

СПЕЦИФИКА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ БЕСКОНТАКТНЫХ МИКРОЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Е. М. Михайлов

Рассматриваются особенности нестандартных составляющих бесконтактных электродвигателей постоянного тока, их роль в достижении специфических характеристик изделий. Влияние специфических свойств постоянных магнитов на работоспособность электродвигателей. Конструкторские решения и преимущественные способы их реализации с учетом существующих технологических возможностей. Оценивается их связь с решением главной задачи – достижением максимально возможной долговечности.

Ключевые слова: долговечность, шарикоподшипники, магниты, «гильза», шум.

*Памяти моих учителей:
Мельникова Анатолия Ивановича
и Чеснокова Анатолия Ивановича
посвящается*

Предварительно, в преддверии приближающегося 80-летия ВНИИЭМ (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»), а также, отмечая прошедший 70-летний юбилей отдела «малых электрических машин», хочется вспомнить хотя бы о некоторых работах начала эры «специальной электромеханики», тем более, что свидетелей этого остается все меньше. При этом, как конструктору, хочется сделать акцент на роли ведущих конструкторов разработок, решающих многочисленные и многообразные вопросы, определяющих облик изделия и качество его внутреннего содержания и, в конечном счете, соответствие изделия заданным параметрам.

Началом «специальной электромеханики» во ВНИИЭМ можно считать разработанный в середине 1940-х годов Ростиславом Ивановичем Ласточкиным удивительный электродвигатель (ЭД) для морских торпед. Это так называемый биротативный ЭД постоянного тока со встречным вращением ротора и статора, что позволяло при скорости вращения 3000 об/мин каждого из них получить мощность эквивалентную скорости 6000 об/мин без увеличения диаметра ЭД и при значительном облегчении условий коммутации в щеточно-коллекторных узлах. Мощность наиболее известного и наилучшего из серии таких ЭД – ДП31У составляла 390 кВт, нагрев элементов конструкции достигал 600°C при необходимом ресурсе ≤ 20 мин.

За последующие 40 лет не было создано ничего лучше даже профильными предприятиями Ленинграда. Работа была отмечена государственной премией.

Дальнейшие 15 лет были отмечены всплеском интересных разработок по малым электрическим машинам, вызванным к жизни бурно развивающейся ракетно-космической техникой.

В созданном в 1948 г. отделе специальных малых электромашин И. И. Горжевским совместно со специалистами по магнитным материалам в 1953 г. были определены критерии качества магнитных материалов с «выпуклой» петлей гистерезиса. Был разработан полутвердый магнитный материал (викалло), позволивший создать реальный синхронный гистерезисный ЭД мощностью до 100 Вт. Известные ранее образцы ЭД такого типа имели мощность не более долей ватта и воспринимались электротехниками как технический курьез.

Создание реальных ЭД такого типа дало толчок новому направлению развития приборного гироскопостроения, перенявшего у ВНИИЭМ методику их разработки и изготовления.

А. В. Болдышевым и А. И. Чесноковым были разработаны конструкции четырех габаритов ЭД серии «Г», высокоскоростных редукторных ЭД ГР-106 и ГР-206 для программных установок систем управления баллистическими ракетами, миниатюрных тихоходных ЭД, синхронных ЭД с постоянными магнитами, используемых в устройствах записи информации.

В конце 1950-х годов коллективом конструкторов во главе с А. И. Чесноковым была закончена разработка серии электромашинных преобразователей постоянного тока в переменный (разработчик Л. М. Паластин), необходимых в ракетах для систем управления. Серия состояла из пяти габаритов ПТ-200 ... ПТ-3500 (В × А) при скоростях вращения 15 – 20 тыс. об/мин.

При жесточайшей, в то время, борьбе за минимальные массогабаритные показатели изделий, преобразователь ПТ-500 был выполнен даже на скорость 30 тыс. об/мин, за что получил прозвище «бешеная лошадь». Думаю, нет необходимости перечислять сложности вопросов, которые надо было решать конструкторам по подшипниковым узлам, редукторам и, конечно, по щеточно-коллекторным узлам при таких скоростях вращения.

Ресурсы преобразователей составляли не более нескольких часов, в связи с чем они устанавливались на объекте в количестве до 10 шт.

При отсутствии в то время статических преобразователей и бесконтактных ЭД постоянного тока такие тяжелые решения были неизбежной платой за необходимость обеспечения нужд ракетной техники. Сейчас даже трудно представить, как в условиях того, слабо оснащенного технологически производства, все это было реализовано. Поневоле вспоминается: «Безумству храбрых поем мы песню!»

К концу 1950-х годов А. И. Мельниковым была разработана конструкция серии микроэлектродвигателей постоянного тока (ДПТ) типа ДПМ с возбуждением от постоянных магнитов (разработчик Г. А. Стамбулян). Серия состояла из четырех габаритов ($D_{\text{корп}} = 20 - 30$ мм) с мощностью до 20 Вт и $n = 2000 - 9000$ об/мин.

ЭД применялись на космическом аппарате (КА) «Восток-1» при полете Ю. А. Гагарина и на последующих малоресурсных КА.

Изыщная конструкция ЭД с использованием статорного магнита как несущего элемента корпуса в сочетании с оригинальным решением изготовления миниатюрных коллекторов ($D_{\text{к}} = 8 - 15$ мм) резко отличали серию от предшествующих ДПТ.

В это же время А. И. Мельниковым предложен фирменный знак ВНИИЭМ, используемый и по сей день.

Создание серии было отмечено государственной премией и, тем не менее, по сравнению с дальнейшими разработками А. И. Мельникова, воспринимается как шутка гения. Именно им (в творческом союзе с Н. Я. Альпером) в дальнейшем разработаны конструкции:

- гиросtatического стабилизатора (ГСС), управляющего положением в пространстве КА «Молния», телевизионно связавшего в 1961 г. Владивосток с Москвой;

- шара-маховика в магнитном подвесе – стабилизатора положения космической станции (КС) «Салют», заменившего группу ЭД-маховиков;

- кольцевого маховика ($D = 2,7$ м), встроенного в корпус КС «Алмаз» на поддерживающих и ведущих роликах, позволяющего интенсивно менять положение КС вокруг продольной оси;

- «гиродина» – скоростного маховика ($n = 10\,000$ об/мин) на магнитных подшипниках; группа из шести «гиродинов» управляла громадой КС «Мир» с точностью положения до 2 угл. мин (работа отмечена государственной премией).

