

ПЛОДОТВОРНОМУ СОТРУДНИЧЕСТВУ АО «КОРПОРАЦИЯ «ВНИИЭМ» И АО «НПО им. С.А. ЛАВОЧКИНА» – 60 ЛЕТ

ON 60TH ANNIVERSARY OF FRUITFUL COOPERATION BETWEEN VNIIEM CORPORATION, JSC AND LAVOCHKIN ASSOCIATION, JSC

И.Р. Халилюлин¹,
vniiem@vniiem.ru;
I.R. Khalilyulin

Л.А. Макриденко¹,
доктор технических наук,
vniiem@vniiem.ru;
L.A. Makridenko

В.Я. Геча¹,
профессор, доктор технических наук,
vniiem@vniiem.ru;
V.Ya. Gecha

А.Б. Желубенкова¹,
vniiem@vniiem.ru;
A.B. Zhelubenkova

С.В. Медусhev¹,
vniiem@vniiem.ru;
S.V. Medushev

А.Н. Аронзон¹,
кандидат технических наук,
vniiem@vniiem.ru;
A.N. Aronzon

В статье рассматриваются различные бортовые системы космических аппаратов разработки АО «НПО Лавочкина» и АО «Корпорация «ВНИИЭМ», созданные за 60 лет научного сотрудничества.

Ключевые слова:
система ориентации солнечных батарей;
гибридный шаговый двигатель;
блок привода;
вращающееся контактное устройство;
сотовые панели;
тепловые трубы.

The article covers various onboard spacecraft systems by Lavochkin Association, JSC and VNIIEM Corporation, JSC developed over 60 years of scientific cooperation.

Key words:
solar panels attitude control system;
hybrid stepper;
actuating unit;
rotary connection;
honeycomb panels;
heat pipes.

DOI: 10.26162/LS.2025.67.1.004

Плодотворное творческое сотрудничество между АО «Корпорация «ВНИИЭМ» и АО «НПО Лавочкина» продолжается почти 60 лет.

Сегодня многие космические аппараты (КА) разработки НПО Лавочкина имеют в своём составе системы ориентации солнечных батарей (СОСБ) разработки ВНИИЭМ.

В 1968 году главный конструктор ОКБ НПО Лавочкина Г.Н. Бабакин обратился к директору ВНИИЭМ А.Г. Иосифьяну с предложением разработать автономную СОСБ для КА «ОКО-1» одноименной спутниковой системы из четырёх спутников, входившей в космическую систему предупреждения о ракетном нападении (КСПРН).

Для выполнения этой задачи понадобилось обеспечить трёхосную ориентацию КА с точной стабилизацией корпуса КА по каждой оси. В качестве критерия точности стабилизации было выбрано значение отклонения угловой скорости от заданной, величина которого относительно каждой оси не более $1 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ/\text{с}$. Для такого аппарата надо было создать невозможную

ую прецизионную систему ориентации солнечных батарей (СБ). Проектанты КА согласны были отдать только седьмую часть общего допуска ($0,15 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ/\text{с}$) на значение скорости возмущённого движения корпуса, возникающей при движении СБ. Компонировка КА из-за громадной бленды телескопа была такой, что момент инерции СБ относительно оси вращения в 2,5 раза превышал момент инерции корпуса КА (1650 и 650 $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ соответственно).

СОСБ (система 5А59) состояла из блока привода В16, блока логики В14, блока управления В15 и четырёх блоков датчиков Солнца (В12), расположенных на траверсе СБ.

В конструкцию электромеханического блока привода было внесено столько нового и оригинального, что её следует описать подробно.

К основным техническим решениям, найденным при создании блока В16, следует отнести: применение в качестве выходного звена редуктора герметичной волновой передачи, введение точной подстройки момента инерции компенсирующего маховика под за-

¹ АО «Корпорация «ВНИИЭМ», Россия, г. Москва.

VNIIEM Corporation, JSC, Russia, Moscow.

данный момент инерции СБ, создание трёхскоростного приводного агрегата, разработку специальной конструкции предохранительной фрикционной муфты и конструкции кабельного барабана, обеспечившего угол поворота выходного вала на 520 угл. град.

Электромеханический блок (ЭМБ) привода приведён на рисунке 1.

Компенсирующий маховик 1 обеспечивает при помощи съёмных юстировочных колец 2 настройку момента инерции под заданный момент инерции СБ в пределах 10% от номинального значения с дискретностью 1%. Приводной агрегат 3 выполнен из двух двигателей переменного тока, имеющих общий ротор – один из них (Д1) асинхронный с частотой вращения 4500 об/мин 4, другой (Д2) – асинхронный с дуговым статором 5, активной частью ротора у последнего служит обод маховика. Частота вращения, обеспечиваемая этим двигателем в установившемся режиме работы, 300 об/мин. В состав приводного агрегата входит тормозное устройство (УТ) 17, активной частью которого также является маховик, и тахогенератор 18, служащий для выдачи информации о скорости вращения приводного агрегата. Такая структура приводного агрегата позволяет обеспечить три скорости вращения блока: ω_1 – одновременным включением двигателя Д1

и тормозного устройства УТ; ω_2 – включением двигателя Д1; ω_3 – включением двигателя Д2, а также режим торможения при включении УТ. Кратность скоростей $\omega_3/\omega_1=300$.

