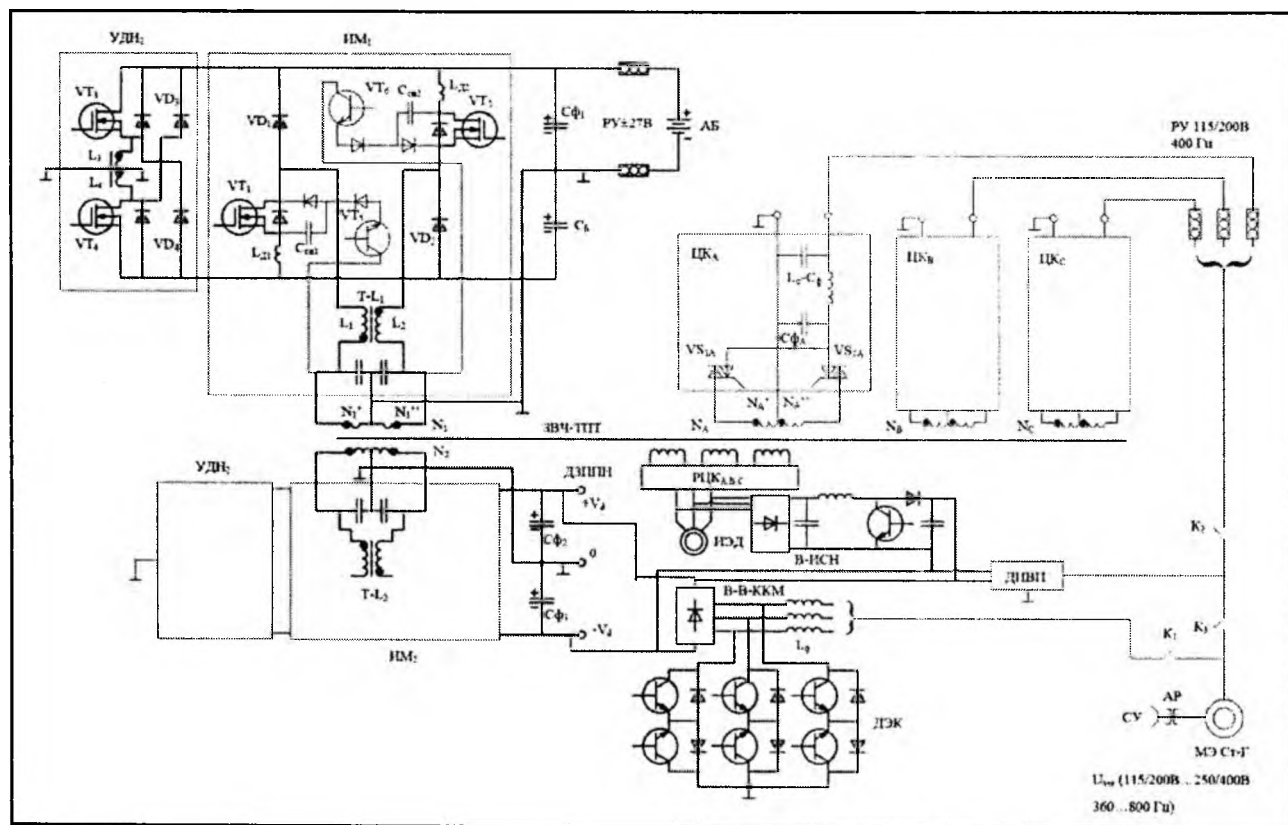


Рис. 1.

постоянного повышенного напряжения ( $РУ_{\text{шнн}}$ ), то она в настоящее время на авиакосмических ЛА не используются из-за сложности реализации бездуговой аварийной и штатной коммутации [2, 3].

Можно также отметить, что ЗВЧ-ТПТ может быть снабжено дополнительными группами фазных обмоток и регулируемых циклоконверторов (РЦК) для индивидуального питания регулируемых исполнительных электродвигателей (ИЭД) малой и средней мощности. Рекуперация энергии торможения ИЭД производится в широком скоростном диапазоне (вплоть до торможения) с помощью дополнительного выпрямителя (В) и повышающего (бустерного) однотактного импульсного модулятора (ИМ<sub>3</sub>).

### Описание работы основных узлов ИБП

1. Импульсные модуляторы (ИМ<sub>1,2</sub>). Схема рассматриваемых ИМ отличается от подобных, например, приведенной в [4], дифференциальным входом, в частности – питанием.