Все перечисленное давно уже стало «брендом» ВНИИЭМ. А. И. Мельников и А. И. Чесноков одни

из немногих к кому в полной мере относится определение Нобелевского лауреата П. Л. Капицы: «... настоящий инженер определяется не высшим образованием, но в значительно большей степени здравым смыслом и стремлением к новому».

Возвращаясь в 1950-е годы, следует отметить разработку прецизионного тахометрического привода ПТП-5 (разработчик И. А. Вевюрко), предназначенного для системы наведения основной тогда ракеты 8К82. Привод ($D \times L = 30 \times 100$ мм) состоял из ДПТ и тахогенератора (ТГ), имевшего безжелезный колокольчикообразный ротор с распределенной тонкослойной обмоткой, расположенный в зазоре между индуктором и магнитопроводом. ЭД и ТГ имели золотой коллектор и золотые же «лепестковые» щетки с предельно допустимым малым нажатием.

Такое решение обосновывалось соображениями надежности работы контактной пары при требованиях погрешности выходного сигнала ТГ 0,02% от скорости 10000 об/мин и ресурсе 100 ч. По поводу контактной пары конструктору (автору статьи) в тяжелый и достаточно драматичный период внедрения изделия на серийном заводе пришлось услышать от А. Г. Иосифьяна: «...знаешь, за такие художества 10 лет назад твоя лавочка закончилась бы скамеечкой». В конечном счете выпуск изделия был налажен и успешно продолжался 15 лет. Надо отметить, что в упомянутом «гиродине» через 17 лет для слаботочной пары щетка – контактное кольцо было также использовано золото.

В описываемый период при возрастающих требованиях космической отрасли к увеличению долговечности ДПТ электротехниками и материаловедами велась отчаянная борьба за увеличение долговечности щеточно-коллекторного узла. Применялись различные материалы коллекторов и гальванические покрытия их, создавались многочисленные марки угольно-графитных щеток с различными пропитывающими составами, но все это не приносило ощутимых результатов.

Наконец, благодаря развитию электроники, стало возможным создание обращенного ЭД постоянного тока без щеточно-коллекторного узла и постоянным магнитом возбуждения на валу.

В 1960 г. во ВНИИЭМ впервые в стране был разработан бесконтактный ЭД постоянного тока – БДПТ (разработчик И. А. Вевюрко), с электронным коммутатором (блок управления ЭД) и датчиком положения ротора (с чувствительным элементом – датчиком ЭДС Холла), заменившими щеточно-коллекторный узел.

Проблема радикального увеличения долговечности ДПТ была в принципе решена!

Уже в 1961 г. ОКБ С. П. Королева применяет первые БДПТ типа БП и БПС на упомянутом выше КА «Молния», а в 1962 г. разрабатывается ЭД БПК-401 ($n = 12000$ об/мин) для кислородного нагнетателя в скафандре А. А. Леонова, впервые вышедшего в открытый космос. И хотя их ресурс составлял незначительные, по нынешним меркам, 7000 ч, это было уже на порядок больше, чем у ДПТ.

Подшипники

Теперь, с устранением из ДПТ щеточно-коллекторного узла, основным ограничителем долговечности БДПТ стал подшипниковый узел и шарикоподшипник (ШП) в частности.

В те годы представления о возможной долговечности ШП в микроэлектродвигателях были весьма туманны, так как существующая и по сей день эмпирическая формула долговечности ШП:

$$T_{\text{расч}} = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{Q} \right)^3 \text{ ч},$$

где C – каталожная динамическая грузоподъемность ШП; Q – эквивалентная нагрузка на ШП; n – скорость вращения, разработанная в начале XX века, когда микроэлектродвигателей еще не существовало, была ориентирована на общепромышленные задачи с акцентом на процессы износа ШП под действием нагрузок, создающих контактные напряжения (σ_k) в ШП $(30 - 50)10^3$ кг/см². С активным развитием в середине XX века приборного и микроэлектродвигательного строения в 1960-х годах в зарубежных публикациях уже указывалось на некорректность расчета малонагруженных ШП с пластичной смазкой (ПС) по указанной формуле, так как ошибки при этом могут достигать сотен раз. При этом под малой нагрузкой подразумевалось соотношение $Q = 0,05C$, а тяжелой – $Q = 0,15C$. В действительности, для микроэлектродвигателей это соотношение достигает $Q = 0,0025C$, что свидетельствует об аномально малой нагрузке ШП, в связи с чем аномально растет величина $(C/Q)^3$, а расчетная долговечность достигает абсурдных величин 10^8 ч и более даже при $n = 10000$ об/мин. Контактное напряжение в ШП σ_k при этом < 15000 кг/см².

Что касается влияния на долговечность скорости вращения ($T \equiv 1/n$), то и оно, в действительности, не соответствует реалиям. По данным НИИ приборных гироскопов (НИИ прикладной механики им. акаде-

мика В. И. Кузнецова) для ШП с $d_{\text{внутр}} = 3$ мм, $Q = 0,01C$ и $n = 60 \cdot 10^3$ об/мин расчетная долговечность $T_{\text{расч}} = 290 \cdot 10^3$ ч, а фактическая наработка составляет 100 ч. Для скоростей вращения 30 и 10 тыс. об/мин, следуя логике формулы, фактическая наработка должна быть 200 и 600 ч, однако она составила 500 и 16 000 ч.

Столь резкие отличия расчетной и фактической долговечности, как и непропорциональность изменения ее от скорости, объясняются рядом факторов, влияющих на работу ШП. Это преимущественно:

– гироскопические моменты шаров и их центробежные силы ($M_{\text{г.ш.}}$; $F_{\text{ц.ш.}} \equiv n^2$), активно и отрицательно воздействующие на сепаратор ШП и увеличивающие контактные напряжения в ШП;

– резкое повышение гидродинамической составляющей момента трения смазки ($M_{\text{тр.см.}} \equiv n^{0,67} d_0^3$) при увеличении скорости вращения, что повышает температуру ШП (d_0 – средний диаметр ШП);

– «усталость» смазки в зависимости от степени реализации допустимого «скоростного фактора» $[d_0 n] = 400 \cdot 10^3$ мм об/мин (для приборных ШП ($d_{\text{внутр}} \leq 10$ мм) со змейковым сепаратором, скрепленным отгибными «усиками» и пластичной смазкой).