Передача вращающего момента осуществляется через цилиндрический 6 и волновой 7 редукторы. Применение волнового редуктора в качестве выходного звена позволило существенно увеличить жёсткость и уменьшить люфт кинематической цепи по сравнению с блоком привода (БП) СОСБ КА «МЕТЕОР», в котором выходным звеном является магнитная муфта.

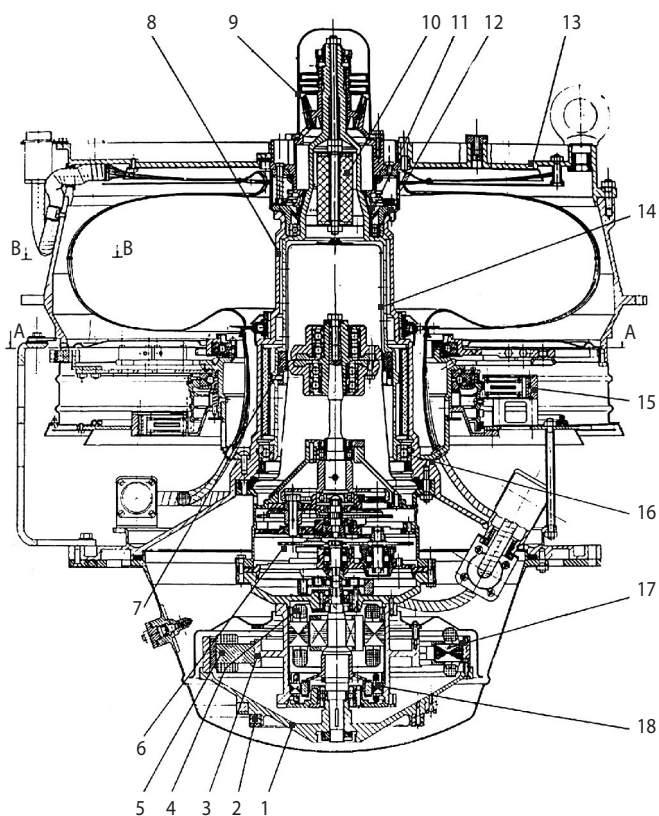
Для предохранения передачи от поломки при приложении к выходному валу крутящего момента, превышающего допустимое значение, в кинематическую цепь привода включена двухконусная фрикционная предохранительная муфта 9.

Маска магнитомодуляционных датчиков углового положения выходного вала БП 15 расположена на выходном валу после муфты, благодаря чему информация об истинном положении выходного вала не теряется даже при несанкционированном провороте муфты.

Быстроходные элементы БП, расположенные в герметичной полости, ограниченной корпусом 8 и гибким колесом 14, работают в условиях нормального атмосферного давления; тихоходные элементы блока – предохранительная муфта 9, подшипники выходного вала 12, 16, расположенные в полости над гибким колесом, – работают в среде микроклимата, создаваемого за счёт испарения смазки ЦИАТИМ-221, размещённой в контейнере 10. Эта полость отделена от окружающей среды сильфонным уплотнением 11.

Для обеспечения требуемого угла поворота вала ЭМБ 520° разработана специальная конструкция кабельного барабана 13, позволяющая существенно уменьшить скачки момента сопротивления вращению за счёт отказа от жгутов, связывающих СБ с потребителями электроэнергии, расположенными на корпусе КА, как это имело место в ранее разработанных блоках. В данной конструкции электрическая связь СБ и потребителей осуществляется через пелену проводов, имеющих возможность закрутки при вращении кабельного барабана.

2 октября 1973 года был осуществлён запуск КА «ОКО-1», на котором была установлена система 5А59. В последующие два года БП был несколько модернизирован. По нашему заказу ФГУП «Научно-исследовательский институт прецизионного приборостроения» (НИИ ПП) разработал гибкий подшипник, который позволил существенно уменьшить массу и улучшить характеристики генератора волн редуктора. В 1978 году были проведены межведомственные испытания системы 5А59. В 1979 году



рисунк 1. Электромеханический блок привода

в составе КА «ОКО-1» система 5А59 была принята на вооружение. Испытания подтвердили выполнение всех требований ТЗ на СОСБ и нечувствительность научной аппаратуры к динамическим воздействиям на неё, возникающим в процессе разгона и торможения привода СОСБ. За всё время эксплуатации (более 38 лет) СОСБ 5А59 на всех КА работала без замечаний.

