

УДК 629.7.064.5

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-78-93

## Методика определения реактивных параметров авиационных потребителей электрической энергии на основе данных о напряжении и токе в переходных процессах

В.И. Павлова<sup>1</sup>, И.Е. Старостин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия

**Аннотация:** Современные тенденции развития авиационной техники связаны со значительным увеличением уровня ее электрификации. Появление новых видов потребителей электроэнергии влечет за собой увеличение мощности и количества потребителей в системе электроснабжения воздушных судов. На данном этапе эксплуатации прямой контроль внутренних параметров (в частности, параметров реактивных элементов) потребителей электроэнергии в системе электроснабжения воздушных судов не проводится. Система контроля авиационной техники строится с учетом встроенной системы мониторинга технического состояния объекта. Однако для большей эффективности встроенный контроль может быть дополнен возможностями управления с помощью цифровых интеллектуальных систем распределения энергии (локального центра управления нагрузками). В процессе эксплуатации авиационного электрооборудования значения его параметров изменяются относительно номинальных значений. Отклонения параметров оборудования от номинальных не должны превышать заданные значения, которые определяются эксплуатационной технической документацией. Входные импедансы вторичных источников электропитания могут быть исследованы в режиме, характеризующемся переходными процессами в исследуемом компоненте авиационного оборудования. Предлагается на основе экспериментальных данных напряжения и входного тока на стадии переходных процессов в схемах замещения вторичных источников электропитания определять значения параметров реактивных элементов. Изменение значений реактивных элементов дает информацию о техническом состоянии входных каскадов приемников электрической энергии. Это дает возможность отслеживать процесс деградации их свойств или диагностировать отказ в случае скачкообразного изменения реактивных параметров. Этот метод предлагается применять для диагностирования электрооборудования в процессе его функционирования на борту летательного аппарата. Настоящая работа посвящена разработке методов определения параметров вторичных источников питания авиационного электрооборудования, характеризующих его реактивные свойства.

**Ключевые слова:** диагностика авиационного оборудования, интеллектуальные системы распределения электроэнергии, переходные процессы.

**Для цитирования:** Павлова В.И., Старостин И.Е. Методика определения реактивных параметров авиационных потребителей электрической энергии на основе данных о напряжении и токе в переходных процессах // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 3. С. 78–93. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-78-93

## Methodology for determining the reactive parameters of aviation electrical energy consumers based on voltage and current data in transients

V.I. Pavlova<sup>1</sup>, I.E. Starostin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

**Abstract:** Modern trends in the aircraft development are associated with a significant increase in the level of its electrification. The emergence of new types of electricity consumers entails an increase in the power and number of consumers in the aircraft power supply system. At this stage of operation, direct control of the internal parameters (in particular, the parameters of reactive elements) of electricity consumers in the aircraft power supply system is not carried out. The aviation equipment control system is

built taking into account the built-in system for monitoring the technical condition of the object. However, for greater efficiency, the built-in control can be supplemented with control capabilities through digital intelligent power distribution systems (local load control center). During the operation of aviation electrical equipment, the values of its parameters change relative to the nominal values. Deviations of equipment parameters from the nominal values should not exceed the specified values, which are determined by the operational technical documentation. Input impedances of secondary power supply sources can be investigated in a mode characterized by transient processes in the investigated component of aircraft equipment. Based on the experimental data of voltage and input current at the stage of transients in equivalent circuits of secondary power supplies, it is proposed to determine the values of the parameters of reactive elements. Changing the values of reactive elements gives information about the technical condition of the input stages of electrical energy receivers. This makes it possible to monitor the process of degradation of their properties or to diagnose a failure in the event of an abrupt change in reactive parameters. This method is proposed to be used for diagnosing electrical equipment during its operation on board the aircraft. This work is devoted to the development of methods for determining the parameters of secondary power sources of aircraft electrical equipment, characterizing its reactive properties.

**Key words:** diagnostics of aviation equipment; intelligent power distribution systems; transient processes.

**For citation:** Pavlova, V.I., Starostin, I.E. (2023). Methodology for determining the reactive parameters of aviation electrical energy consumers based on voltage and current data in transients. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 26, no. 3, pp. 78–93. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-78-93

## Введение

Анализ построения систем электроснабжения показывает необходимость разработки новых типов силовой коммутационной аппаратуры, обеспечивающей возможности управления электроэнергетическим комплексом в рамках концепции интегральной модульной авионики [1, 2].

Эта аппаратура, помимо коммутационных функций, должна поддерживать функции контроля токов и напряжений, оценку состояния оборудования и полностью сопрягаться с цифровой шиной управления [3].

Современные воздушные суда гражданской авиации РФ, в том числе и беспилотные летательные аппараты, характеризуются значительным совершенствованием бортового оборудования, прямой контроль внутренних параметров (например, параметров реактивных элементов) которого достаточно затруднен [4]. Это влечет за собой увеличение вероятности отказа электрического оборудования в полете, что может привести к увеличению вероятности выхода из строя важных потребителей электроэнергии [5]. Системная проблема эксплуатации современных ВС состоит в недостаточном подходе к диагностике и контролю предотказного состояния [6] в распределительных системах электроснабжения и, как следствие, в снижении эксплуатационной надежности общесамолетного оборудования и ряда других систем.

Современные интеллектуальные системы электроснабжения дают возможность реализации дополнительных функций, например оценки технического состояния по результатам измерения электрических параметров контролируемого оборудования в режиме реального времени [8]. Целесообразно такого рода диагностику проводить в системе распределения электроэнергии, управляющей большинством устройств электрооборудования ВС [9].

Система распределения электроэнергии воздушных судов имеет в своем составе встроенные источники вторичного электропитания (ВИП). ВИП предназначены для получения напряжения, необходимого для непосредственного питания электрической энергией электронных и других устройств. Техническое состояние вторичного источника электропитания характеризуется состоянием его параметров. Причины изменений значений параметров могут быть различные, такие как старение, износ элементов или короткое замыкание в цепи электрического тока. Постоянный контроль параметров и оценка технического состояния вторичного источника питания требует разработки специальных методов диагностики технического состояния [10]. В состав вторичных источников питания входят реактивные элементы. По изменению параметров реактивных элементов можно делать выводы о состоянии ВИП [11].

Система распределения электрической энергии электрически связана с входными каскадами ВИП, поэтому существует возможность измерения токов и напряжений для определения входных параметров ВИП. По изменению параметров реактивных элементов можно выявить предаварийные состояния контролируемого оборудования [12].

## Постановка задачи

Воздушные суда комплектуются большим количеством приемников электрической энергии разнообразных по назначению, принципам действия и характеристикам, что в целом затрудняет их анализ как объектов контроля и диагностики. В силу большого разнообразия приемников каждый из них должен иметь встроенную систему контроля [13, 14].

Бортовое радиоэлектронное оборудование (БРЭО) перспективных воздушных судов (МС-21; SSJ-New; Ил-114-300 и т. д.) имеет встроенные источники вторичного электропитания, в которых цепи питания недоступны для систем встроенного контроля этих блоков. Однако оценка состояния цепей питания ВИП приемника электроэнергии может быть осуществлена с использованием аппаратных возможностей электронного центра управления нагрузками [15].

