ОТЗЫВ

дополнительного члена диссертационного совета ДС.ТПУ.12 **Обухова Сергея Геннадьевича** на диссертационную работу **Козлова Романа Викторовича** на тему «Оптимизация энергомассовых характеристик системы электропитания геостационарного космического аппарата» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

1. Структура и объем диссертации.

Диссертация включает введение, четыре главы, заключение, список литературы из 87 наименований, 2 приложения. Основное содержание работы изложено на 176 страницах машинописного текста, содержит 67 рисунков, 25 таблиц. Автореферат отражает содержание диссертационной работы в необходимом объеме.

2. Анализ содержания диссертационной работы.

Во **введении** приведено обоснование актуальности диссертационной работы, поставлены цели и задачи исследования. Сформулирована научная новизна и практическая значимость выполненных исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведен краткий обзор существующих систем электропитания (СЭП) геостационарных космических аппаратов (КА), показаны преимущества и недостатки различных структурных схем. Представлены новые схемы СЭП с применением в составе энергопреобразующей аппаратуры (ЭПА) мостовых резонансных преобразователей. Приведено описание методики задания требований к СЭП. Предложено использовать в качестве критерия оптимизации СЭП геостационарного КА его энергомассовые характеристики. Сформулированы требования к разработке имитационной модели СЭП для расчета энергетического баланса КА.

Во **второй главе** рассматривается построение математической и имитационной моделей СЭП и ее составных частей. Предложены имитационные модели для исследования статических режимов работы солнечной батареи (БС) и аккумуляторной батареи (АБ), учитывающие нестационарность их характеристик с возможностью масштабирования количественного состава фотопреобразователей и аккумуляторов. Приведена методика оценки параметров энергетической эффективности ЭПА. Разработан программный продукт, реализующий имитационную математическую модель СЭП. Адекватность предложенной имитационной модели СЭП подтверждена путем сравнения результатов вычислительного эксперимента с результатами тестовой циклограммы нагрузки, полученной экспериментальным путем.

В **третьей главе** приведена методика и алгоритм оптимизации энергомассовых характеристик СЭП, продемонстрированы результаты оптимизации для трех вариантов выходной мощности СЭП геостационарного КА. Сформированы функции расчета массы силовой части (СЧ) СЭП, позволяющие получить расчетные выражения для определения энергетического баланса геостационарного КА. Показано, что энергомассовые характеристики СЭП могут быть оптимизированы в заданном диапазоне изменений параметров составных частей СЭП, а именно: количества последовательно соединенных фотоэлектрических преобразователей (ФП) в БС и аккумуляторов в АБ. Сформулированы требования к СЭП, обеспечивающие достижение максимальной выходной удельной мощности в заданном диапазоне изменения параметров СЭП.

В **четвертой главе** рассмотрены средства и результаты экспериментальных исследований, направленных на подтверждение адекватности разработанных моделей и методик. Подтверждена адекватность разработанных моделей. Показана корреляция между тенденциями изменения параметров СЭП, обеспечивающих достижение максимальной удельной выходной мощности для результатов моделирования и реальных образцов СЭП. Сравнительный анализ результатов расчета оптимальных параметров СЭП с

характеристиками экспериментальных образцов СЭП геостационарных КА подтверждает достоверность полученных результатов оптимизации.

В **заключении** изложены основные результаты диссертационного исследования, отражающие решение поставленных задач.

Проведенный анализ содержания диссертационной работы свидетельствует о том, что диссертация Козлова Романа Викторовича является завершенной квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной научной задачи. Диссертация написана ясным и содержательным языком, принятая терминология и стиль соответствует общепринятым нормам.

3. Актуальность темы исследования для науки и практики.

Диссертационная работа Р.В. Козлова посвящена исследованию возможности повышения удельной выходной мощности СЭП геостационарного КА за счет системных преимуществ использования в составе СЭП новых структурных схем с применением в качестве силовых регуляторов мостовых резонансных преобразователей с гальванической развязкой. Предложенный способ оптимизации за счет варьирования количества последовательно соединенных элементов в БС и АБ во многом обеспечивает решение обозначенной проблемы. Это позволяет считать ее своевременной и актуальной.

4. Соответствие диссертации и автореферата паспорту специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

В диссертации представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, позволяющие изучить системные свойства, выполнить математическое и имитационное моделирование солнечной и аккумуляторной батарей, ЭПА СЭП КА в статических режимах работы (пункт 1), обосновать технические требования, обеспечивающие достижение максимальной удельной выходной мощности СЭП геостационарного КА (пункт 2), провести оптимизацию энергомассовых характеристик СЭП для достижения максимальной удельной выходной мощности (пункт 3).

5. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна.

Основными научными и наиболее важными результатами диссертационной работы являются:

а) структура СЭП с применением в качестве регуляторов ЭПА мостовых резонансных преобразователей с гальванической развязкой шин БС и АБ от нагрузки;

б) имитационная модель СЭП для статических режимов работы, позволяющая осуществить расчет энергетического баланса КА для заданной мощности нагрузки, обладающая свойством масштабируемости по количеству элементов в составных частях СЭП (БС, АБ, ЭПА, ПКЗ АБ);

в) методика оценки энергетической эффективности ЭПА, определяющая с погрешностью не более 1,5% параметры силовых преобразователей ЭПА при расчете энергетического баланса КА во всем диапазоне рабочих напряжений БС и АБ;

г) методика оптимизации энергомассовых характеристик СЭП, обеспечивающая достижение ее максимальной удельной мощности в заданном диапазоне изменения количества последовательно соединенных фотопреобразователей в БС и аккумуляторов в АБ.