У сотрудников ВНИИЭМ, выполнявших эту работу, сложились не только деловые, но и дружеские отношения с начальником комплекса 400 С.Д. Куликовым, в дальнейшем (с 1996 по 2003 год) – генеральным конструктором и генеральным директором НПО Лавочкина, его заместителем А.Г. Ушаковым, главным конструктором космических систем прикладного назначения А.Г. Чесноковым, а также с нашими кураторами – отделом, возглавляемым Н.Д. Капыриным, и входящей в этот отдел лабораторией, возглавляемой В.Н. Байкиным. Нашими непосредственными кураторами были Ю.Г. Ахтырко и Н.Я. Яшуничкин. Мы продолжали тесно сотрудничать с лабораторией динамики, возглавляемой Ю.В. Рыбачуком, выполняя совместные расчёты с Ю.Г. Алдошкиным, А.Н. Давыдовым, Н.А. Шароновой и И.И. Темновым. Отработка системы в лаборатории входного контроля и МИК осуществлялась совместно с Г.Т. Юрановым, В.И. Малининым, Т.Б. Шиховцевой.

Основной вклад в создание указанных систем внесли сотрудники ВНИИЭМ: В.Я. Авербух, Н.Я. Альпер, А.Д. Беленький, Д.М. Вейнберг, Ю.М. Гандлевский, Н.М. Грузов, Н.Н. Данилов-Нитусов, С.П. Дмитриев, Т.А. Ермилова, С.Н. Лерман, В.М. Лурье, Г.Л. Людин, О.М. Мирошник, К.К. Попов, С.И. Скутельский, Г.Н. Турунов, М.Н. Фиалков, Э.М. Хроменко, А.И. Чашник, А.Н. Шечков, С.К. Эйтминович, В.М. Ярцев.

В начале 1978 года НПО Лавочкина была начата разработка системы УС-КМО. КА этой системы должны были работать на стационарной орбите, поэтому потребовалось создание СОСБ с приводом кругового вращения.

Ранее ВНИИЭМ было предписано создание СОСБ с приводом кругового вращения для многоцелевой космической системы наблюдения (МКСН), поэтому мы приступили к поисковым работам по созданию кольцевого токосъёмника, однако от разработки его рабочего образца были ещё далеки. В то же время в НПО Лавочкина группой конструкторов под руководством Л.Н. Михайлова и электротехником Б.Н. Яшиным был разработан токосъёмник с круговым вращением.

Было принято решение об использовании этого токосъёмника (КТИ-16) в СОСБ 52В6.

Главным конструктором КА был назначен А.Л. Родин. Эта разработка на многие годы нас тесно связала

со специалистами НПО Лавочкина: А.М. Баклуновым, В.С. Федоровым, В.Г. Сумцовым, В.М. Сударевым, А.А. Яриловым, Л.В. Рудковским, А.А. Флоридовым и многими другими.

СОСБ 52В6 КА 71Х6 (Авербух В.Я., Беленький А.Д., Вейнберг Д.М., Шереметьевский Н.Н., 1986) состоит из двух подсистем И10, в каждую из которых входят электромеханический блок И16, блок управления И15 и блок датчиков Солнца И12.

Блок И16 состоит из двигателя постоянного тока, на валу которого установлены компенсирующий маховик, маска датчика оборотов и датчика положения ротора, цилиндрического и волнового редуктора, перегрузочной муфты, датчика углового положения выходного вала и вращающегося контактного устройства (ВКУ). Двигатель ЭМБ является бесконтактным трёхфазным двигателем постоянного тока с возбуждением от редкоземельных постоянных магнитов типа КС-37А и имеет беспазовую конструкцию якоря. Угловое положение выходного вала ЭМБ определяется с помощью четырёх магнитомодуляционных датчиков, закреплённых в гнездах корпуса привода.

Выходной вал цилиндрического редуктора несёт на себе кулачковый генератор волн (деформатор) волнового редуктора. Основой генератора волн служит профильный кулачок, имеющий строго рассчитанную овальную форму. На кулачок насажен гибкий шарикоподшипник, разработанный НИИ ПП по заказу ВНИИЭМ. Под действием кулачка внешнее кольцо подшипника принимает овальную форму и деформирует гибкое колесо волнового редуктора, имеющего 206 зубьев, которое, входя в зацепление с жёстким колесом, имеющим 208 зубьев, обеспечивает передаточное отношение волнового редуктора $\gamma_{в,р}=104$. Гибкое колесо изготовлено в герметичном исполнении, благодаря чему все быстроходные элементы кинематической цепи блока работают в нормальной воздушной атмосфере. Диаметр волнового колеса уменьшен до 60 мм (на блоке В16 – 80 мм), что позволило существенно снизить массу и габариты блока.

С волнового редуктора вращающий момент передаётся главному выходному валу, входящему в состав токосъёмника ВКУ, через двухконусную фрикционную предохранительную муфту. Ведущей частью фрикционной муфты является жёсткое колесо волнового редуктора, имеющее в своей верхней части коническую поверхность и насаженный на жёсткое колесо нажимной конус. Муфта имеет две конические кольцевые поверхности, усилие трения на которых создаётся и регулируется с помощью гайки, воздействующей на подвижный нажимной конус через плоские кольцеобразные пружины, обеспечивающие стабильность давления на поверхности трения при температурных деформациях элементов муфты.