Важно уменьшить вероятность выхода из строя потребителей электроэнергии в полете за счет применения усовершенствованного подхода к диагностированию электрооборудования в процессе его эксплуатации [16].

Необходимо провести анализ переходных процессов при ступенчатом изменении напряжения с целью получения методики определения параметров реактивных элементов, входящих в состав вторичных источников электропитания, по данным напряжения и тока в переходных процессах. Предлагаемый способ использует существующее оборудование и не требует использования стимулирующих сигналов, поэтому относится к классу пассивных методов, не снижающих надежность системы. У системы распределения, помимо функций управления и защиты,

использующих измерение значений напряжения и тока потребления в реальном времени, появятся дополнительные возможности оценки состояния потребителей электроэнергии только путем модификации программной части системы распределения электрической энергии.

В качестве примера рассмотрим две схемы замещения вторичного источника электропитания (рис. 1, *а* и 1, *б*) [17].

По данным напряжения и тока в переходных процессах, определив параметры реактивных элементов, можно диагностировать техническое состояние реального вторичного источника электропитания.

## Методология исследования

Для схем, указанных на рис. 1, *а*, *б*, можно рассмотреть два способа определения значений реактивных параметров – при синусоидальном входном напряжении и при постоянном напряжении [18]. В первом варианте экспериментальное исследование реактивных элементов осуществляется путем подачи входного напряжения сигналов переменной частоты. В данной статье рассматривается второй вариант, при котором на исследуемый приемник подается постоянное входное напряжение бортовой сети, которое может меняться в зависимости от режимов работы системы электроснабжения. Для определения параметров схем замещения, показанных на рис. 1, *а*, *б*, необходимо иметь динамику входных напряжения и тока в переходных процессах после подачи питания, получаемую с использованием схемы замещения, показанной на рис. 2, и динамику входного напряжения после отключения питания, получаемую с использованием схемы замещения, показанной на рис. 3, *а*, *б*.

Для нахождения тока и напряжения в исследуемой цепи воспользуемся первым и вторым правилами Кирхгофа [19].

Для схемы, показанной на рис. 1, *а*, для режима включения, используя схему замещения, показанную на рис. 2, *а*, в соответствии с первым правилом Кирхгофа имеем

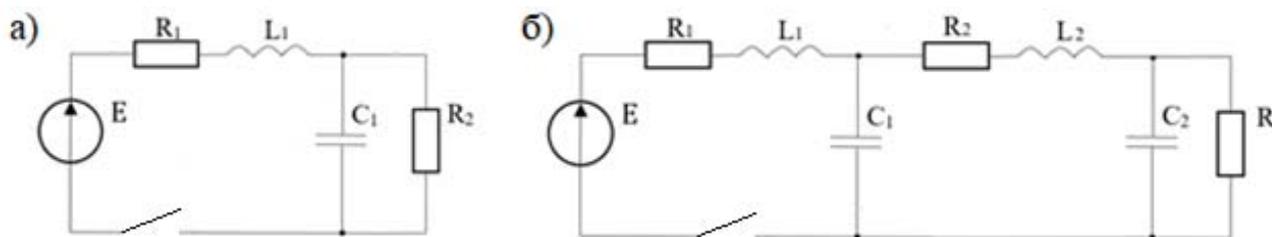


Рис. 1. Электрическая схема замещения входных цепей вторичного источника питания:  
а – с одним каскадом RLC; б – с двумя каскадами RLC

Fig. 1. Electrical equivalent circuit of the secondary power supply circuits:  
a – with one RLC stage; b – with two RLC stages

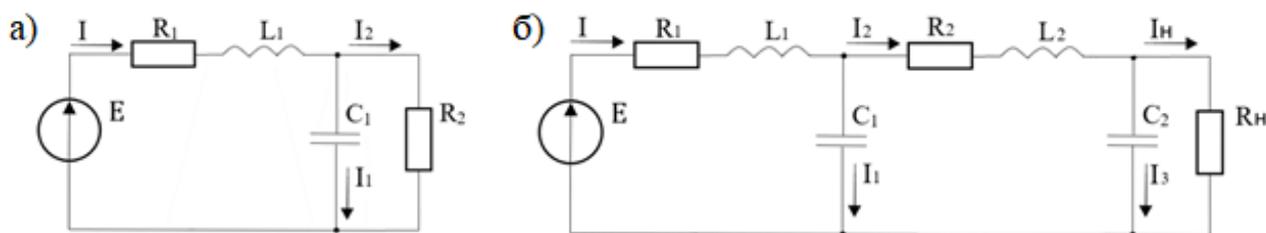


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема замещения входных цепей питания при подключении его к источнику: а – однокаскадная; б – двухкаскадная

Fig. 2. Equivalent electric circuit of substitution of input power circuits when connected to a source:  
a – with one RLC stage; b – with two RLC stages

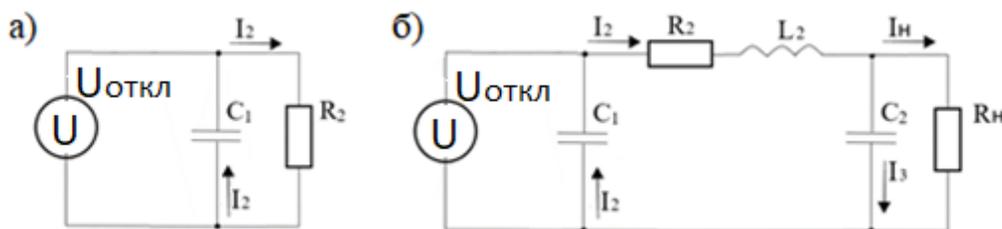


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема замещения входных цепей питания после отключения от сети:  
а – однокаскадная; б – двухкаскадная

Fig. 3. Equivalent electric circuit of substitution of input power circuits after disconnection from the network:  
a – with one RLC stage; b – with two RLC stages

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t); \quad (1)$$

по второму правилу Кирхгофа, а также в силу связи заряда на конденсаторе с током через конденсатор имеем

$$E(t) = R_1 i(t) + L_1 \frac{di(t)}{dt} + R_2 i_2(t), R_2 i_2(t) = \frac{q(t)}{C_1}, i_1(t) = \frac{dq(t)}{dt}. \quad (2)$$

Согласно соотношениям (1), (2) получаем

$$(R_1 + R_2) i(t) + (C_1 R_1 R_2 + L_1) \frac{di(t)}{dt} + C_1 L_1 R_2 \frac{d^2 i(t)}{dt^2} = E(t) + C_1 R_2 \frac{dE(t)}{dt}. \quad (3)$$

Учитывая, что значения параметров схемы замещения и напряжения питания не изменяются при переключении, система дифференциальных уравнений, описывающих переходный процесс, представляет собой линейное неоднородное дифференциальное уравнение, в котором правая часть является константой (предполагаем, что напряжение меняется ступенчато).