Как следует из приведенных фактических наработок, нижней границей активного воздействия перечисленных факторов являются скорости 12 – 15 тыс. об/мин, а при $n \leq 10 000$ об/мин их влияние практически не ощущается. Это подтверждалось также Всероссийским научно-исследовательским институтом подшипниковой промышленности (ВНИПП) при исследовании долговечности авиационных ШП.

Таким образом, традиционные в существующей формуле долговечности параметры Q и n не являются определяющими расчетной долговечности ШП для рассматриваемых изделий.

Реальными параметрами, определяющими при прочих равных условиях долговечность ШП, являются смазка вкупе с воздействующей температурой и угол перекоса колец ШП, минимально желательная величина которого зависит от качества конструкторской разработки и технологических возможностей изготовителя. Вопросы смазки ШП, достигнутые результаты испытаний ЭД серии БК и предложенная на их основе эмпирическая формула расчета долговечности ШП микроэлектродвигателей изложены в работе [1], ознакомление с которой полезно для лучшего понимания затронутых в этом разделе вопросов.

Что касается угла перекоса колец ШП Θ , то целесообразно сразу же отметить, что в зависимости

от причин, вызывающих его появление, он имеет две составляющие:

$$\Theta_1 = \arctg \frac{e}{L} - \text{от несоосности } e \text{ опор на длине } L$$

межопорного расстояния;

$$\Theta_2 = \arctg \frac{\delta}{B} - \text{от возможного перекоса наруж-$$

ного кольца ШП шириной B в отверстии корпуса («гнезде») при посадке с зазором δ ;

Конечное значение угла Θ преимущественно зависит от угла Θ_1 , но при определенных условиях может реализовываться как сумма Θ_1 и Θ_2 .

В упомянутых выше публикациях указывалось на оптимальную величину $\Theta = 2 - 2,5$ угловых минут, при которой в приборных ШП обеспечиваются минимальные внутреннее трение, собственные вибрации и температура.

При таком угле перекоса и межопорном расстоянии $L = 25,4$ мм несоосность e должна быть не более 0,018 мм. Поскольку достижение такой величины крайне затруднительно по технологическим причинам допускалась несоосность 0,05 мм при соответствующем угле перекоса $\Theta_1 = 6,8'$.

Естественно, с увеличением L прямо пропорционально снижается Θ_1 . Угол Θ_2 реализуется в случае воздействия асимметрии магнитного поля магнита ротора по длине или ощутимого дисбаланса консольной нагрузки на валу ЭД и зависит от посадочного зазора δ ШП в корпус.

Для ШП с $d \times D = 5 \times 16$ мм, при токарной обработке деталей и узлов ЭД с точностью не выше 6-го качества, посадочный зазор может меняться от 4 до 14 мкм, а соответствующий угол перекоса Θ_2 – от 2,5' до 10'. Зарубежные нормы предусматривают посадку ШП в корпус с зазором 2 – 4 мкм, обеспечивая $\Theta_2 \approx 2,5'$.

ГОСТ 3325-85 допускает эксплуатационный угол перекоса колец радиальных ШП, с «нормальной» группой радиальных зазоров 5 – 16 мкм – $\Theta \leq 5,6'$.

В первых поколениях БДПТ традиционной конструкции с двумя подшипниковыми щитами несоосность опор достигала 0,09 мм, что соответствовало углу перекоса $\Theta_1 = 12'$, а ресурс ЭД в массе составлял 10 – 15 тыс. ч.

Таким образом, к началу разработки ЭД серии БК [2] (в преддверии создания КС «Мир») с задачей существенного увеличения долговечности ЭД требовалось радикальное решение по снижению несоосности опор и углового перекоса колец ШП.

Было принято решение о применении в разрабатываемой серии ЭД типа БК нестандартных ШП

с увеличенным наружным диаметром, превышающим диаметр ротора ЭД, и увеличенной в 1,5 раза шириной ШП B . К моменту завершения разработки документации серии БК по выпущенной ВНИПП документации на новые ШП Загорским филиалом ВНИПП были изготовлены их первые образцы.

Реализация предложенного решения позволила:

- избавиться от подшипниковых щитов в конструкции ЭД и, соответственно, уменьшить несоосность опор до 0,03 мм, а угол перекоса Θ_1 – до 4' (при $L = 1$ дюйм);

- уменьшить угол перекоса Θ_2 до 6' max с увеличением ширины ШП B ;

- применив вторую группу радиальных зазоров ШП (12 – 18 мкм) в сочетании с повышенным «развалом желобов» $\xi = r_{ж}/d_{ш} > 0,52$ (фактические значения 0,525 – 0,54, где $r_{ж}$ – радиус желоба кольца ШП, а $d_{ш}$ – диаметр шара), увеличить критический угол перекоса колец $\Theta_{критич}$ (то есть при устранении радиального зазора в ШП) до 20';

- с увеличением массы наружного кольца ШП уменьшить его тенденцию к провороту в «гнезде» при скоростях вращения в районе 10 000 об/мин.

В результате, даже в случае реализации составляющей Θ_2 , превышение суммарного значения Θ над оговоренным ГОСТ (рассчитанным на минимальный радиальный зазор 5 мкм), становится не существенным, так как $\Theta \ll \Theta_{критич}$.

Последовавшие многолетние ресурсные испытания ЭД серии БК-1 подтвердили эффективность принятых мер, что в сочетании с работой по смазкам ШП обеспечило ресурс ЭД 50 – 100 тыс. ч. в зависимости от тепловой нагрузки ШП [1]. Использование ЭД серии БК на КС «Мир» рассмотрено в работе [3].

Оптимальное решение рассмотренного вопроса реализуется при использовании так называемой шпindelной схемы опор, при которой сквозное шлифование подшипниковых «гнезд» равного диаметра обеспечивает практически нулевую их несоосность и соответствующий угол перекоса Θ_1 .

Это особенно важно с применением радиально-упорных ШП, для которых при отсутствии внутреннего эксплуатационного зазора допустимый угол перекоса колец составляет по ГОСТ – 4' max.