1а) В режиме ЭЭК от АБ ИМ<sub>1</sub> работает как инвертор прямоугольного тока для питания ЗВЧ-ТПТ, а ИМ<sub>2</sub> – как диодный выпрямитель для зарядки  $C\phi_{2,3}$ . При этом на управляющий вывод (затвор)  $VT_2$  от блока управления поступают высокочастотные прямоугольные отпирающие импульсы с постоянным периодом широтно-импульсной модуляции ( $T_{\text{шим}}$ ) и регулируемым коэффициентом заполнения импульса ( $\gamma_{\text{и}} = t_{\text{и}} / 0,5T_{\text{шим}}$ ). При очередном включении  $VT_2$  полное потокосцепление обоих трансреакторов ( $T-L_{1,2}$ ) нарастает (этап  $d\psi/dt > 0$ ) вместе с токами в цепях:  $C\phi_1 - VT_2 - L_2 - N_1'' - C\phi_1, N_A' - VS_{1A} - C\phi_A - N_A'$  (зарядка  $C\phi_A$  через циклоконвертор ЦК<sub>А</sub>), цепь «прямоходовой» зарядки  $C\phi_2$  через ИМ<sub>2</sub> от  $N_2$ , подобная цепи ( $N_1' - L_1 - VD_1 - C\phi_1 - N_1'$ ) // ( $N_1'' - L_2$  - обратимый диод  $VT_2 - C\phi_1 - N_1''$ ), т.е. цепи зарядки  $C\phi_1$  ИМ<sub>1</sub> в его выпрямительном режиме, и цепь «прямоходовой» подзарядки буферного конденсатора  $C_B$ :  $L_1 - N_1' - C_B$  - обратимый диод  $VT_1 - L_1$  за счет разности индуцированных ЭДС в обмотках  $L_1$  и  $N_1'$ . После выключения  $VT_2$  указанное потокосцепление частично (или полностью) спадает (этап  $d\psi/dt < 0$ ) вместе с токами в цепях:  $L_2 - N_1'' - C_B - VD_2 - L_2$  («обратноходовая» зарядка

$C_B$  за счет ЭДС самоиндукции обмотки  $L_2$ ) и цепь «обратноходовой» зарядки фильтровой стойки  $C\phi_2 - C\phi_3$  – за счет ЭДС самоиндукции обмоток трансреактора  $T-L_2$ , подобная цепи:  $L_2 - N_1' - L_1 - VD_1 - C\phi_1 - C_B - L_2$  ИМ<sub>1</sub> в его выпрямительном режиме; при этом в цепи ЦК<sub>А</sub> ток не индуцируется (токовая пауза) из-за встречного включения секции  $N_1'$  и  $N_1''$ .

По окончании первого полупериода ШИМ ( $0,5T_{\text{шим}}$ ) включается ключ  $VT_1$ , и происходят процессы, аналогичные описанным (в течение второго полупериода ШИМ). Далее указанные процессы высокочастотно-периодически качественно повторяются, осуществляя питание ЗВЧ-ТПТ, а следовательно – питание ЭЭК от АБ.

1б) В режиме питания ЭЭК от ЗППН ИМ<sub>1</sub> и ИМ<sub>2</sub> меняются ролями, а благодаря идентичности их схем протекающие процессы аналогичны описанным, но с меньшими токами при той же мощности (с учетом согласующего коэффициента трансформации для обмоток  $N_2$  и  $N_1$  ТПТ, соответствующего отношению напряжений:  $U_{\text{ДЗППН}}$  и  $U_{\text{АБ}}$ .

В режимах 1а) и 1б) используются так называемая, двухтактная (поочередная) импульсная модуляция ключей  $VT_1$  и  $VT_2$  с использованием двух электромагнитных каналов обмена энергией АБ и ДЗППН: через ТПТ и через трансреакторы  $T-L_{1,2}$ . При этом часть энергии передается в нагрузки переменного трехфазного напряжения через циклоконверторы ЦК<sub>А,В,С</sub> и их выходные П-образные индуктивно-емкостные фильтры  $L_{\phi} - C_{\phi}$ , подключаемые к РУ 115/200 В, 400 Гц, а также в якорные цепи трехфазного исполнительного электродвигателя (ИЭД) через регулируемые циклоконверторы (РЦК<sub>А,В,С</sub>). Рекуперация энергии торможения ИЭД производится в ЗППН через выпрямитель с выходным повышающим импульсным модулятором (В-ИМ<sub>3</sub>) в широком скоростном диапазоне (вплоть до остановки).