Для нахождения неизвестных  $R$ ,  $L$  и  $C$  в схеме, показанной на рис. 1, *a*, введем переменные замены:

$$A = R_1 + R_2; B = C_1 R_1 R_2 + L_1; D = L_1 R_2 C_1; F = C_1 R_2. \quad (4)$$

В режиме отключения, используя схему замещения, показанную на рис. 3, *a*, в соответствии со вторым правилом Кирхгофа, а также используя связь заряда на конденсаторе с током через конденсатор, имеем

$$U_{\text{откл}}(t) = \frac{q(t)}{C_1}, R_2 i_2(t) = \frac{q(t)}{C_1}, i_2(t) = -\frac{dq(t)}{dt};$$

отсюда имеем дифференциальное уравнение первого порядка для напряжения после снятия электропитания

$$U_{\text{откл}}(t) + C_1 R_2 \frac{dU_{\text{откл}}(t)}{dt} = 0. \quad (5)$$

Учитывая ступенчатый характер изменения напряжения, имеем в силу (3)–(5)

$$A i(t) + B \frac{di(t)}{dt} + D \frac{d^2 i(t)}{dt^2} = E(t), U_{\text{откл}}(t) + F \frac{dU_{\text{откл}}(t)}{dt} = 0. \quad (6)$$

Как видно из (6), величина  $F$  является постоянной времени отключения  $\tau_{\text{откл}}$ , получаемой из динамики напряжения отключения  $U_{\text{откл}}(t)$ , будем далее полагать  $F = \tau_{\text{откл}}$ . Отсюда для схемы замещения, показанной на рис. 1, *a*, в силу (4) имеем

$$L_1 = \frac{D}{\tau_{\text{откл}}}, R_1 = \frac{B}{\tau_{\text{откл}}} - \frac{D}{\tau_{\text{откл}}^2}, R_2 = A - \frac{B}{\tau_{\text{откл}}} + \frac{D}{\tau_{\text{откл}}^2}, C_1 = \frac{\tau_{\text{откл}}^3}{A\tau_{\text{откл}}^2} - B\tau_{\text{откл}} + D. \quad (7)$$

Определив, используя (6), из кривых тока и напряжения, взятых в переходных процессах после подачи и отключения питания, параметры  $A$ ,  $B$ ,  $D$ ,  $F = \tau_{\text{откл}}$ , затем из (7) мы определим параметры схемы замещения, показанной на рис. 1, *a*.

Для схемы, показанной на рис. 1, *b*, для режима включения, используя схему замещения, показанную на рис. 2, *b*, в соответствие с первым правилом Кирхгофа, а также учитывая связь тока через конденсатор с зарядом на конденсаторе, имеем

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t), i_2(t) = i_3(t) + i_n(t), i_3(t) = \frac{dq_2(t)}{dt}, i_1(t) = \frac{dq_1(t)}{dt}; \quad (8)$$

по второму правилу Кирхгофа имеем

$$E(t) = R_1 i(t) + L_1 \frac{di(t)}{dt} + \frac{q_1}{C_1}, \frac{q_1(t)}{C_1} - \frac{q_2(t)}{C_2} - L_2 \frac{di_2(t)}{dt} - R_2 i_2(t) = 0, \frac{q_2(t)}{C_2} - R_n i_n(t) = 0. \quad (9)$$

Из (8) и (9) получаем дифференциальное уравнение четвертого порядка:

$$E(t) + ((R_H + R_2)C_1 + R_H C_2) \frac{dE(t)}{dt} + (L_2 + R_H R_2 C_2) C_1 \frac{d^2 E(t)}{dt^2} + R_H L_2 C_2 C_1 \frac{d^3 E(t)}{dt^3} = (R_H + R_1 + R_2) i(t) + (R_1 C_1 (R_H + R_2) + R_H (R_1 + R_2) C_2 + L_1 + L_2) \frac{di(t)}{dt} + ((R_H + R_2) C_1 L_1 + R_H C_2 (L_1 + L_2) + R_1 C_1 (R_H R_2 C_2 + L_2)) \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + ((R_H R_2 C_2 + L_2) L_1 + R_H L_2 C_2 R_1) C_1 \frac{d^3 i(t)}{dt^3} + R_H L_1 L_2 C_1 C_2 \frac{d^4 i(t)}{dt^4}. \quad (10)$$

Для определения параметров схемы, показанной на рис. 1, б, введем переменные замены:

$$A = R_H + R_1 + R_2, B = R_1 C_1 (R_H + R_2) + R_H (R_1 + R_2) C_2 + L_1 + L_2, H = R_H L_1 L_2 C_1 C_2, \quad (11)$$

$$D = C_1 L_1 (R_H + R_2) + R_H C_2 (L_1 + L_2) + R_1 C_1 (R_H C_2 R_2 + L_2), F = R_H C_1 C_2 L_2, \quad (12)$$

$$G = (R_H R_2 C_2 + L_2) C_1 L_1 + R_H L_2 C_1 C_2 R_1, J = C_1 (R_2 R_H C_2 + L_2), M = R_H C_2 + C_1 (R_2 + R_H). \quad (13)$$

Согласно (11)–(13) уравнение (10) с учетом ступенчатого характера изменения напряжения примет вид

$$E(t) = A i(t) + B \frac{di(t)}{dt} + D \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + G \frac{d^3 i(t)}{dt^3} + H \frac{d^4 i(t)}{dt^4}. \quad (14)$$

Для режима отключения питания, используя схему замещения, показанную на рис. 3, б, согласно первому правилу Кирхгофа, а также учитывая связь тока через конденсатор с зарядом на конденсаторе, имеем

$$i_2(t) = i_3(t) + i_H(t), i_3(t) = \frac{dq_2(t)}{dt}, i_2(t) = -\frac{dq_1(t)}{dt};$$

по второму правилу Кирхгофа имеем

$$\frac{q_2(t)}{C_2} = R_H i_H(t), \frac{q_1(t)}{C_1} = R_2 i_2(t) + \frac{q_2(t)}{C_2} + L_2 \frac{di_2(t)}{dt}, U_{\text{откл}}(t) = \frac{q_1(t)}{C_1},$$

отсюда из полученных уравнений имеем для напряжения отключения  $U_{\text{откл}}$  дифференциальное уравнение третьего порядка

$$U_{\text{откл}}(t) + (R_H C_2 + R_2 C_1 + R_H C_1) \frac{dU_{\text{откл}}(t)}{dt} + C_1 (R_2 R_H C_2 + L_2) \frac{d^2 U_{\text{откл}}(t)}{dt^2} + R_H C_1 C_2 L_2 \frac{d^3 U_{\text{откл}}(t)}{dt^3} = 0;$$

отсюда, учитывая (12) и (13), получим окончательно

$$U_{\text{откл}}(t) + M \frac{dU_{\text{откл}}(t)}{dt} + J \frac{d^2 U_{\text{откл}}(t)}{dt^2} + F \frac{d^3 U_{\text{откл}}(t)}{dt^3} = 0. \quad (15)$$

Имея временные динамики напряжения  $U_{\text{откл}}(t)$  в режиме переходных процессов после отключения, а также временные динамики напряжения и тока в переходных процессах после включения, из (14) и из (15) определяем  $A, B, D, F, G, H, J, M$ , используя вытекающее из (11)–(13) соотношение

$$B = \frac{JD}{F} + \left( \frac{G}{F} - J \frac{H}{F^2} \right) \left( M - \frac{J^2}{F} \right) + \frac{H}{F} \left( 1 - \frac{MJ}{F} \right). \quad (16)$$