Применение такой схемы опор в электродвигателях-маховиках (ЭДМ) на базе БДПТ стало возможным благодаря вынесению электромагнитной

части ЭДМ на внешний периметр, то есть совмещению ее с основной маховой массой «головки» маховика и освобождением зоны подшипниковых опор для проведения необходимых технологических операций [4].

В то же время, остается открытым вопрос о величине посадочного зазора δ ШП в корпус, который, с одной стороны, необходим для безболезненной реализации упругого осевого преднатяга на радиально-упорные ШП, а с другой – противоречит идее беззазорного крепления системы маховик – подшипники в изделии с целью устранения возможных колебаний маховика. В связи с этим, желательно обеспечение зазора δ не более 4 мкм, что достижимо при шлифовании по четвертому качеству точности и селекции с ШП.

Радикальное решение этого вопроса – посадка ШП в корпус с натягом, практикуемое гироскопистами, при обязательном осевом преднатяге заставляет их применять уникальные способы ручной доводки деталей специалистами высочайшей квалификации.

В указанных выше ЭДМ влияние посадки с зазором компенсируется, в какой-то мере, величиной осевого преднатяга, превышающего массу ротора-маховика в 1,5 – 2 раза.

Немецкая фирма Teldix, также разрабатывающая ЭДМ, разрешила указанные противоречия применением специального подшипникового узла Fixed Bearing Cartridge with Duplex pair braced – Cage Bearing Suspension). Узел состоит из дуплекса радиально-упорных ШП в одном корпусе со смазкой «рафинированным маслом», которое, при осевом преднатяге в дуплексе, компенсирует рост момента трения в ШП и увеличивает их долговечность. Для удержания в узле масла и его дополнительного запаса применяется барьерное покрытие нерабочих поверхностей ШП.

ШП сверхлегкой серии, то есть с повышенными d и D (но при малой их разнице), повышенным числом шаров и уменьшенным их диаметром, что позволяет увеличить линейную скорость шаров, и, в свою очередь, обеспечивает контакт тел качения через смазку при малых скоростях вращения ~50 об/мин.

Посадка узла в корпус изделия с малым натягом обеспечивается доводкой корпуса подшипникового узла.

Разработаны два типоразмера узлов для ЭДМ с кинетическими моментами: до 12 Н·м·с и для 18 – 120 Н·м·с.

Датчик углового положения ротора

Датчик углового положения ротора (ДПР), управляющий коммутацией тока статора в электронном коммутаторе БДПТ.

В качестве ДПР применяются датчики ЭДС Холла (ДХ), индукционные, трансформаторные и световые датчики. Опыт разработки первых БДПТ показал, что применение ДХ с его простейшей принципиальной схемой работы обеспечивает создание наиболее оптимальных схем коммутатора, позволяющих добиться их минимальных массогабаритных показателей.

В свою очередь, размеры самого ДХ, представляющего собой пластину полупроводникового материала $0,2 \times 3 \times 6$ мм с парами токовых и холловских выводов, позволили минимизировать решения по его встраиванию в ЭД. Применение ДХ в первых поколениях БДПТ практически в указанном виде выявило их уязвимость при монтажных работах, в связи с чем они в дальнейшем были модернизированы заключением их в стальной корпус толщиной 0,1 мм, и заменой выводов $\varnothing 0,06$ мм на гибкую печатную схему. Конечные размеры ДХ: $0,75 \times 4,6 \times 14$ мм.

При создании ЭД серии БК это позволило избавиться от ДПР первых поколений БДПТ, имевших самостоятельные пакеты железа с ДХ и магнит на валу ЭД. Активный участок модернизированных ДХ длиной 6 мм был размещен в пазах зубцов статорного железа ЭД, то есть ДПР был совмещен с активной частью собственно ЭД.

В результате это позволило:

- сократить длину ЭД;
- разместить коммутатор непосредственно на торце ЭД;
- как следствие, устранить корпус отдельного коммутатора;
- устранить кабель, соединяющий ЭД с отдельным коммутатором;
- облегчить потребителю компоновку ЭД, затрудняемую фиксированной длиной кабеля.

Магниты

С появлением в БДПТ вращающегося постоянного магнита появились новые, порой совершенно неожиданные вопросы.

Во-первых, это характер воздействия на ШП классической силы одностороннего магнитного тяжения ротора и статора в функции их начального эксцентриситета e_0 , присущей ЭД постоянного тока: ($F_{м.т.} \equiv \frac{e_0}{\delta} B_0^2$, где δ – рабочий зазор ЭД, а B_0 – индукция в зазоре). Для авиационных ДПТ отношение $\frac{e_0}{\delta}$ принято $\leq 0,05$.

В ДПТ вектор силы, создаваемой магнитом статора, постоянен по направлению и совпадает с осью эксцентриситета. В связи с этим, внутреннее кольцо ШП, вращающееся с ротором относительно вектора силы, имеет так называемый «циркуляционный» характер нагружения, при котором все точки желоба кольца последовательно за оборот испытывают равномерную нагрузку, что является наиболее благоприятным режимом работы ШП.

В БДПТ реализация силы тяжения, источником которой является вращающийся магнит, происходит в момент совмещения вектора силы с осью эксцентриситета, в связи с чем воздействие силы имеет пульсирующий характер, а режим работы кольца характеризуется как «колебательный», то есть по сути вибрационный, что безусловно вредно для ШП.

По сравнению с первыми поколениями БДПТ, имевшими литые магниты из сплавов ЮНДК, в ЭД серии БК с целью повышения мощности ЭД магнитологами был рекомендован магнит ЮНДК-35Т5АА, так называемый «монокристалл» с удвоенной удельной энергией ($B \times H$ – индукция и коэрцитивная сила). В результате мощность ЭД 5-го габарита ($D_{\text{корп}} = 50$ мм) была увеличена с 7,5 до 16 Вт, а мощность разработанных впервые ЭД 6-го и 8-го габаритов составила 40 и 90 Вт, при четырехполюсном статоре и двухполюсном магните с явно-выраженными полюсами (дуга полюса 90°).

Однако, по мере работы с ЭД выявился эффект магнитных «захватов» при вращении ротора, а позднее и необъяснимое явление асимметрии сил магнитного тяжения разноименных полюсов двухполюсного магнита при равных рабочих зазорах.