Если не требуется передача электроэнергии через ЗВЧ-ТПТ, то возможен более простой алгоритм управления ИМ<sub>1</sub> и ИМ<sub>2</sub>: однотактный – с синхронным включением и выключением ключей  $VT_1$  и  $VT_2$ . При очередном включении  $VT_1$  и  $VT_2$  полное потокосцепление трансреакторов  $T-L_1$  и  $T-L_2$  нарастает (этап

$d\psi/dt > 0$ ) вместе с токами в цепях:  $C\phi_1 - VT_2 - L_2 - N_1 - L_1 - VT_1 - C_B - C\phi_1$  и цепь «прямоходовой» зарядки стойки  $C\phi_2 - C\phi_3$  за счет ЭДС взаимной индукции в обмотках  $T - L_2$ , подобная цепи:  $L_2$ -обратный диод  $VT_2 - C\phi_1 - C_B$ -обратный диод  $VT_1 - L_1 - N_1 - L_2$ . После выключения обоих ключей  $VT_1$  и  $VT_2$  указанное потокосцепление частично (или полностью) спадает (этап  $d\psi/dt < 0$ ) вместе с токами в цепях:  $L_2 - N_1 - L_1 - VD_1 - C\phi_1 - C_B - VD_2 - L_2$  (рекуперация энергии индуктивностей рассеяния обмоток  $L_1$  и  $L_2$  с «обратноходовой» подзарядкой  $C_B$ ) и цепь «обратноходовой» зарядки стойки  $C\phi_2 - C\phi_3$  за счет ЭДС самоиндукции  $T - L_2$ , подобная указанной цепи рекуперации. Длительности этапов:  $d\psi/dt > 0$  и  $d\psi/dt < 0$  составляют, соответственно:  $\gamma T_{\text{шим}}$  и  $(1 - \gamma) T_{\text{шим}}$ .

## 2. Уравнивательные делители напряжений (УДН<sub>1,2</sub>)

Функцией обоих УДН в режимах прямого и обратного преобразований в ИБП является автоматическое выравнивание напряжений на двухконденсаторных стойках  $C\phi_1 - C_B$  и  $C\phi_2 - C\phi_3$  независимо от степени разбаланса их нагрузок. Оба они работают в режиме обратимого (двунаправленного) «транспортера заряда» и собраны в виде обратимого полярно-инвертирующего понижающе-повышающего импульсного конвертора по схеме полуправляемого косоугольного моста с параллельными диодно-ключевыми стойками:  $VD_3 - VT_3$  и  $VD_4 - VT_4$ , зашунтированными двухсекционным уравнивательным реактором  $L_3 - L_4$  с заземленным средним выводом. На ключ, подключенный к конденсатору с большим напряжением (например, на  $VT_3$  при  $U_{C\phi_1} > U_{C_B}$ ) подаются высокочастотные прямоугольные отпирающие импульсы, в простейшем случае – с неизменным коэффициентом заполнения (например,  $\gamma = 0,5$ ). При включении  $VT_3$  полное потокосцепление уравнивательного реактора  $L_3 - L_4$  нарастает вместе с токами в цепях:  $C\phi_1 - VT_3 - L_3 - C\phi_1$  и  $L_4 - C_B$ -обратный диод  $VT_4 - L_4$  («прямоходовая» зарядка  $C_B$ ), а при его выключении – частично (или полностью) спадает вместе с токами:  $L_3 - C_B - VD_4 - L_3$  и  $L_4 - VD_3 - C\phi_1 - L_4$  («обратноходовые» зарядка  $C_B$  и рекуперация

энергии рассеивания обмотки  $L_4$  в  $C\phi_1$ ). Далее процессы высокочастотно-периодически качественно повторяются вплоть до выравнивания напряжений на  $C\phi_1$  и  $C_B$ . При этом управление может не выключаться, но при этом будет циркулировать внутренняя реактивная мощность с тепловыми потерями.

## 3. Двунаправленный инверторно-выпрямительный преобразователь (ДИВП)

Назначением ДИВП являются следующие функции: а) питание магистрального трехфазного стартер-генератора в стартерном режиме; б) резервное питание  $U \approx 115/200$  В, 400 Гц (при повышенных нагрузках и/или отказах в циклоконверторах (ЦК<sub>А,В,С</sub>)); в) резервное питание ДЗППН («горячий резерв») в параллель с (или вместо) В-В-ККМ.