Затем, исходя из (11)–(13), получаем параметры схемы замещения, показанной на рис 1, б, в силу

$$L_1 = \frac{H}{F}, R_1 = \frac{G-JL_1}{F}, C_1 = \frac{F}{D-ML_1-JR_1}, L_2 = \frac{F}{C_1(M-C_1(A-R_1))}, \quad (17)$$

$$R_2 = \frac{J-C_1L_2}{C_1(M-C_1(A-R_1))}, C_2 = \frac{M-C_1(A-R_1)}{A-R_1-R_2}, R_H = A - R_1 - R_2. \quad (18)$$

Взятие производных по времени с использованием конечно разностной схемы повлечет за собой большие погрешности определения производных, обусловленные погрешностями измерений и малым приращением времени. Поэтому для того, чтобы производные были взяты корректно, необходимо использовать аппроксимацию снятой кривой, построенной по точкам при снятии переходного процесса. Рассмотрим вид аппроксимационного аналитического выражения, который необходимо использовать для аппроксимации переходных процессов. Этот вид аппроксимационного аналитического выражения определяется характером переходных процессов.

Переходный процесс в схемах замещения, показанных на рис. 1, а, б, может быть апериодическим или колебательным. Характеристическое уравнение схемы замещения, показанной на рис. 1, а, для режима включения в силу (3) примет вид

$$C_1L_1R_2\lambda^2 + (C_1R_1R_2 + L_1)\lambda + (R_1 + R_2) = 0; \quad (19)$$

для режима отключения в силу (5) примет вид

$$C_1R_2\lambda + 1 = 0. \quad (20)$$

Характеристическое уравнение схемы замещения, показанной на рис. 1, б, для режима включения в силу (14) примет вид

$$H\lambda^4 + G\lambda^3 + D\lambda^2 + B\lambda + A = 0; \quad (21)$$

для режима отключения в силу (15) примет вид

$$F\lambda^3 + J\lambda^2 + M\lambda + 1 = 0. \quad (22)$$

Имея диапазон характеристик потребителей электрической энергии (сопротивлений, емкостей и индуктивностей), можно, определив  $\lambda$  из (19)–(22), примерно оценить, какой будет режим апериодический ( $\lambda$  действительные) или режим затухающих колебаний ( $\lambda$  комплексные), и исходя из этого уже следует задавать аппроксимацию.

Так как общее решение любого линейного неоднородного дифференциального уравнения (в том числе и (3)) является суммой общего однородного и частного неоднородного решений такого уравнения, а также общее однородное решение представляет собой линейную комбинацию экспонент (действительных или комплексных), то аппроксимацию входного тока для схемы, показанной на рис. 1, а, для режима включения, исходя из (6), зададим в виде

$$i(t) = i_0 + S_1e^{-\lambda_1 t} + S_2e^{-\lambda_2 t}, S_1, S_2, \lambda_1, \lambda_2 = const, \quad (23)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , являющиеся решением (19), могут быть как действительными (апериодический режим), так и комплексными (режим затухающих колебаний); аппроксимацию напряжения отключения в режиме отключения питания зададим, исходя из (6), в виде

$$U_{\text{откл}}(t) = Se^{-\lambda t}, S, \lambda = \text{const}, \quad (24)$$

где  $\lambda$  – решение (20). Из (20) видно, что решение этого уравнения является действительным. Аппроксимацию входного тока для схемы, показанной на рис. 1, б, для режима включения, исходя из (14), зададим в виде

$$i(t) = i_0 + S_1 e^{-\lambda_1 t} + S_2 e^{-\lambda_2 t} + S_3 e^{-\lambda_3 t} + S_4 e^{-\lambda_4 t}, S_1, S_2, S_3, S_4, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4 = \text{const}, \quad (25)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ , являющиеся решением (21), могут быть как действительными (апериодический режим), так и комплексными (режим затухающих колебаний); аппроксимацию напряжения отключения в режиме отключения питания зададим, исходя из (15), в виде

$$U_{\text{откл}}(t) = S_1 e^{-\lambda_1 t} + S_2 e^{-\lambda_2 t} + S_3 e^{-\lambda_3 t}, S_1, S_2, S_3, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 = \text{const}, \quad (26)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ , являющиеся решением (22), могут быть как действительными (апериодический режим), так и комплексными (режим затухающих колебаний). Следует отметить, что если в (25) и (26), применимых к схеме замещения, показанной на рис. 1, б, значения  $\lambda$  с разными индексами получатся близкими друг к другу, то в таком случае предполагается, что схема замещения, показанная на рис. 1, б, вырождается в схему замещения, показанную на рис. 1, а.

Итак, определение параметров приемников электрической энергии на борту летательного аппарата осуществляется в соответствии со следующим формализмом.

1. Проанализировав, используя (19), (20) для схемы замещения, показанной на рис. 1, а, и, используя (11)–(13), (21), (22) для схемы замещения, показанной на рис. 1, б, характер переходных процессов, задаем, используя (23), (24) для схемы замещения, показанной на рис. 1, а, и, используя (25), (26) для схемы замещения, показанной на рис. 1, б, аппроксимационные аналитические зависимости для определения тока в режиме включения и напряжения в режиме отключения.

2. Имея снятые кривые напряжений и токов в режиме включения и отключения, определяем коэффициенты заданных в предыдущем пункте аппроксимационных выражений динамик токов и напряжений в переходных процессах. Если в случае схемы замещения, показанной на рис. 1, б, значения  $\lambda$  с разными индексами получатся близкими друг к другу, то в таком случае необходимо перейти к схеме замещения, показанной на рис. 1, а, и вернуться к пункту 1.

3. Используя полученные аналитические выражения для токов и напряжений, получа-

ем производные по времени для токов в режиме включения до второго порядка включительно (для схемы, показанной на рис. 1, а) и до четвертого порядка включительно (для схемы, показанной на рис. 1, б), а также первую производную напряжения после отключения питания для схемы, показанной на рис. 1, а, и производные напряжения по времени до третьего порядка включительно для схемы, показанной на рис. 1, б.

4. Задав дискретные моменты времени  $t_i$ ,  $i = 0, N$ , где  $N + 1$  – число дискретных моментов времени, используя полученные аналитические выражения для токов и напряжений и их производных по времени, из системы уравнений (6) определяем методом наименьших квадратов параметры  $A, B, D, F = \tau_{\text{откл}}$  для схемы замещения, показанной на рис. 1, а, и из (14)–(16) параметры  $A, B, D, F, G, H, J, M$  для схемы замещения, показанной на рис. 1, б.

5. Определив параметры  $A, B, D, F = \tau_{\text{откл}}$  для схемы замещения, показанной на рис. 1, а, определяем в соответствии с (7) сопротивления, емкости и индуктивности схемы замещения, показанной на рис. 1, а. Определив параметры  $A, B, D, F, G, H, J, M$  для схемы замещения, показанной на рис. 1, б, определяем

в соответствии с (17) и (18) сопротивления, емкости и индуктивности в схеме замещения, показанной на рис. 1, б.