В работе [5] магнитологами ВНИИЭМ объяснялось, что причиной этого является структурная неоднородность магнитов, возникающая в процессе выращивания монокристалла из расплава в магнитном поле, приводящая к искажению линий магнитного поля в магните относительно оси его намагничивания, как в поперечном сечении, так и по длине.

Естественный вопрос: когда это явление стало известно магнитологам и изготовителям магнитов, – остался открытым.

Разница силы тяжения F_0 у магнита с $D = 21$ мм (5-й габарит серии) составляла 0,07 – 0,6 кг. При этом вращающийся вместе с внутренним кольцом ШП вектор такой силы создает «местный» характер нагружения кольца, то есть постоянную местную нагрузку его в узкой зоне ($60^\circ - 90^\circ$) окружности желоба кольца.

Неблагоприятный характер такой нагрузки усугубляется взаимной отрицательной кривизной же-

лоба и шара, способствующей повышению контактного напряжения в ШП.

И если в ШП ЭД БК-1 отрицательное воздействие этих факторов компенсируется наличием смазки в ШП, то в ЭД БК-2, модификации серии БК для электронасосных агрегатов (ЭНА), подшипники которых работают в среде маловязких жидкостей, то есть в условиях «масляного голодания», оно проявляется в полной мере. Дефектационные работы с отказавшими на ресурсных испытаниях ЭД БК-2 5-го габарита, в том числе контроль относительной разницы индукции (ΔB) разноименных полюсов магнитов их роторов, позволили получить четкую картину зависимости ресурса ЭД от силы разнотяжения F_0 (таблица).

Ось зоны износа ($60^\circ - 90^\circ$) желоба внутреннего кольца ШП постоянно совпадала с вектором силы F_0 магнита, а величина износа достигала 0,3 - 0,4 мм.

К сожалению, авторы упомянутой работы [5] не указывали первопричин появления описанного дефекта монокристалла – неизбежный ли это порок технологии изготовления, либо это ее нарушение, а ограничились рекомендацией контроля свойств магнитов и отбраковки их потребителем (?).

Недостаточный ресурс ЭД этого типа заставлял периодически менять их на КС «Мир», с доставкой грузовыми КА «Прогресс». На Международной космической станции (МКС) это происходит реже после введения в конструкторскую документацию ЭД БК-2 требования по отбору магнитов с ограниченным уровнем магнитной неуравновешенности их полюсов.

К середине 1970-х годов появились редкоземельные магниты (РЗМ), преимущественно самарий-кобальтовые (SmCo_5), имеющие суммарную энергию ($B \times H$) приблизительно в два раза большую, чем у монокристалла. С их применением были разработаны ЭД типов ДБ 60-60 (90)-4А мощностью 60 и 90 Вт в размерах 6-го габарита серии БК, имевших мощность 40 Вт, а также первый ЭДМ на базе БДПТ.

Таблица

$\Delta B, \%$	$F_0, \text{ кг}$	Наработка на отказ $T \times 10^3, \text{ ч}$
2	0,07 – 0,15	15 – 20
4	0,12 – 0,24	8 – 12
6	0,25 – 0,32	5 – 7
8 – 10	0,35 – 0,45	4 – 6
12 – 14	0,45 – 0,60	2 – 3

Конструктивно ЭДМ представлял собою безжелезный статор в виде пластмассового цилиндра с обмоткой, расположенный в зазоре магнитной системы ротора. Такое решение позволяло избавиться от присущих ЭД серии БК магнитных тяжений и «захватов» ротора, а связанное с этим увеличение магнитного зазора в роторе до 5 мм (при необходимости индукции в зазоре $\geq 0,6$ Тл) компенсировалось повышенными свойствами магнитов SmCo_5 и некоторым увеличением высоты магнитов в направлении намагничивания [4].

В таком исполнении ЭДМ успешно эксплуатировался на многочисленных КА «Метеор» до начала 1990-х годов, когда магнитологи выявили, что «самария и кобальта в стране больше нет» и необходимо переходить на магниты РЗМ типа неодим – железо – бор ($\text{Nd} - \text{Fe} - \text{B}$), имеющие еще большую суммарную магнитную энергию.

На первых же партиях ЭДМ с новыми магнитами обнаружилось, что после 4-х – 6-месячного пребывания изделий в условиях камерального помещения на поверхности магнитов, обращенной к внутреннему магнитопроводу ротора, образуются сталактитообразные наросты из светло-серого порошка. При достижении их высоты 3 мм, то есть величины зазора между магнитом и неподвижным статором, начиналось их трение о статор, причем несмотря на порошковую структуру наростов, они не разрушались при вращении ротора, находясь в магнитном поле.

После очистки роторов от наростов, повторной сборки изделий и их аналогичном хранении эффект порошкообразования повторялся. Магнитологами была высказана версия о коррозии магнитов, и в связи с принятым конструкторами оперативным решением этого вопроса – покрытием магнитов эпоксидным лаком – далее природой этого явления не занимались и, как выяснилось позднее, напрасно.

За три года до появления описанного дефекта в работе [6] было указано на разрушение таких магнитов с образованием порошка при воздействии водорода воздуха, что «ошибочно принималось за продукты окисления сплава». В одной из статей магнитологов ВНИИЭМ того времени по поводу достоинств магнитов $\text{Nd} - \text{Fe} - \text{B}$ в перечне литературы к статье имеется ссылка на указанную работу, но в самой статье комментариев на эту тему нет.

Разработанные в 1990 – 1994 годы первые образцы ЭД ДБ 64-90-6Г (рис. 1) на гидростатических опорах [7] были призваны заменить существовавшие низкоресурсные ЭД БК-2 и ДБ 60-90-4А для насосных агрегатов с целью обеспечения 100 тыс. ч ресурса. В ЭД были использованы магниты $\text{Nd} - \text{Fe} - \text{B}$.

После 35 тыс. ч ресурсных испытаний этих ЭД с ротором в среде антифриза было зафиксировано заклинивание роторов, вызванное разрушением магнитных подпятников ротора. Подпятник – встречно намагниченная пара магнитов на валу и в корпусе, заключенных в магнитопроводы и окончательно герметизированных приваренной к магнитопроводу немагнитной стальной мембраной толщиной 0,2 мм, имеющей форму шайбы.

Осевой зазор между мембранами в подпятнике – 0,35 - 0,4 мм.