Степень обоснованности и достоверности полученных научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным применением известных теоретических методов, сопоставлением с результатами экспериментальных исследований, тщательным анализом и оценкой принятых исходных данных и полученных результатов. Основные выводы и результаты работы теоретически обоснованы и получены автором впервые.

Результаты исследований обсуждались на международных и всероссийских конференциях, по результатам работы опубликовано достаточное количество научных работ.

6. Практическая значимость работы.

а) получены расчетные значения количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ и фотопреобразователей в БС, удовлетворяющие условию положительного энергетического баланса геостационарного КА и обеспечивающие максимальную удельную мощность СЭП;

б) создана вычислительная программа в пакете Matlab Simulink для моделирования энергетических процессов в статических режимах работы СЭП с возможностью масштабирования количественного состава ее элементов.

Результаты диссертационной работы в виде проектных требований к характеристикам СЭП геостационарного КА, методики оценки параметров энергетической эффективности ЭПА и имитационной модели СЭП для расчета энергетического баланса КА используются в рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева» (г. Железногорск).

7. Апробация диссертационной работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях:

XXI Международная научно-практическая конференция «Решетневские чтения» (Красноярск, 2017 г.);

XX научно-техническая конференция молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства» (АО «НПЦ «Полюс», г. Томск, 2018 г.);

XX научно-техническая конференция «Электронные и электромеханические системы и устройства» (АО «НПЦ «Полюс», г. Томск, 2020 г.);

XXI международной конференции молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам (EDM 2020)» (дистанционно, 2020 г.);

8. Подтверждение опубликования основных положений и результатов диссертации.

Результаты выполненных исследований отражены в 14 научных работах, в том числе: 4 публикациях в изданиях, входящих в перечень ВАК для диссертаций, 3 патентах РФ, 1 свидетельстве на программу для ЭВМ, 1 публикации в индексируемых базах Scopus и Web of Science, 5 публикациях в сборниках материалов научно-технических конференций.

9. Основные замечания по работе.

В целом содержание диссертационной работы Козлова Романа Викторовича, ее основные положения, выводы и результаты возражений не вызывают. Однако, можно сделать следующие замечания:

1. На стр. 45, в выражении (2.1) автор использует для обозначения фототока символы I_{SC} и далее по тексту утверждает, что величину фототока можно приравнять к току КЗ, ввиду их малого по величине различия. Во первых, выбранное обозначение фототока неудачно, так как его принято использовать для обозначения тока КЗ, что кстати и делает сам автор в дальнейшем, например в уравнении (2.6). Во вторых, величина фототока I_{PH} зависит от солнечной инсоляции λ и рабочей температуры ФП T_C, и связывается с током КЗ известным выражением:

$$I_{PH} = \left[I_{SC} + I_{SC} \cdot k_I \cdot \left(T_C - T_R \right) \right] \cdot \lambda ,$$

где I_{SC} – ток короткого замыкания фотоэлектрического преобразователя при стандартных условиях; K_I – температурный коэффициент тока короткого замыкания ФП (из технической спецификации), %/°С; T_R – температура ФП при стандартных условиях; λ – величина солнечной инсоляции, о.е. С учетом того, что БС геостационарного КА эксплуатируется в

широком диапазоне изменения температур и освещенности, реальная разница значений между фототоком и током КЗ может быть весьма существенной.

2. При анализе потерь в силовых преобразователях ЭПА (стр. 57) автор принимает допущение, что потери в реактивных элементах (дроссели/трансформаторы и ёмкостные фильтры) линейно зависят от выходной мощности ЭПА. При этом не обосновано, почему автор принимает данное допущение, так как представляется, что более точным будет определение потерь через квадрат выходного тока.

3. На рис. 3.1, стр. 97 представлен график зависимости суммарной массы модуля разрядного устройства (МРУ) от величины входного напряжения в диапазоне от 0 до 160 В. Непонятно, зачем автор использует данный диапазон напряжений, если согласно данным табл. 3.8 (стр. 96) величина входного напряжения МРУ может варьироваться в пределах от 67 до 94 В.

4. В таблицах 3.8 (стр.96) и 3.9 (стр.99) приведены характеристики МРУ и МЗУ соответственно, при этом значения минимального и максимального рабочего напряжения АБ для них приняты разными, причем для МРУ они выше. По всей видимости, они должны быть одинаковыми, или, по крайней мере, для МЗУ эти значения должны быть больше.

10. Общее заключение о соответствии выполненной работы требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Полученные результаты исследований и выводы доказывают, что Козлов Роман Викторович выполнил актуальную научно-исследовательскую работу по решению задач применения алгоритмов и структур для повышения эффективности электротехнических комплексов и систем, имеющей важное прикладное значение для развития, проектирования и эксплуатации СЭП геостационарных КА.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполнена автором единолично, имеет научную новизну и практическую значимость. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Основные результаты диссертации достаточно полно отражены в 14 научных работах автора.

Таким образом, диссертационная работа Козлова Романа Викторовича «Оптимизация энергомассовых характеристик системы электропитания геостационарного космического аппарата», по уровню, объему и значимости соответствует требованиям п.п. 8, 9 Порядка присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

Дополнительный член диссертационного совета ДС.ТПУ.12,
доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики
и электротехники Инженерной школы энергетики
Национального исследовательского Томского политехнического университета
Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30,
ФГАОУ ВО НИ ТПУ, ИШЭ, ОЭЭ
тел. (382-2) 701-777, доп.1942,
e-mail: serob@tpu.ru

_____ Сергей Геннадьевич Обухов

27.10.21 г.

Подпись С.Г. Обухова заверяю:
Ученый секретарь НИ ТПУ _____ Кулинич Екатерина Александровна