Ведомым элементом муфты является стакан, закреплённый на валу ВКУ. Стакан изготовлен из бронзы БрАЖ-9-4 и имеет два внутренних конуса, которые так же, как и сопряжённые с ними конические поверхности жёсткого колеса и нажимного конуса, натираются диселенидом молибдена MoSe_2 , имеющим высокую стабильность момента трения.

При изготовлении блока предохранительная муфта регулируется на момент срыва 9,6 Н·м. Таким образом обеспечивается надёжная защита самого слабого звена кинематической цепи привода – гибкого колеса волнового редуктора – при превышении допустимых внешних крутящих моментов, которые могут возникнуть при стыковке к блоку СБ или в процессе штатной эксплуатации при цеплянии СБ за элементы конструкции корпуса, например при старении и разрушении электровакуумной изоляции.

Угловое положение выходного вала ЭМБ определяется с помощью четырёх магнитомодуляционных датчиков, закреплённых в гнездах корпуса привода. Подвижный магнитный экран закреплён на валу ВКУ. Датчики расположены через угол 90° относительно друг друга. Электрическая энергия и телеметрические сигналы от СБ к нагрузкам и приёмникам сигналов, расположенным на корпусе КА, передаются при помощи кольцевого токосъёмника КТИ-16, разработанного НПО Лавочкина.

КТИ-16 состоит из 28 внутренних и наружных обойм и набора подпружиненных контактных колец, расположенных между ними. Он представляет собой набор своеобразных подшипников качения. При вращении вала вместе с ним вращается внутренняя обойма и катит по неподвижной внешней обойме контактные кольца, которые всегда образуют непрерывную связь между ними.

Каждая контактная пара способна пропустить через себя ток от 10 мкА до 15 А, причём именно золотое покрытие обеспечивает надёжное пропускание минимального тока.

В 1991 году с космодрома «Байконур» был запущен на геостационарную орбиту первый спутник нового поколения системы предупреждения о ракетном нападении (СПРН) «ОКО-2», получивший название «КОСМОС-2133». В дальнейшем система была принята на вооружение.

Основной вклад в создание указанных систем внесли сотрудники ВНИИЭМ: В.Я. Авербух, А.Д. Беленький, Д.М. Вейнберг, Н.М. Грузов, Т.А. Ермилова, С.Н. Лерман, Э.А. Лещинский, А.Б. Новиков, Ф.С. Ортенберг, К.К. Попов, Г.Н. Турунов, Э.М. Хроменко, А.И. Чашник, А.Н. Шечков, М.Ю. Щетинин, В.М. Ярцев.

Указанная разработка послужила основой для создания СОСБ КА «Купон». В процессе создания этих СОСБ возникла необходимость в измерении

возмущающих моментов, передаваемых со стороны приводов на корпус КА, к точности динамической стабилизации которого предъявлялись высокие требования. В совместных теоретических и экспериментальных исследованиях по этой проблеме, создании специализированного измерительного стенда (Малаховский Е.Е., 1997; Малаховский Е.Е., Позняк Э.Л., Шуляка А.А., 1995) принимали участие сотрудники ВНИИЭМ: В.Я. Геча, Е.Е. Малаховский, Э.Л. Позняк и сотрудники НПО Лавочкина В.Ю. Ермаков, П.П. Телепнев, А.М. Савостьянов.

В 1986 году по техническому заданию НПО Лавочкина ВНИИЭМ разработал СОСБ для больших КА с двухкоординатным приводом с круговым вращением (СОСБ 14М42).

Главным конструктором КА был назначен В.Н. Тимофеев. Под руководством А.Г. Ушакова разрабатывалось техническое задание, Ю.Г. Алдошкин определял основные требования, предъявляемые к СОСБ для обеспечения необходимых динамических свойств КА.

В число основных требований, предъявляемых к СОСБ 14М42, получившей название Н10, входят:

- обеспечение кругового вращения относительно двух осей;
- обеспечение точного выполнения программы движения (допустимая погрешность отклонения фактической скорости вращения от программной в пределах 40° угл. с за 12 временных с);
- большая масса (свыше 500 кг) и большой момент инерции СБ, равный $14500 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, что примерно в 100 раз превышает момент инерции СБ КА 71Х6 и в 8 раз превышает момент инерции СБ КА «ОКО-1»;
- управление работой СОСБ осуществляется от управляющего информационно-вычислительного комплекса (УИВК) по определённому закону движения, в который входят сведения о заданном угле, мгновенной скорости движения, ускорении и первой производной от ускорения;
- передача через токосъёмники большой мощности – 12 кВт при пиковой мощности до 16 кВт при напряжении от 30 до 80 В;
- ограничение массы системы до 100 кг.