Задание в пункте 4 дискретных моментов времени и использование метода наименьших квадратов позволит исключить неудачный выбор дискретных моментов времени для определения соответствующих параметров. По определенным в настоящем формализме характеристикам реактивных элементов, а также по скорости их изменения (получается путем многократного косвенного измерения параметров реактивных элементов через некоторые промежутки времени с дальнейшей оценкой скорости их изменения) возможно делать вывод о работоспособности контролируемых приемников электрической энергии.

## Результаты исследования

Для экспериментальной проверки методики идентификации реактивных характеристик авиационных потребителей электроэнер-

гии [3] были проведены экспериментальные исследования переходных процессов схемы замещения входных цепей вторичного источника питания, показанной на рис. 1, а, которая используется в авиационных потребителях электрической энергии.

Для экспериментальных исследований переходных процессов использовался симметричный генератор прямоугольных импульсов, скважность которого больше времени релаксации. В процессе экспериментальных исследований было снято 4 кривых напряжения и входного тока в переходных процессах при различных значениях параметров в схеме, показанной на рис. 1, а. Экспериментальные данные для схемы с одним каскадом RLC представлены на рис. 4–7. Следует отметить, что данные снимались как при логической единице на входе, так и при логическом нуле на входе. Из этих данных, как нетрудно видеть из (3), (4), (6), могут быть получены параметры  $A$ ,  $B$ ,  $D$ . Снятие данных тока при логическом нуле входного напряжения позволяет минимизировать случайную погрешность измерения.

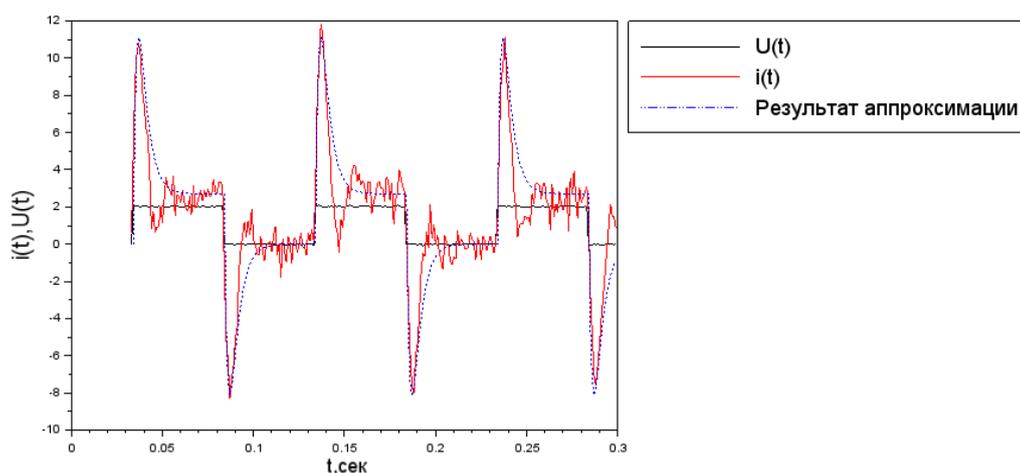
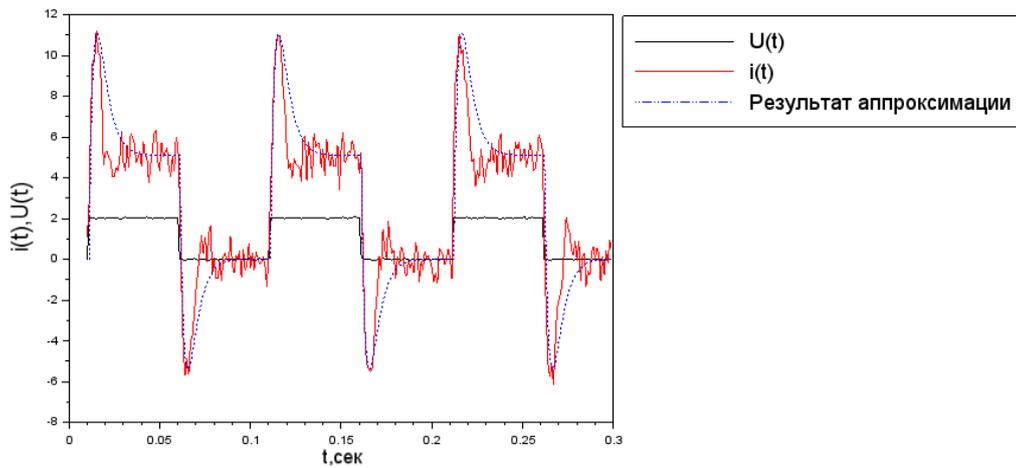
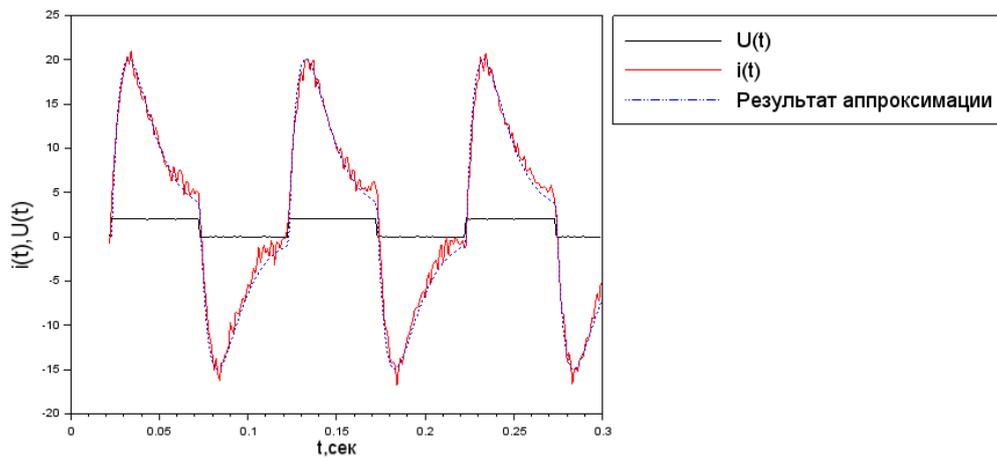


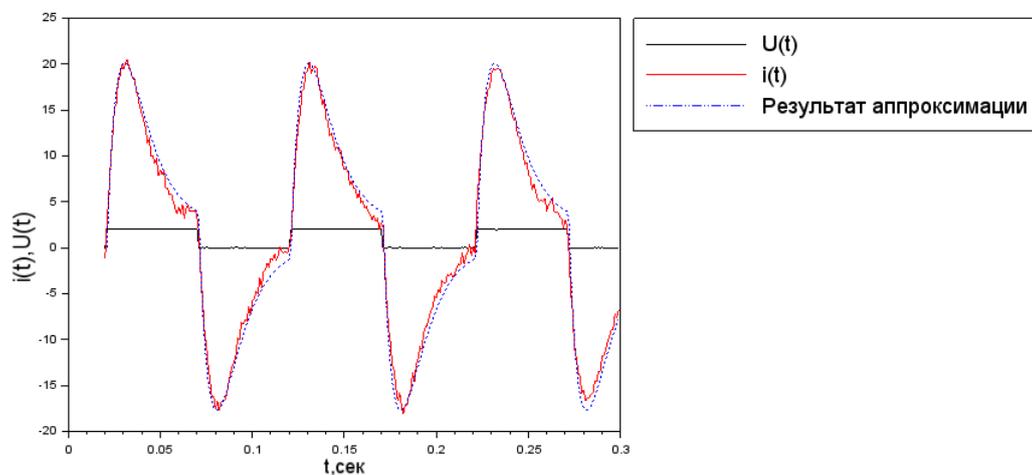
Рис. 4. Переходные процессы для схемы рис. 1, а, вар. 1  
Fig. 4. Transient processes for the circuit of Figure 1, а, option 1