Разрушение проявилось как вздутие мембран по окружности среднего диаметра шайб до исчезновения зазора между ними, последующего их взаимного трения до сквозного протирания и выделения через поврежденные места порошкообразного магнита. После удаления мембран был обнаружен слой порошка магнита толщиной $\sim 1,5$ мм (при толщине магнита 3,5 мм) с куполообразной формой поверхности, соответствующей форме изогнутых мембран.

Основываясь на первичной, упомянутой выше информации о поглощении сплавами $\text{Nd} - \text{Fe} - \text{B}$ водорода [6] конструкторами, был проведен широкий поиск литературы по схожим вопросам. По результатам анализа собранной информации и сопоставлению ее с фактическим материалом сложилась следующая картина последовательности произошедшего:

– постепенное разложение антифриза (30% водного раствора этиленгликоля) при температуре 90 – 100 °С, подтверждаемое постоянным снижением уровня жидкости в контрольной емкости испытательной системы ЭД, с выделением водорода [8];

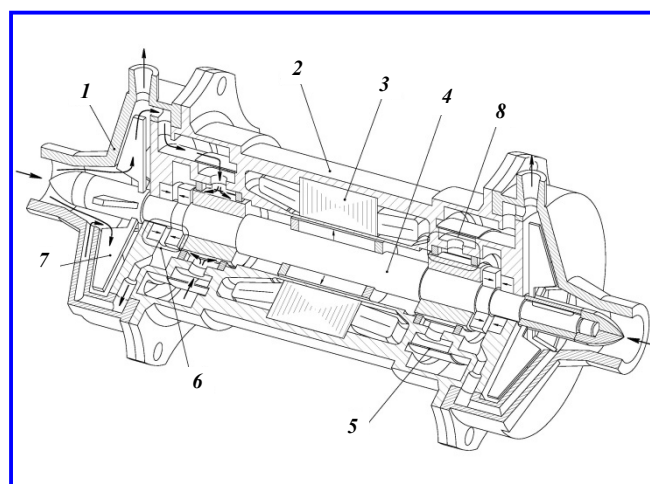


Рис. 1. Схема электронасосного агрегата на гидростатических подшипниках (1 – «улитка» насоса; 2 – корпус; 3 – статор; 4 – ротор; 5 – фильтр; 6 – магнитные подпятники; 7 – крыльчатка насоса; 8 – опора)

– концентрация молекулярного водорода на поверхностях твердых тел (адсорбция) с последующим делением его (диссоциация) на атомарный водород [9];

– диффузия атомарного водорода через мембрану (водородопроницаемость сталей) [9];

– облегченный процесс гидрирования спеченного пористого магнита Nd – Fe – В с атомарным водородом с образованием порошка магнита, а также молекулярного водорода [6];

– сопровождающий этот процесс (в замкнутом объеме магнитопровода) рост давления водорода до величин, приводящих к вспучиванию, текучести и разрушению даже литых сталей [6];

– вспучивание порошкообразного магнита в подпятниках ЭД, приведшее к прогибу мембран, с формой деформированной поверхности аналогичной «куполу» вспученного порошка.

Необходимо также отметить вздутие (появление «бочкообразности») наружного диаметра ротора на 0,2 ... 0,4 мм.

Конечно, предусмотреть такое воздействие на магнит одновременного сочетания неизвестных разработчикам изделия явлений было нереально.

Сейчас трудно сказать, помогло ли бы своевременное углубленное разбирательство предшествующего дефекта на ЭДМ предотвратить отказ подпятников, но то, что это помогло бы понять его причины на много лет раньше – это однозначно.

Ясно, что в погоне за максимальной энергией магнитов, необходимо тщательно и своевременно разбираться с их прочими специфическими свойствами. Магниты Nd – Fe – В в ЭД с гидроопорами ротора заменены на вновь появившиеся магниты SmCo₅.

«Гильза»

В 1961 г. был разработан первый БДПТ типа БПС, предназначенный для работы в составе ЭНА. Введение в конструкцию ЭД «гильзы» – детали, герметично разделяющей полости ротора и статора ЭД, позволило стыковать ЭД непосредственно с насосом, без применявшейся до того магнитной муфты. Замена в предшествовавших ЭНА ДПТ на БДПТ позволила повысить рабочую скорость, заменить шестеренчатые насосы на центробежные, существенно увеличить коэффициент полезного действия насоса и ресурсы ЭНА в целом и улучшить их габаритно-массовые показатели [10].

Конструкция целиковой «гильзы» (рис. 2) выглядит следующим образом: ее тонкостенная часть, толщиной 0,2 – 0,3 мм (на длине активной части ЭД) расположена в рабочем зазоре ЭД. Со стороны

выходного конца вала ЭД она развивается во фланец для стыковки с насосом с одной стороны, и крепления статора с другой. Противоположная сторона «гильзы» заканчивается глухим подшипниковым «гнездом» заднего ШП.

Таким образом, «гильза» является многофункциональной деталью, несущей все узлы ЭНА. В связи с этим, к ее материалу предъявляется целый ряд требований:

– немагнитность, так как в противном случае «гильза» шунтировала бы магнитный поток ротора;

– максимально возможное омическое сопротивление ρ , так как в теле «гильзы», расположенной в рабочем зазоре ЭД, возникают потери энергии от вихревых токов (токов Фуко);

– прочность, достаточная для выдерживания внутреннего давления жидкости в «гильзе» до 40 ати;

– коррозионная стойкость к воздействию различных теплоносителей [1];

– коэффициент линейного расширения не выше $16 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ (аустенитные стали) для приемлемой деформации подшипниковых «гнезд» в случае нагрева изделия до 100 $^\circ\text{C}$;

– приемлемые технологические возможности токарной обработки, шлифования, свариваемости.

При разработке первых поколений подобных ЭД в качестве материала «гильзы» была выбрана немагнитная нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, практически удовлетворяющая всем перечисленным требованиям, за исключением невысокого $\rho = 0,72 \times 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Во всяком случае, в первых БДПТ мощностью до 16 Вт, с низкими скоростями ($\leq 4000 \text{ об/мин}$) и, соответственно, малыми диаметрами роторов – это разработчиков не тревожило.