На рисунке 2 представлена силовая схема однофазного модуля ДИВП с накопительно-демпфирующим трансреактором ( $T - L_{\text{н/д}}$ ) и дифференциальным питанием (ДЗППН  $0 \pm 135(270)$  В). Схема содержит два мостовых импульсных коммутатора (ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>): шести- и четырехплечевой, разделенные двумя обмотками ( $L_1$  и  $L_2$ ) трансреактора ( $T - L_{\text{н/д}}$ ), а также входной и выходной емкостные фильтры ( $C\phi_{1,2}$  и  $C\phi_{-}$ ). Все восемь электронных ключей снабжены обратными блокирующими диодами и нерассеивающими демпферно-снабберными цепочками (ДСЦ  $L_{d,1,8} - C_{sn,1,8}$ ) с зарядно-разрядными двухдиодными стойками. Кроме этих стоек введены две суммирующие стойки ( $VD_{01-02}$  и  $VD_{03-04}$ ). Наличие ДСЦ выгодно отличает эту схему от приведенной в [2] на стр. 84, рис. 2.4.1а, т.к. повышает надежность, КПД и удельную мощность устройства, а также снижает коммутационные помехи (кондуктивные и излучаемые). Зеркальная симметрия расположения большинства элементов схемы и аналогия алгоритмов коммутации ключей на «положительном» и «отрицательном» полупериодах фазного напряжения:  $U_{AN} = U_{C\phi_{-}}$  (в инверторном и выпрямительном режимах) позволяют рассмотреть работу схемы только на одном («положительном») полупериоде (при положительном потенциале вывода А относительно нейтрального вывода N).



Ключи коммутаторов ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub> коммутируются с высокочастотной широтно-импульсной модуляцией – с постоянным периодом  $T_{\text{шим}}$  и регулируемой длительностью импульсов:  $t_{\text{и}} = \gamma_{\text{и}} T_{\text{шим}}$ . При обоих направлениях преобразования (инверторном и выпрямительном) в пределах рассматриваемого полупериода ( $U_{\text{АН}} > 0$ ) возможны интервалы (режимы) «понижения» и «повышения» напряжения, рассматриваемые ниже.

### 3-1. Инверторный понижающий режим ( $|U_{\text{п}}| > U_{\text{АН}}$ ).

На произвольном периоде  $T_{\text{шим}}$  сначала включаются ключи VT<sub>8</sub> и VT<sub>2</sub>, и происходит нарастание полного потокосцепления L<sub>1</sub> и L<sub>2</sub> (этап  $d\psi/dt > 0$ ) вместе с током в цепи: СФ<sub>1</sub>–VT<sub>8</sub>–L<sub>2</sub>–VT<sub>2</sub>–СФ<sub>–</sub>–СФ<sub>1</sub> в течение длительности:  $t_{\text{и}} = \gamma_{\text{и}} T_{\text{шим}}$ . Затем одновременно выключаются эти ключи, а включаются VT<sub>4</sub> и VT<sub>6</sub>, и происходит приблизительное сохранение полного потокосцепления (этап  $d\psi/dt \approx 0$ ) вместе с коротко-замкнутым током в цепи: L<sub>2</sub>–VT<sub>4</sub>–VT<sub>6</sub>–L<sub>2</sub> в течение длительности токозамыкающей паузы:  $\Delta t_{\text{и}} = \Delta \gamma_{\text{и}} T_{\text{шим}}$ . После этого ключ VT<sub>4</sub> выключается, а включается ключ VT<sub>2</sub> (VT<sub>6</sub> остается включенным), и происходит частичное (или полное) спадение полного потокосцепления (этап  $d\psi/dt < 0$ ) вместе с током в цепи:

L<sub>2</sub>–VT<sub>5</sub>–СФ<sub>–</sub>–VT<sub>6</sub>–L<sub>2</sub> в течение длительности:  $T_{\text{шим}} - t_{\text{и}} - \Delta t_{\text{и}} = (1 - \gamma_{\text{и}} - \Delta \gamma_{\text{и}}) T_{\text{шим}}$ . Далее указанные этапы высокочастотно-периодически качественно повторяются в пределах рассматриваемого понижающего режима (интервала).