**Рис. 5.** Переходные процессы для схемы рис. 1, а, вар. 2  
**Fig. 5.** Transient processes for the circuit of Figure 1, a, option 2



**Рис. 6.** Переходные процессы для схемы рис. 1, а, вар. 3  
**Fig. 6.** Transient processes for the circuit of Figure 1, a, option 3



**Рис. 7.** Переходные процессы для схемы рис. 1, а, вар. 4  
**Fig. 7.** Transient processes for the circuit of Figure 1, a, option 4

Используя полученные экспериментальные кривые, а также замерив время отключения, мы в соответствии с предложенным выше формализмом определим параметры схемы замещения, показанной на рис. 1, б. Па-

раметры аппроксимационных выражений применительно к схеме замещения, показанной на рис. 1, а, приведены в табл. 1, а рассчитанные параметры схемы замещения, показанной на рис. 1, а, приведены в табл. 2.

Таблица 1  
Table 1

Коэффициенты аппроксимирующих выражений  
Coefficients of approximating expressions

№№	S1	S2	$\lambda_1$	$\lambda_2$	i0
1	28,794255	31,494255	230,25851	550,94681	2,7
2	56,731084	61,831084	230,25851	328,0401	5,1
3	148,25101	150,95101	92,103404	128,80492	5,1
4	283,06558	285,76558	100,1124	119,35155	2,7

Таблица 2  
Table 2

Характеристики схемы рис. 1, а замещения  
Characteristics of the equivalent circuit Figure 1, a

№ динамики	R1, Ом	R2, Ом	C1, мкФ	L1, мГн	$\tau_{откл}, c$
1	478,087	270,475	29,9	727	0,0081
2	302,678	93,71	77,2	718	0,00723
3	144,681	303,367	169,1	713	0,0513
4	144,853	608,003	153	716	0,093

Погрешность расчетов по сравнению с опытными данными не превысила 20 %.

Экспериментальные данные для схемы с двумя каскадами RLC (рис. 1, б) представлены на рис. 8–11.

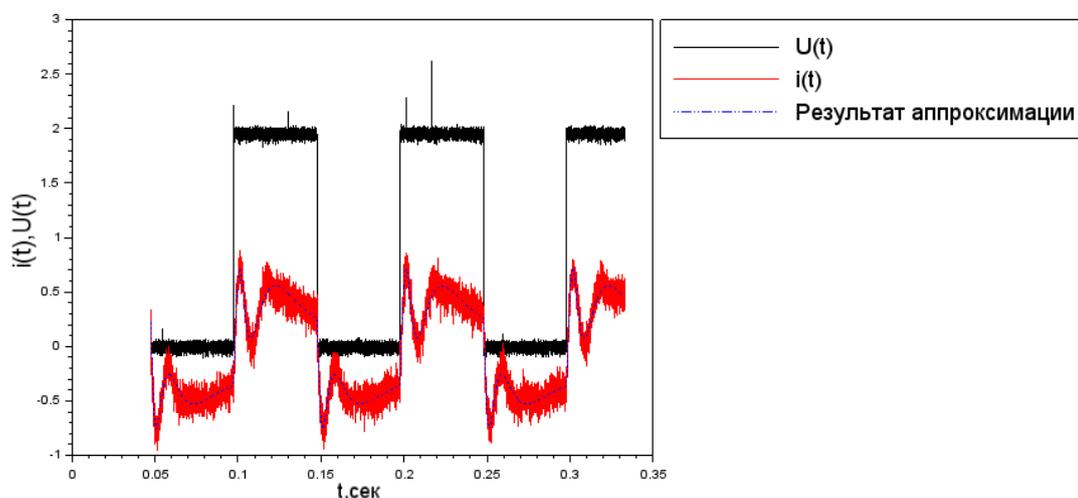


Рис. 8. Переходные процессы для схемы рис. 1, б, вар. 1  
Fig. 8. Transient processes for the circuit of Figure 1, b, option 1

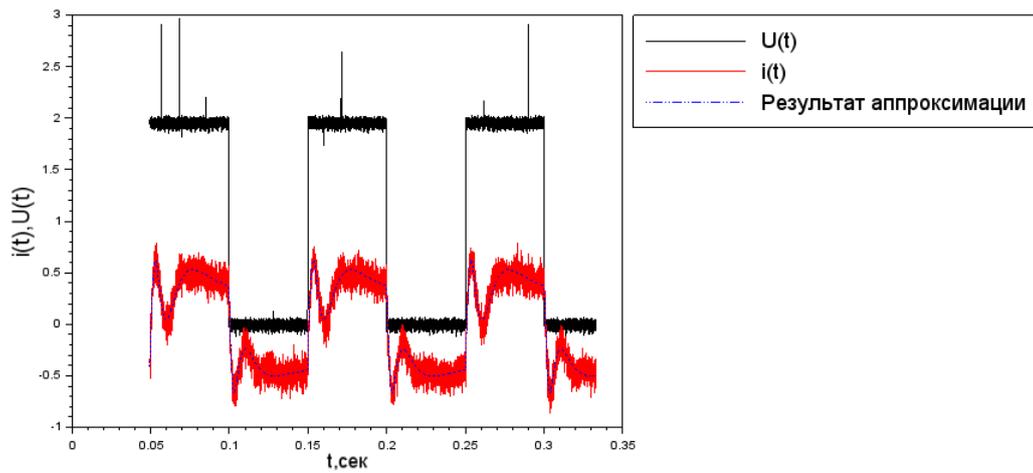


Рис. 9. Переходные процессы для схемы рис. 1, б, вар. 2  
Fig. 9. Transient processes for the circuit of Figure 1, b, option 2

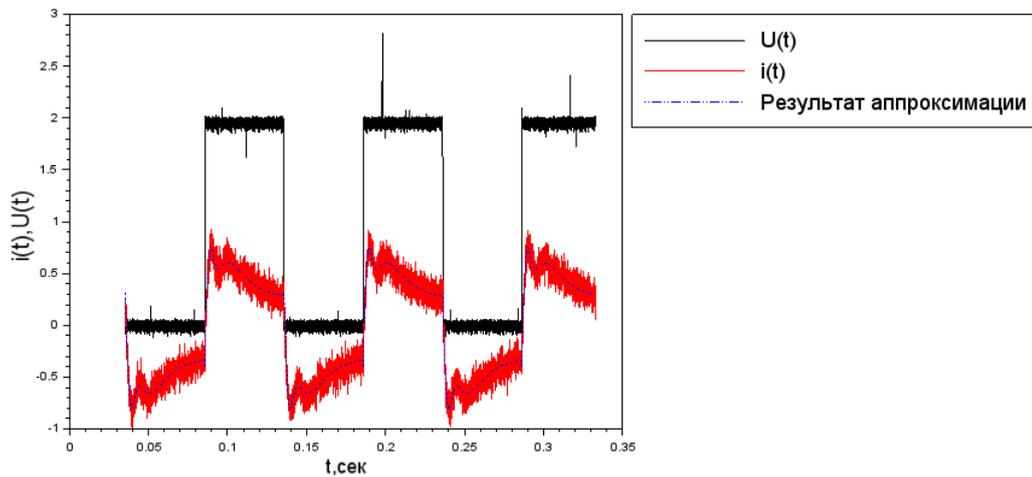


Рис. 10. Переходные процессы для схемы рис. 1, б, вар. 3  
Fig. 10. Transient processes for the circuit of Figure 1, b, option 3