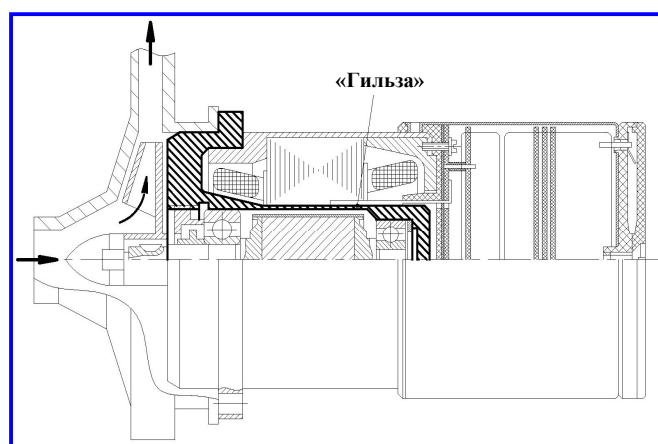


Рис. 2. Схема БДПТ с центробежным насосом

Но уже при разработке серии БК-2, в частности ЭД 8-го габарита мощностью 90 Вт, скоростью 6 000 об/мин, индукцией $B_6 = 6 000$ Гс и диаметром ротора 40 мм, обнаружилось, что потери в «гильзе» составили 30 Вт!

Проведенная теоретическая оценка потерь в «гильзе», а также выведенная эмпирическая формула их инженерных расчетов, показали влияние на потери в «гильзе» параметров B_6 , n , $D_{\text{рот}}$ и ρ :

$$\Delta P_r = \frac{B_6^2 n^2 D_{\text{рот}}^3 l b}{\rho} K, (\text{Вт}),$$

где B_6 – индукция в зазоре (Гс); n – скорость вращения (об/мин); D , l , b – диаметр, длина и толщина «гильзы» в рабочем зазоре (см); ρ – омическое сопротивление ($0,72 \times 10^{-4}$ сталь 12Х18Н10Т; $1,62 \times 10^{-4}$ титан, Ом·см); $K = 43 \times 10^{-20}$; подтвержденная погрешность формулы $\leq 5\%$.

Из формулы явно прослеживается тенденция к уменьшению $D_{\text{рот}}$ ($D_{\text{«гильзы»}}$), с возможным компенсирующим увеличением l . Снижение индукции нежелательно, так как это снижение заданной мощности. Снижение толщины b невозможно по технологическим причинам и из-за снижения ее прочности.

Снижение скорости n до 4000 об/мин, учитывая практику создания малорасходных, малонапорных центробежных насосов, даже полезно [10]. И, конечно же, полезно увеличение ρ .

В результате был разработан упомянутый выше ЭД ДБ 60-90-4А в размерах 6-го габарита ($D_{\text{корп.}} = 60$ мм) серии БК-1, мощностью 90 Вт, скоростью 4000 об/мин, индукцией в зазоре 7000 Гс, при $D_{\text{рот.}} = 25$ мм и $\rho = 1,62 \times 10^{-4}$ Ом·см.

Потери в «гильзе» ЭД составили 3,0 Вт.

Что касается ρ , то ясно, что оптимальным решением было бы выполнение «гильзы» из диэлектрических материалов. Такая работа была в свое время выполнена. Изготовлены «гильзы» из пластмасс различных марок, специального стекла, так же, как и из специальных сталей с $\rho = 0,9 \times 10^{-4}$ Ом·см. Однако, результаты были отрицательными из-за низкой прочности пластмасс и высокого коэффициента их температурного расширения, технологических трудностей при обработке «вязких» сталей и, тем более, стекла. Кроме того, естественное утолщение пластмассовой «гильзы» в 2 – 3 раза приводило к недопустимому увеличению рабочего зазора ЭД.

В конечном счете были найдены титановые сплавы ВТ-6 и ВТ-8 ($\rho = 1,62 \times 10^{-4}$ Ом·см), ранее не применявшиеся в электромашиностроении.

Единственным их недостатком может быть признана затрудненная шлифуемость.

Возвращаясь к конструкции целиковой «гильзы», следует отметить ее недостатки. Во-первых, это сложность точного изготовления глухого «гнезда» заднего ШП. Во-вторых, отход в стружку до 85% объема дорогих титановых заготовок.

С появлением в производстве лазерной сварки «гильза» модернизирована, с разделением ее на три части: фланец, тонкостенная часть с открытым «гнездом» заднего ШП, что позволило существенно повысить точность его обработки, и заглушка заднего «гнезда». Все это сваривается в определенной технологической последовательности.

Указанное мероприятие не только устранило перечисленные недостатки, но и способствовало повышению долговечности ЭД, благодаря гарантированному повышению точности обработки «гнезда» заднего ШП, которое, с введением в «гнездо» стальной втулки, стало возможным шлифовать.

Шум

Поскольку в обитаемых КА количество ЭД достаточно велико, создаваемый ими шум становится существенной проблемой. Уровни шума ЭД БК-1 при присущих им магнитных дисбалансах достигают 50 дБ, а вентиляторов в целом – 90 дБ. Разработанный ЭД ДБ 50-10-2 позволил хотя бы отчасти решить этот вопрос. ЭД мощностью 10 Вт и скоростью 2000 об/мин имеет следующие конструкторско-технологические особенности:

- ЭД выполнен без датчика положения ротора, то есть без датчиков Холла, расположенных в зубцах статорного железа ЭД БК, что предопределяет их четырехпазовый статор для младших габаритов серии;

- это позволило выполнить магнитную систему ЭД с 12-пазовым статором, что в сочетании с четырехполюсным магнитом ротора практически исключает магнитные «захваты» ротора;

- этому же способствует целиковый магнито-пластовый магнит без резко выраженной полюсности двухполюсного магнита серии БК;

- пакет железа со скосом пазов исключительно клееный, с целью исключения микровибраций листов железа в сварном статоре;

- корпус и его подшипниковые щиты – прессованный пористый алюминий;

- в щитах – втулки, образующие подшипниковые «гнезда», из пористой металлокерамики, пропитанной маслом;

– радиально-упорные ШП четвертого класса точности при посадке в корпус с зазором 4 – 8 мкм имеют на наружном кольце демпфирующее резиновое кольцо;

– осевой преднатяг ШП осуществляется «разрезной» пружиной, подпертой металлокерамической втулкой.