### 3-2. Инверторный повышающий режим ( $|U_{\text{п}}| < U_{\text{АН}}$ )

На произвольном периоде  $T_{\text{шим}}$  сначала включаются ключи VT<sub>8</sub> и VT<sub>4</sub>, и на этапе:  $d\psi/dt > 0$  ток нарастает по цепи: СФ<sub>1</sub>–VT<sub>8</sub>–L<sub>2</sub>–VT<sub>4</sub>–СФ<sub>1</sub>. Затем ключ VT<sub>8</sub> выключается, а включается ключ VT<sub>6</sub> (VT<sub>4</sub> остается включенным), и на этапе:  $d\psi/dt \approx 0$  ток замыкается по цепи: L<sub>2</sub>–VT<sub>4</sub>–VT<sub>6</sub>–L<sub>2</sub> (токозамыкающая пауза), после чего VT<sub>4</sub> и VT<sub>6</sub> выключаются, а включаются VT<sub>2</sub> и VT<sub>8</sub>, и на этапе:  $d\psi/dt < 0$  ток частично (или полностью) спадает по цепи: L<sub>2</sub>–VT<sub>2</sub>–СФ<sub>–</sub>–СФ<sub>1</sub>–VT<sub>8</sub>–L<sub>2</sub>. Далее указанные этапы высокочастотно-периодически качественно повторяются в пределах рассматриваемого повышающего режима.

### 3-3. Выпрямительный понижающий режим ( $U_{\text{АН}} > |U_{\text{п}}|$ )

На произвольном периоде  $T_{\text{шим}}$  сначала включается ключ VT<sub>1</sub>, и на этапе:  $d\psi/dt > 0$  ток нарастает по цепи: СФ<sub>–</sub>–VT<sub>1</sub>–VD<sub>9</sub>–СФ<sub>1</sub>–СФ<sub>–</sub>.