Поставленная задача потребовала от нас многих нестандартных подходов и поиска оптимальных решений. Главной задачей при определении принципа управления двухкоординатной СОСБ явилось обеспечение возможности выбора различных законов движения выходного вала относительно каждой из двух осей поворота при различных орбитальных и других эксплуатационных условиях. Выбранный оптимальный закон рассчитан на реализацию заданной программы с помощью бортового управляющего информационно-вычислительного комплекса КА

по исходной информации, поступающей из его служебных систем.

Разработанная СОСБ (Авербух В.Я., Лещинский Э.А., Стома С.А., 1996) состояла из двухкоординатного электромеханического блока привода Н16, блока управления Н15 и периферийного адаптера обмена ПАО (изделие 17М223-2) разработки НИИ – Научный центр (Зеленоград).

Основной вклад в создание указанных систем внесли сотрудники ВНИИЭМ: В.Я. Авербух, В.Я. Геча, Е.М. Гнутов, Н.Н. Данилов-Нитусов, Э.А. Лещинский, С.В. Медушев, Г.Н. Турунов, В.В. Федоров, А.И. Чашник.

В 2002 году по техническому заданию, выданному НПО Лавочкина, нами был разработан эскизный проект по созданию системы ориентации солнечной батареи для геостационарного КА второго поколения «ЭЛЕКТРО-Л». В дальнейшем СОСБ – система Э10 (Абдурагимов А.С., Авербух В.Я., Аронзон А.Н., Большакова Л.П., 2017), созданная с использованием технических решений этого эскизного проекта, получила унифицированное применение в составе КА, разрабатываемых НПО Лавочкина на базе универсальной космической платформы (УКП) «Навигатор-М», – как в составе КА дистанционного зондирования Земли, таких как «ЭЛЕКТРО-Л» № 1–5, «АРКТИКА-М» № 1 и 2, так и в составе КА научного назначения – КА «СПЕКТР-Р», «СПЕКТР-РГ», «СПЕКТР-УФ». Наибольший срок эксплуатации система Э10 имеет в составе КА «ЭЛЕКТРО-Л» № 2, выведенного на орбиту 11.12.2015.

Эта работа свела нас с целым рядом специалистов со стороны заказчика – К.М. Пичхадзе, В.Е. Бабышкиным, К.Г. Сухановым, С.И. Поликарповым, С.А. Немыкиным, П.Н. Жестковым, А.Б. Волгиной, Л.П. Большаковой, М.С. Сахацкой, Д.В. Бабышкиным, Н.Н. Алешиным, А.М. Крайновым и другими.

Во всех СОСБ нового поколения (Авербух В.Я., Лещинский Э.А., 2005), разрабатываемых во ВНИИЭМ, применялись в составе систем малогабаритные электроприводы с двухфазным шаговым электродвигателем. Масса этих электроприводов доведена до 5–7 кг, что существенно ниже массы электроприводов первых разработок СОСБ. Применённые шаговые электродвигатели достаточно просты в управлении. Управление обеспечивается с помощью полупроводниковых преобразователей, включённых в состав блоков управления СОСБ. Требуемому в процессе работы СОСБ направлению движения вала электропривода соответствует прямой или обратный порядок коммутации фаз двигателя, реализуемый в полупроводниковом преобразователе. При этом фазные обмотки статора двигателя питаются импульсным напряжением (током), и от каждого импульса ротор двигателя совершает шаг-поворот на угол $1,8^\circ$.

Новым в электроприводах СОСБ, обеспечивающих неограниченный поворот панелей солнечных батарей и транзитные электрические связи между панелями СБ и системой энергообеспечения КА, является вращающееся контактное устройство, разработанное во ВНИИЭМ. В отличие от применявшихся ранее ВКУ разработки НПО Лавочкина, довольно дорогих и трудоёмких в производстве, в новом кольцевом токосъёмнике за счёт использования последних достижений АО «НИИ электроугольных изделий» в области материалов контактных пар и внедрения оригинальных конструктивных решений наших конструкторов снижены затраты на изготовление и обеспечен стабильный технологический процесс производства.

Фотография унифицированной СОСБ – системы Э10 – приведена на рисунке 2.

Основные разработчики СОСБ, входящих в неё блоков и контрольно-проверочной аппаратуры (КПА): В.Я. Авербух, Н.А. Быкова, Э.А. Лещинский, С.В. Медушев, Е.М. Михайлов, Б.К. Навроцкий, А.Б. Новиков, Г.Н. Турунов, В.В. Федоров, Э.М. Хроменко, М.Ю. Щетинин, В.М. Ярцев, а также представители нового поколения разработчиков – М.А. Михайлов, А.Н. Аронзон, Р.С. Городецкий,



рисунки 2. СОСБ (система Э10) для КА на базе УКП «Навигатор-М»



рисунок 3. Гибридный шаговый двигатель ДШГ-1,8-04

С.В. Папенькин, Н.А. Помелов, И.В. Соколуни, А.И. Красик, А.А. Черобаева.