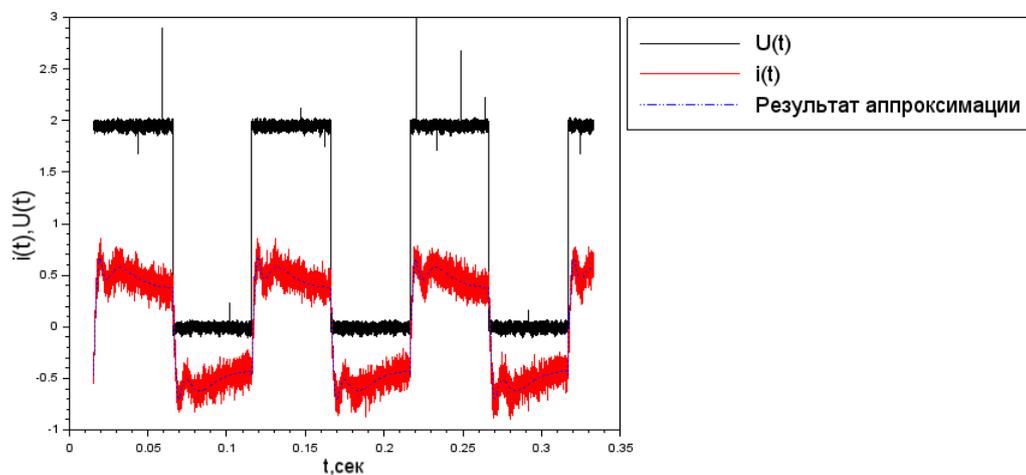


Рис.11. Переходные процессы для схемы рис. 1, б, вар. 4  
Fig. 11. Transient processes for the circuit of Figure 1, b, option 4

Аналогичным образом рассчитанные из кривых тока параметры схемы замещения,

показанные на рис. 1, б, приведены в табл. 3, а времена отключения приведены в табл. 4.

**Таблица 3**  
**Table 3**

Характеристики схемы рис. 1, б замещения  
Characteristics of the equivalent circuit Figure 1, b

№ динамики	R1, Ом	R2, Ом	C1, мкФ	L1, мГн	C2, мкФ	L2, мГн	Rн, Ом
1	8,854	65,293	326,107	7,171	227,021	947,075	1198,028
2	6,711	74,005	546,353	6,263	322,777	616,444	579,522
3	10,489	120,846	251,987	7,547	142,808	1308,697	637,011
4	14,974	446,613	222,259	12,732	212,189	5223,336	73,07

**Таблица 4**  
**Table 4**

Постоянные времени отключения  
Trip time constants

Индекс кривой	tauOff1	tauOff2	tauOff3
1	0,03	0,04	0,07
2	0,01	0,07	0,09
3	0,02	0,03	0,05
4	0,01	0,03	0,06

Для исследуемых переходных процессов получен цифровой двойник, который представляет собой математическую модель. Данная модель легко реализуется в интеллектуальных системах распределения воздушных судов. В ходе эксплуатации при изменении параметров реактивных элементов исследуемой схемы можно судить о состоянии входных каскадов устройств. Модель данного исследования полностью подтверждает теоретические предположения о работоспособности данного метода диагностики авиационного оборудования.

## Заключение

Предложенный в настоящей работе формализм определения характеристик реактивных элементов в схеме замещения дает возможность расширить функциональные возможности интеллектуальных систем распре-

деления электрической энергии за счет добавления функционала диагностирования и прогнозирования состояния входных цепей питания вторичных источников питания авиационного оборудования.

Предложенный в настоящей работе метод диагностирования технического состояния потребителей электроэнергии подтверждается экспериментально.

Из этого следует, что алгоритмы диагностирования можно строить на основе данных о мгновенных значениях тока в переходных процессах, полученных экспериментально на борту летательного аппарата. Предложенный алгоритм определения характеристик схем замещения входных каскадов вторичных источников питания, встроенных в авиационное оборудование, является математическим ядром цифрового двойника для исследуемого оборудования. Такой цифровой двойник легко реализовать в бортовом компьютере локальных центров управления нагрузками

в системе распределения перспективных воздушных судов.

Используя данный метод для диагностирования оборудования в режиме реального времени, можно существенно повысить безопасность полетов и существенно снизить эксплуатационные расходы.

В дальнейшем, используя данный метод, можно будет с определенной степенью точности прогнозировать отказы, характеризующиеся изменением этих параметров.

Для полноценной реализации предложенного метода необходимо решить дополнительные задачи:

– исследование режимов работы потребителей электроэнергии для определения предельных отклонений реактивных параметров от заданных значений, определяющих предаварийные состояния;

– формирование требований к аппаратному и программному обеспечению локальных центров управления нагрузкой для реализации предложенного метода, в том числе требований к цифровым устройствам измерения напряжения и тока, разрядности и быстродействию используемых микропроцессоров.

## Список литературы

1. Левин А.В., Халютин С.П., Жмуров Б.В. Тенденции и перспективы развития авиационного электрооборудования // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 213 (3). С. 50–57.

2. Грузков С.А., Румянцев М.Ю. Полная электрификация самолетов как один из важнейших путей решения экологических проблем и повышения эксплуатационной экономической и топливно-энергетической эффективности воздушного транспорта // Известия Академии электротехнических наук РФ. 2016. Выпуск 18. С. 35–60.

3. Pavlova V.I., Khalyutin S.P. Diagnostics of the state of secondary power supplies input circuits parameters based on analytical expressions // International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices. EDM, 30 June – 04 July 2021.

Рр. 305–309. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507642

4. Жмуров Б.В. Перспективы развития электроэнергетических систем беспилотных летательных аппаратов // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. 2010. № 1. С. 231–234.

5. Прилепский В.А., Коптев В.Н. Контроль состояния и диагностирование неисправностей авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов: учеб. пособие. Самара: СГАУ им. С.П. Королева, 2011. 102 с.

6. Дурнев В.В. Основные направления развития систем диагностики и прогностики технического состояния летательных аппаратов / В.В. Дурнев, И.Е. Мухин, С.Л. Селезнев, Ф.М. Мирзаянов // Инновации. 2014. № 9 (191). С. 110–113.

7. Воробьев В.Г., Константинов В.Д. Надежность и техническая диагностика авиационного оборудования: учебник. М.: МГТУ ГА, 2010. 448 с.