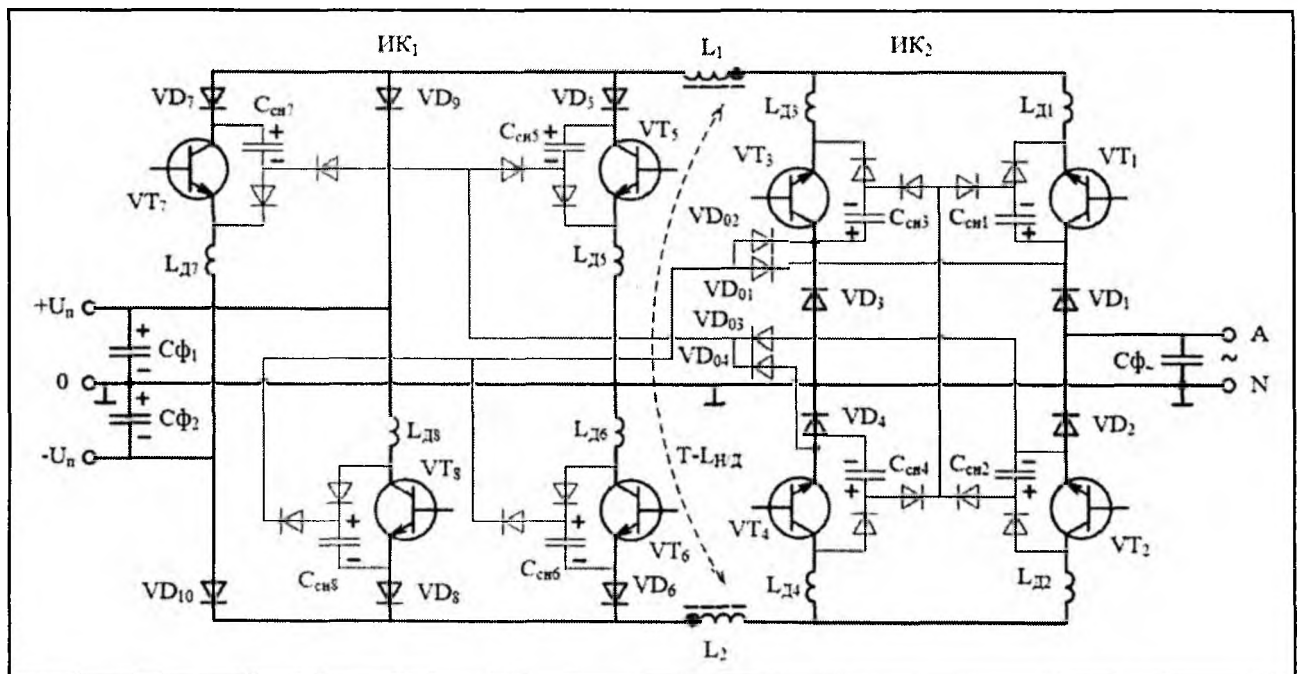


Рис. 2

Затем ключ  $VT_1$  выключается, а включаются ключи  $VT_3$  и  $VT_5$ , и на этапе:  $d\Psi/dt \approx 0$  ток приблизительно сохраняется в цепи:  $L_1-VT_5-VT_3-L_1$  (токозамыкающая пауза). После паузы ключ  $VT_5$  выключается ( $VT_3$  остается включенным), и на этапе:  $d\Psi/dt < 0$  ток частично (или полностью) спадает по цепи:  $L_1-VD_9-C\Phi_1-VT_3-L_1$ .

Далее указанные этапы высокочастотно-периодически качественно повторяются в пределах рассматриваемого понижающего режима.

### 3-4. Выпрямительный повышающий режим ( $U_{AN} < |U_{П}|$ )

На произвольном периоде  $T_{шмм}$  чередуются этапы:  $d\Psi/dt > 0$  с током в цепи:  $C\Phi_1-VT_1-L_1-VT_5-C\Phi_1$ ,  $d\Psi/dt \approx 0$  с током в цепи:  $L_1-VT_5-VT_3-L_1$  и  $d\Psi/dt < 0$  с током в цепи:  $L_1-VD_9-C\Phi_1-C\Phi_1-VT_1-L_1$ .

При обоих направлениях преобразования с помощью одновременного регулирования двух взаимонезависимых параметров:  $\gamma_{н}$  и  $\Delta\gamma$  («дуальное» управление) в замкнутом контуре управления по эталонным сигналам с отрицательными обратными связями производится одновременное регулирование: а) выходного напряжения со стабилизацией его среднего (при выпрямлении) или действующего (амплитудного при инвертировании) значения и мгновенного значения полного потокосцепления трансреактора, пульсирующего по модульно-синусному закону:

$$\Psi(t) = \Psi_0 |\sin(\omega t + \Delta\varphi)|,$$

где  $\Psi_0$  и  $\varphi$  – стабилизированные значения амплитуды и фазового сдвига. При этом благодаря перекоммутации токов обмоток  $L_1$  и  $L_2$  накопительно-демодуляторного трансреактора  $T-L_{нд}$  в цепи фазного вывода А формируются либо синусоидальный ток:

$$i_A(t) = I_0 \sin(\omega t + \Delta\varphi),$$

либо синусоидальный потенциал:

$$V_A(t) = V_0 \sin(\omega t + \Delta\varphi_V),$$

где фазовые сдвиги в трех фазных модулях, соответственно, составляют:  $0$ ,  $+2\pi/3$  и  $-2\pi/3$ . Этим обеспечиваются не только пофазная симметрия напряжений в инверторном режиме

для трех модулей, но и приближение к единице коэффициента мощности в выпрямительном режиме (коррекция коэффициента мощности, подобная В–В–ККМ).

В заключение рассмотрения работы основных узлов ИБП следует указать, что помимо удовлетворения всем требованиям, перечисленным во введении, предложенные схемы узлов обладают общим дополнительным достоинством: безынерционностью переключения направлений преобразования благодаря отсутствию реверса полного потокосцепления используемого трансреактора. Это позволяет обеспечить высокое качество регулирования, в переходных процессах и высокое качество преобразуемой электроэнергии на входах и выходах узлов.

### Заключение

Предложенное нестратегическое решение для резервно-аккумуляторного источника бесперебойного питания (ИБП), предназначенного для авиакосмических электроэнергетических комплексов (ЭЭК), в частности – для полностью электрифицированных самолетов (ПЭС) с повышенной электроэнерговооруженностью (до 1,5 МВт и более), удовлетворяет всем основным требованиям, предъявляемым к ЭЭК, и пригодно для реализации их модульно-масштабируемой архитектуры на базе параллельных унифицированных модулей. Такая архитектура позволяет существенно повысить производственную, монтажную и эксплуатационно-ремонтную технологичность, снизить трудозатраты и простои транспорта и повысить надежность ЭЭК.