При разработке остронаправленных антенн (ОНА) КА «СПЕКТР-Р» и «ЭЛЕКТРО-Л» в НПО Лавочкина возникла проблема установки антенны в заданное положение относительно корпуса КА с точностью порядка 1 угл. с. Так как датчик положений, обеспечивающий информацию с указанной выше точностью, представляет собой очень сложное и дорогостоящее устройство, разработчиками антенны (А.А. Моишеевым, Д.А. Тереховым, Н.В. Морозовым) было принято решение применить привод с шаговым двигателем: нулевое положение ОНА определять при помощи точного датчика, а установку в заданное положение антенны осуществлять путём отсчёта числа шагов двигателя от нулевого положения. Нам было выдано техническое задание на создание шагового двигателя ДШГ-1,8-04, к которому предъявлялось основное требование – отсутствие пропуска шагов во всех режимах работы.

Двигатель ДШГ-1,8 (рисунок 3) представляет собой двухфазный гибридный шаговый двигатель с возбуждением от высокоэнергетических постоянных магнитов, выполненных из материалов неодим-железо-бор Nd-Fe-B. Двигатель питается двупольным импульсным напряжением прямоугольной формы с 90-градусным заполнением полупериода.

Момент в гибридном шаговом двигателе создаётся за счёт взаимодействия магнитных полей обмотки статора и постоянного магнита ротора в зубчатой структуре воздушного зазора. Активный момент образуется за счёт сдвига зубцов северного и южного полюсов ротора на половину зубцового деления

(в ДШГ-1,8-04 – на $3^{\circ}36'$). Применение высокоэнергетических постоянных магнитов позволило создать удерживающий момент при отсутствии напряжения питания двигателя.

Гибридный шаговый двигатель ДШГ-1,8-04 обеспечивает момент 500 г·см на частотах до 500 Гц и сочетает достоинства реактивного шагового двигателя (малая величина шага – $1,8^{\circ}$) и шагового двигателя с постоянными магнитами (наличие фиксирующего момента при снятии напряжения питания не менее 50 г·см).

Шаговый двигатель (ШД) с постоянными магнитами при своём вращении на заданной частоте 130 Гц не пропускает шаги, но после снятия питания ротор ШД может остановиться, притянувшись произвольно, упрощённо говоря, к левому или правому соседнему устойчивому положению. Это может привести к ошибке на единицу формируемой программой числа шагов, выдаваемых для установки в следующее положение. Для устранения этого явления разработчиками ДШГ и привода ОНА было принято совместное решение о сохранении питания на одной обмотке двигателя после его остановки (снятия команды на движение привода). При этом был сохранен срок службы двигателя – 15 лет.

Основные разработчики ДШГ-1,8-04: В.Я. Авербух, Н.А. Быкова, Е.М. Михайлов, Б.К. Навроцкий, Э.М. Хроменко, Р.С. Городецкий, А.И. Красик, А.А. Черобаева.

В ноябре 2024 года ВНИИЭМ завершил разработку технического проекта по созданию СОСБ для комплектования КА «АРКТИКА-М» № 3–6. Для создания новой СОСБ предлагается применить положительно зарекомендовавшие себя в унифицированной СОСБ – системе Э10 – технические решения.

В настоящее время ВНИИЭМ принимает участие в разработке дополнения к эскизному проекту по созданию системы ориентации солнечной батареи для третьего поколения геостационарного КА «ЭЛЕКТРО» – КА «ЭЛЕКТРО-М».

Новым направлением для ВНИИЭМ в создании бортовой аппаратуры для КА является разработка СОСБ и двигателей-маховиков с управлением на базе микроконтроллера и связью с бортовым комплексом управления КА по мультиплексному каналу обмена. Первым применением такой аппаратуры в КА разработки НПО Лавочкина является система ориентации солнечной батареи – система ЛР10 – для применения в составе КА «ЛУНА-РЕСУРС-1» (ОА)» и двигатель-маховик ДМ5-50Ц – для КА типа «БЕРКУТ».

Основные разработчики СОСБ нового поколения, блоков, входящих в их состав, а также КПА для испытаний: С.В. Медушев, А.Н. Аронзон, М.А. Михайлов, Б.К. Навроцкий, А.И. Красик, А.А. Черобаева, М.Ю. Щетинин, С.В. Папенькин, В.В. Некрасов,



рисунок 4. ДИ КА «КАНОПУС-В», обезвешенный во время испытаний эффективности гасителей колебаний БФ

Р.С. Городецкий, Н.А. Помелов, И.В. Соколуни, А.С. Медушев, Н.Н. Вдовин.

Основные разработчики двигателей-маховиков с цифровым управлением: С.В. Медушев, В.Н. Кузьмин, В.Н. Кубрак, Е.Ф. Орлова, А.С. Медушев, В.В. Некрасов, Р.С. Городецкий, И.В. Соколуни, М.Ю. Щетинин, Е.В. Осипов, С.В. Папенькин.

Кроме выполнения опытно-конструкторских работ по разработке бортовой аппаратуры для КА, ВНИИ-ЭМ изготавливает и поставляет в НПО Лавочкина

свою серийную продукцию – электродвигатели БК-1316 – применяемые в системе терморегулирования разгонного блока «Фрегат».