8. Савелов А.А., Давидов А.О. Экспериментальные исследования локальных блоков управления питанием для мониторинга состояния электрооборудования // Электропитание. 2019. № 2. С. 6–21.

9. Жмуров Б.В. Процесс проектирования систем электроснабжения воздушных судов как объект автоматизации // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 1. С. 88–103. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-1-88-103

10. Бабак А.В. Анализ методов и средств технической диагностики авиационной техники // Проблемы науки. 2018. № 7 (127). С. 31–34.

11. Халютин С.П. Система распределения электроэнергии воздушных судов – центр диагностирования и прогнозирования состояния авиационного электрооборудования // Электропитание. 2020. № 2. С. 4–14.

12. Савелов А.А., Решетов С.А. и др. Разработка демонстратора системы контроля, диагностики, прогнозирования технического состояния потребителей электроэнергии // Отчет о НИР МГТУ ГА, 2018. 120 с.

13. Савелов А.А. Применение локальных центров управления нагрузками для кон-

троля приемников электроэнергии // Электропитание. 2018. № 1. С. 4–13.

**14. Машошин О.Ф.** Диагностика авиационной техники: учеб. пособие. М.: МГТУ ГА, 2007. 141 с.

**15. Pavlova V.I.** Monitoring and diagnostics of the technical condition of built-in power sources of aviation equipment / V.I. Pavlova, S.P. Khalyutin, A.A. Savelov, A.O. Davidov // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM, June 29–03 July 2019. Pp. 464–468. DOI: 10.1109/EDM.2019.8823092

**16. Чернодаров А.В.** Контроль, диагностика и идентификация авиационных приборов и измерительно-вычислительных комплексов. М.: Научтехлитиздат, 2017. 300 с.

**17. Euldji A., Tienti A., Boudghene Stambouli A.** A novel modelling approach of RLC electrical circuits for symbolic circuit analysis by the direct topological method // Arabian Journal for Science and Engineering. 2020. Vol. 45, iss. 3. Pp. 1897–1909. DOI: 10.1007/s13369-019-04280-0

**18. Улахович Д.А.** Основы теории линейных электрических цепей: учеб. пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 816 с.

**19. Бессонов Л.А.** Теоретические основы электротехники, электрические цепи: учебник для бакалавров. 12-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2016. 701 с.

## References

**1. Levin, A.V., Khalyutin, S.P., Zhmurov, B.V.** (2015). Trends and prospects of aviation equipment development. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 213 (3), pp. 50–57. (in Russian)

**2. Gruzkov, S.A., Rummyantsev, M.Yu.** (2016). Full electrification of aircraft as one of the most important ways to solve environmental issues and to improve the operational economical fuel and energy efficiency of air transport. *Izvestiya Akademii elektrotekhnicheskikh nauk RF*, issue 18, pp. 35–60. (in Russian)

**3. Pavlova, V.I., Khalyutin, S.P.** (2021). Diagnostics of the state of secondary power supplies input circuits parameters based on analyti-

cal expressions. *International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM*, pp. 305–309. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507642

**4. Zhmurov, B.V.** (2010). Development potentials of drones' electric power systems. *Innovatsii na Osnove Informatsionnykh i Kommunikatsionnykh Tekhnologiy*, no. 1, pp. 231–234. (in Russian)

**5. Prilepskiy, V.A., Koptev, V.N.** (2011). Condition monitoring and troubleshooting of aviation electrical systems and flight navigation systems: Tutorial. Samara: SGAU im. S.P. Koroleva, 102 p. (in Russian)

**6. Durnev, V.V., Mukhin, I.E., Seleznev, S.L., Mirzayanov, F.M.** (2014). Principal lines of development of fault detection system and aircraft technical state detection. *Innovatsii*, no. 9 (191), pp. 110–113. (in Russian)

**7. Vorobyov, V.G., Konstantinov, V.D.** (2010). Reliability and technical diagnostics of aviation equipment: Textbook. Moscow: MGTU GA, 448 p. (in Russian)

**8. Savelov, A.A., Davidov, A.O.** (2019). Experimental researches of local power management units for monitoring the status of electrical equipment. *Elektropitaniye*, no. 2, pp. 6–21. (in Russian)

**9. Zhmurov, B.V.** (2018). Aircraft power supply system design process as an automation object. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 21, no. 1, pp. 88–103. (in Russian)

**10. Babak, A.V.** (2018). Analysis of methods and means of technical diagnostics of aviation equipment. *Problemy Nauki*, no. 7 (127), pp. 31–34. (in Russian)

**11. Khalyutin, S.P.** (2020). Aircraft electrical power distribution system – equipment diagnostics and prognostics center. *Elektropitaniye*, no. 2, pp. 4–14. (in Russian)

**12. Savelov, A.A., Reshetov, S.A. et al.** (2018). Development of a demonstrator system for monitoring, diagnosing, predicting the technical state of electricity consumers. *Otchet o NIR MGTU GA*, 120 p. (in Russian)

**13. Savelov, A.A.** (2018). Application for local load control centers for monitoring of electricity consumer. *Elektropitaniye*, no. 1, pp. 4–13. (in Russian)

14. **Mashoshin, O.F.** (2007). Diagnostics of aviation equipment: Tutorial. Moscow: MGTU GA, 141 p. (in Russian)

15. **Pavlova, V.I., Khalyutin, S.P., Save-  
lov, A.A., Davidov, A.O.** (2019). Monitoring and diagnostics of the technical condition of built-in power sources of aviation equipment. *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM*, pp. 464–468. DOI: 10.1109/EDM.2019.8823092

16. **Chernodarov, A.V.** (2017). Control, diagnostics and identification of aviation devices and computing measuring systems. Moscow: Nauchtehlitizdat, 300 p. (in Russian)

17. **Eulджи, А., Тенти, А., Бодгхене, S.A.** (2020). A novel modelling approach of RLC electrical circuits for symbolic circuit analysis by the direct topological method. *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 45, issue 3, pp. 1897–1909. DOI: 10.1007/s13369-019-04280-0

18. **Ulakhovich, D.A.** (2009). Fundamentals of the theory of linear electrical circuits: Tutorial. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 816 p. (in Russian)

19. **Bessonov, L.A.** (2016). Theoretical foundations of electrical engineering, electrical circuits: Textbook for Bachelors. 12th ed. ispr. i dop. Moscow: Yurayt, 2016. 701 p. (in Russian)

### Сведения об авторах

**Павлова Виктория Игоревна**, аспирант кафедры электротехники и авиационного электрооборудования МГТУ ГА, kviki6819@gmail.com.

**Старостин Игорь Евгеньевич**, доктор технических наук, профессор кафедры электротехники и авиационного электрооборудования МГТУ ГА, starostinigo@yandex.ru.

### Information about the authors

**Viktoriia I. Pavlova**, Postgraduate Student of the Electrical Engineering and Aviation Electrical Equipment Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, kviki6819@gmail.com.

**Igor E. Starostin**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Electrical Engineering and Aviation Electrical Equipment Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, starostinigo@yandex.ru.

Поступила в редакцию 20.02.2023  
Принята в печать 25.05.2023

Received 20.02.2023  
Accepted for publication 25.05.2023