Решение защищено приоритетом РФ и представляет интерес для широкого круга специалистов в области силовой электроники ЛА и других транспортных ЭЭК.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лёвин А.В., Мусин С.М., Харитонов С.А., Ковалев К.Л., Герасин А.А., Халютин С.П. *Электрический самолет: концепция и технологии* / Под ред. С.М. Мусина. Уфа: УГАТУ, 2014. 388 с.
2. Резников С.Б., Бочаров В.В., Харченко И.А. *Электромагнитная и электроэнергетическая совместимость систем электроснабжения*

вторичных источников электропитания полностью электрифицированных самолетов / Под ред. С.Б. Резникова. М.: Изд-во МАИ, 2014. 160 с.

3. Машуков Е.В., Шевцов Д.А., Ульященко Г.М. *Транзисторные аппараты защиты и коммутации для авиационных систем распределения энергии*. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. 488 с.
4. Резников С., Климова С., Харченко И., Смирнов В., Савостьянов В. Резервно-аккумуляторные источники бесперебойного питания для автономных и сетевых систем электроснабжения со звеном постоянного повышенного напряжения // *Силовая электроника*. 2016. № 2. С. 64...68.

2. Reznikov S.B., Bocharov V.V., Kharchenko I.A. *Elektromagnitnaya i elektroenergeticheskaya sovmestimost' sistem elektrosnabzheniya vtori-chnykh istochnikov elektropitaniya polnost'yu elektrifitsirovannykh samoletov* [Electromagnetic compatibility and electricity supply systems of secondary power supplies of all-electric aircraft]. Ed. by S.B. Reznikov. Moscow: Publishing House MAI, 2014. 160 p.
3. Mashukov E.V., Shevtsov D.A., Ul'yashchenko G.M. *Tranzistornye apparaty zashchity i kommutatsii dlya aviatsionnykh sistem raspredeleniya energii* [Transistor protection devices and switching for aircraft power distribution system]. Moscow: Publishing House MAI-PRINT, 2009. 488 p.
4. Reznikov S., Klimova S., Kharchenko I., Smirnov V., Savost'yanov V. Rezervno-akkumulyatornye istochniki bespereboynogo pitaniya dlya avtonomnykh i setevykh sistem elektrosnabzheniya so zvenom postoyannogo povyshennogo napryazheniya [Stand-rechargeable uninterruptible power supply for stand-alone and network power systems with DC link overvoltage]. *Silovaya elektronika* [Power Electronics]. 2016. № 2. Pp. 64...68.

## REFERENCES

1. Levin A.V., Musin S.M., Kharitonov S.A., Kovalev K.L., Gerasin A.A., Khalyutin S.P. *Elektricheskiy samolet: kontseptsiya i tekhnologii* [Electrical plane: the concept and technology]. Ed. by S.M. Musina. Ufa: UGATU, 2014. 388 p.

---

## Сведения об авторах

**Резников Станислав Борисович**, доктор техн. наук, профессор  
ФГБОУВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»  
125993, Российская Федерация, Москва, Волоколамское шоссе, 4  
**Харченко Игорь Александрович**, канд. техн. наук, доцент  
ФГБУ «ЦНИИИ ИВ» Минобороны России  
143432, Российская Федерация, Московская обл., гп. Нахабино-2  
**Храмцов Кирилл Николаевич**, аспирант  
E-mail: mrkhrantsov@gmail.com  
ФГБОУВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»  
125993, Российская Федерация, Москва, Волоколамское шоссе, 4  
**Жегов Николай Алексеевич**, ведущий инженер  
МОКБ «Марс»  
127473, Российская Федерация, Москва, 1-й Щемилковский переулок, д. 16

## Information about authors

**Reznikov Stanislav B.**, Doctor of Techn. Sciences, Professor  
Moscow aviation institute  
125993, Russian Federation, Moscow, Volokolamsk highway, 4  
**Kharchenko Igor A.**, Cand. of Techn. Sciences, Associate Professor  
«Central Research and Development Testing Institute of the Engineering Troops  
of the Ministry of Defense of the Russian Federation»  
143432, Russian Federation, SE. Nakhabino-2, Moscow reg.  
**Khramtsov Kirill N.**, Postgraduate Student  
E-mail: mrkhrantsov@gmail.com  
Moscow aviation institute  
125993, Russian Federation, Moscow, Volokolamsk highway, 4  
**Jegov Nikolai A.**, Lead Engineer  
MEDB «MARS»  
127473, Moscow, Russian Federation, 1-st Shemilovskiy lane, 16