Во многих случаях НПО Лавочкина и ВНИИЭМ меняются функциями исполнителя и заказчика.

В качестве исполнителя НПО Лавочкина выполнял или выполняет следующие работы:

- поставку матов экранно-вакуумной теплоизоляции на ранее разрабатываемые КА «МЕТЕОР»;
- поставку переходных адаптеров между КА разработки ВНИИЭМ и разгонным блоком «Фрегат»;
- расчёт полётного задания разгонного блока;
- поставку сотовых панелей, тепловых труб и терморегулирующих покрытий (ТРП) и ряд других.

С 2005 года доля научной компоненты в работах ВНИИЭМ существенно возросла, соответственно, усилилось и взаимодействие между нашими предприятиями в этом направлении.

Например, для удовлетворения требований к космическому аппарату «КАНОПУС-В» по точности динамической стабилизации и сокращения времени, которое требуется КА для совершения программного разворота и успокоения, было принято решение о применении на солнечных батареях этого КА виброгасителей на основе магнитной жидкости, разработанных во НПО Лавочкина (*Красова Н.А., Пугач И.Ю., Рузаков А.Ю.*, 2014). Основными разработчиками и идеологами применения этих устройств являлись А.М. Савостьянов, П.П. Телепнев, А.Ю. Ермаков. Со стороны ВНИИЭМ в моделировании

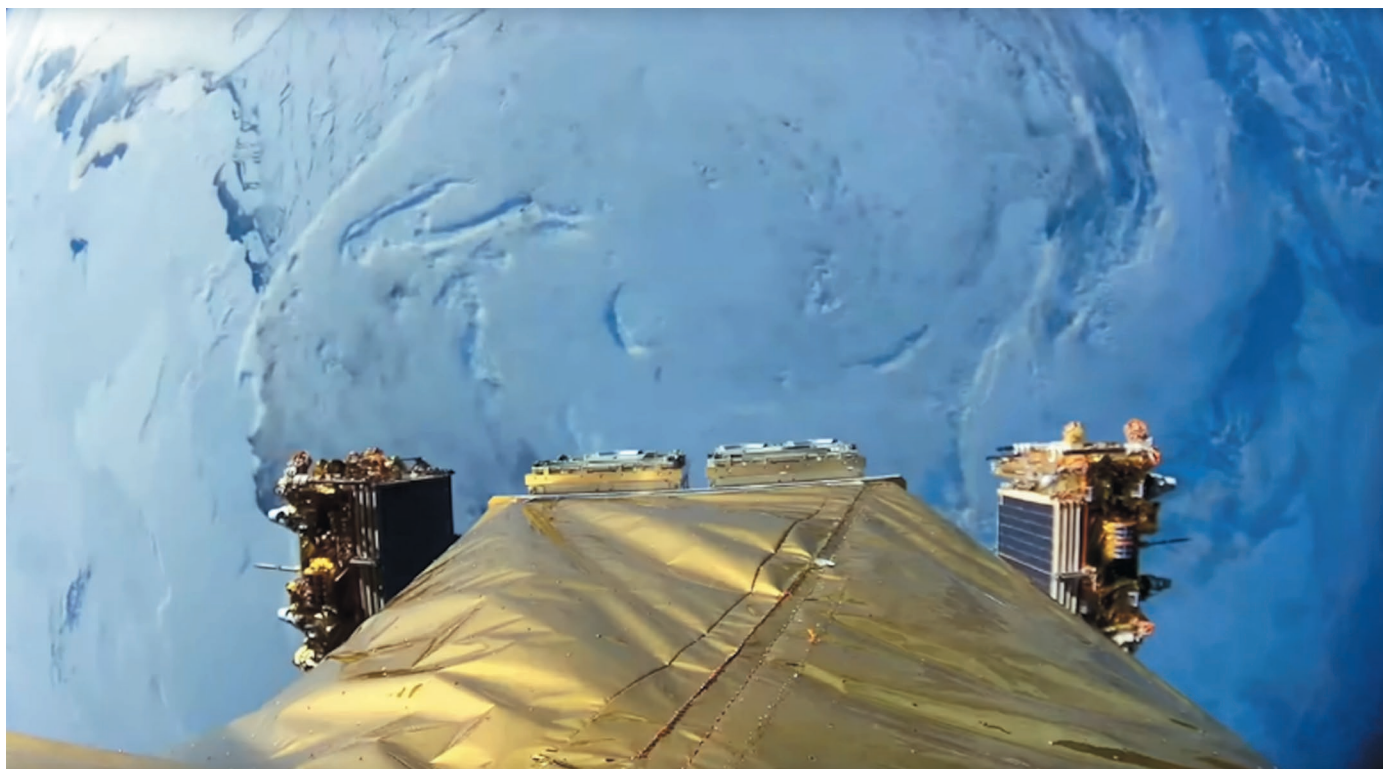


рисунок 5. Отделение КА «ИОНОСФЕРА-М» № 1 и 2 от РБ «Фрегат»

динамики упругого изделия и проведении испытаний ДМ (рисунок 4) участвовали В.Я. Геча, Б.И. Зубренков, Е.А. Канунникова, И.Ю. Пугач. В результате проведения испытаний была показана значительная эффективность этих устройств.

Необходимо также отметить, что и сама конструкция КА «КАНОПУС-В» и БКА основана на применении современных технологий с использованием сотовых панелей с тепловыми трубами, также разработанными в НПО Лавочкина.

Специалистами ВНИИЭМ (Е.А. Канунникова, И.А. Мешихин) и НПО Лавочкина (В.Е. Бордадымов, Н.Н. Даниловский) в рамках создания современных методов отработки динамики и прочности космических аппаратов производится разработка динамических моделей с применением метода внешних суперэлементов (Геча В.Я., Канунникова Е.А., Мешихин И.А., Бордадымов В.Е. и др., 2011; Геча В.Я., Канунникова Е.А., Мешихин И.А., Пугач И.Ю., 2014). Актуальность данной работы обусловлена одним из этапов отработки космического аппарата, а именно необходимостью создания динамической модели КА для совместного расчёта системы «ракета-носитель (РН) – разгонный блок (РБ) – космический аппарат» на этапе выведения. Такой расчёт проводится разработчиком средства выведения, а модели разгонного блока и космического аппарата поставляются их разработчиками. Принятый в настоящее время в мире порядок расчёта подразумевает применение редуцированных моделей подсистем, или, как их иногда называют, внешних суперэлементов, которые при совместном расчёте присоединяются к остаточной конструкции. Широкое распространение данного подхода в международном авиакосмическом сообществе объясняется в том числе соображениями конфиденциальности при выполнении совместных проектов на уровне нескольких фирм, так как редуцированные матрицы не содержат информации о конструкции.

На сегодняшний день совместными усилиями предприятий осуществлено внедрение в расчётную практику методики создания, тестирования и передачи редуцированных моделей конструкций КА.

Применение указанного подхода позволяет достоверно описывать динамические характеристики системы РН – РБ – КА и определять действующие на КА нагрузки – и тем самым способствовать дальнейшему успешному использованию разгонных блоков «Фрегат» для выведения КА производства ВНИИЭМ.

5 ноября 2024 года с космодрома «Восточный» при использовании разгонного блока «Фрегат» были успешно выведены на орбиту два гелиогеофизических КА «ИОНОСФЕРА-М» № 1 и 2 (рисунок 5).

Уверены, что плодотворное сотрудничество наших предприятий, творческое взаимодействие учёных и специалистов не только сохранится, но и будет расширяться на пользу развития космической отрасли нашей страны.

список литературы

Абдурагимов А.С., Авербух В.Я., Аронзон А.Н., Большакова Л.П. и др. Система ориентации солнечной батареи многофункциональной космической платформы «Навигатор». Многофункциональная платформа «Навигатор» / Автор-сост. В.В. Ефанов; под. ред. С.А. Лемешевского. Химки: ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», 2017. С. 229-249.

Авербух В.Я., Лецинский Э.А. Новое поколение систем ориентации солнечных батарей космических аппаратов // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. 2005. Т. 102. С. 35-39.

Авербух В.Я., Лецинский Э.А., Стома С.А. Электромеханические системы ориентации солнечных батарей искусственных спутников Земли // Электротехника. 1996. № 5. С. 14-19.

Авербух В.Я., Беленький А.Д., Вейнберг Д.М., Шереметьевский Н.Н. Прецизионная система ориентации солнечных батарей с малыми реактивными моментами // Школа-83. 1986. Кн. 1. С. 21-24.

Геча В.Я., Канунникова Е.А., Мешихин И.А., Бордадымов В.Е. и др. Создание редуцированных матриц жесткостей и масс для совместного анализа нагрузок // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. 2011. № 121. С. 27-30.

Геча В.Я., Канунникова Е.А., Мешихин И.А., Пугач И.Ю. Вопросы создания и верификации динамической модели КА «МЕТЕОР-М» № 2 на этапе выведения // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2014. Т. 142, № 5. С. 27-34.

Красова Н.А., Пугач И.Ю., Рузаков А.Ю. Разработка математических моделей, применение технических средств и проведения наземной отработки для обеспечения точности динамической стабилизации КА «КАНОПУС-В» с целью получения изображения высокого качества // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2014. Т. 143, № 6. С. 27-36.

Малаховский Е.Е. Точность стабилизации гибких космических аппаратов и нормирование механических воздействий от внутренних источников возмущения // Космические исследования. 1997. Т. 35, № 5.

Малаховский Е.Е., Позняк Э.Л., Шуляк А.А. Гибкий управляемый космический аппарат при возмущениях внутренних источников // Космические исследования. 1995. Т. 33, № 5. С. 538-545.

Статья поступила в редакцию 05.12.2024

Статья после доработки 18.12.2024

Статья принята к публикации 18.12.2024