В результате, на 60-ти ЭД шум составил: 16 – 22 дБ – 40 шт.; ≤ 25 дБ – 15 шт.; остальные – < 28 дБ, оговоренных нормой технических условий на ЭД. С учетом работ, проведенных фирмой-разработчиком вентилятора по усовершенствованию рабочего колеса вентилятора, его общий шум снижен до 50 дБ.

Образцы ЭД на подшипниках скольжения обеспечили шум 10 – 13 дБ, то есть на фоновом уровне акустической камеры. Однако, из-за сложностей, связанных с обеспечением минимальной несоосности опор и углов их перекося, к которым подшипники скольжения особенно чувствительны, а также необходимости смазки подшипников «маслом», выбор был сделан в пользу ШП, вопросы смазки которых и необходимой долговечности, решены.

За низкий шум при высокой долговечности тем более надо платить повышенной точностью изготовления.

Целесообразно напомнить, что появление бесконтактного ЭД постоянного тока вызвано острой необходимостью радикального увеличения долговечности ДПТ – идеологически главного параметра изделий в космической технике.

Как неоднократно отмечалось, приоритетным в обеспечении долговечности БДПТ является решение вопросов работоспособности ШП и их узлов в целом, при многочисленных сопутствующих факторах. Естественно, это распространяется и на другие виды опор.

Конструктивные особенности различных ЭД, упомянутых в статье, характеризуют их отличия в части решения специфических задач, но, в конечном счете, и они способствуют достижению все той же цели – увеличению долговечности.

Во всех случаях оптимальное и осязаемое решение главной задачи при необходимой стабильности может быть достигнуто только при точности изготовления ответственных деталей и узлов на уровне 4 - 5 классов. Но именно здесь наблюдается хроническое, со времен МЭТП (Министерства электротехнической промышленности), отставание в оснащении предприятий-изготовителей необходимым станочным и метрологическим оборудованием.

Разработка во ВНИИЭМ конструкций многочисленных БДПТ и специальных изделий на их базе выполнялась при непосредственном участии автора статьи и активном участии, в разные годы, конструкторов Л. М. Власовой, Н. П. Агуреевой, В. И. Смирнова, Е. М. Бугаевой, А. П. Мельникова, В. П. Голышевой и неоценимой помощи технологов В. Е. Кузнецова и А. И. Косарева.

Литература

1. Смазка шарикоподшипников микроэлектродвигателей для космических аппаратов / Е. М. Михайлов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2019. – Т. 170. – № 3 – С. 3 – 12.
2. Серия бесконтактных двигателей постоянного тока малой мощности / И. А. Вевюрко, И. И. Горжевский, В. Н. Кузьмин, Е. М. Михайлов [и др.] // Труды ВНИИЭМ. Электрические машины автоматических устройств. – Москва : ВНИИЭМ, 1976. – Т. 44. – С. 5 – 13.
3. Вейнберг Д. М. Уникальные электромеханические бортовые системы орбитальной космической станции «Мир» / Д. М. Вейнберг, В. П. Верещагин, О. М. Мирошник [и др.]. – Москва : Наука, 2001. – 52, [3] с.
4. Электродвигатель-маховик постоянного тока / В. Я. Журавлев, В. Н. Кузьмин, Е. М. Михайлов [и др.] // Труды ВНИИЭМ. Прецизионные электромеханические устройства. – Москва : ВНИИЭМ, 1985. – Т. 78. – С. 67 – 74.
5. Исследование неоднородности магнитного поля монокристаллических постоянных магнитов / Ю. М. Рабинович, Е. П. Рудобаба, Р. Я. Ларичкина // Труды ВНИИЭМ. Электрические машины автоматических устройств. – Москва : ВНИИЭМ, 1976. – Т. 44. – С. 129 – 137.
6. Постоянные магниты из сплавов Nd – Fe – В и водород / М. И. Барташевич, А. В. Андреев [и др.] // Тезисы докладов IX Всесоюзной конференции по постоянным магнитам, Суздаль, 20 – 23 сент. 1988 г. – Москва : Информэлектро, 1988.
7. Электронасосные агрегаты космических аппаратов с гидроопорами ротора / В. Н. Кузьмин, Е. М. Михайлов, С. А. Стома // Электротехника. – 1996. – № 5. – С. 24 – 26.
8. Влияние природы растворителя и стимуляторов наводороживания на диффузию водорода через стальную мембрану / И. В. Зарапина, Н. В. Шель, Е. Ю. Копылова [и др.] // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2010. – Том 12. – № 1. – С. 204 – 211.
9. Арчаков Ю. И. Водородная коррозия стали / Ю. И. Арчаков. – Москва : Металлургия, 1985. – 192 с.
10. Бесконтактные электродвигатели постоянного тока в электронасосных агрегатах космических аппаратов / С. А. Стома, В. В. Кудрявцев, В. Н. Кузьмин, Е. М. Михайлов // Электротехника. – 1999. – № 6. – С. 11 – 14.

Поступила в редакцию 02.04.2020

Евгений Михайлович Михайлов, кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор, т. (495) 365-30-41, 8 (903) 226-34-89. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

SPECIFIC FEATURES OF STRUCTURAL ELEMENTS OF CONTACTLESS MICRO ELECTRIC DC MOTORS FOR SPACE APPLICATIONS

E. M. Mikhailov

The article deals with particular properties of non-standard components of contactless electric DC motors and their role in achievement of special characteristics of the products. The influence of specific features of permanent magnets on the operability of electric motors is considered. Design solutions and principal methods of implementation thereof with consideration of existing technological capabilities. Their relation to resolution of the main problem - achievement of the maximum possible durability - is assessed.

Key words: durability, ball bearings, magnets, case, noise.

References

1. Lubrication of ball bearings of micro electric motors for spacecraft / E. M. Mikhailov // Matters of electromechanics. VNIEM proceedings. – Moscow : VNIEM Corporation JC, 2019. – V. 170. – No. 3 – Pp. 3 – 12.
2. Series of low-power contactless DC motors / I. A. Vevurko, I. I. Gorzhevskii, V. N. Kuzmin, E. M. Mikailov [et al.] // VNIEM proceedings. Electric machines of automatic devices. – Moscow : VNIEM, 1976. – V. 44. – Pp. 5 – 13.
3. Veinberg D. M. Unique electromechanical on-board systems of the MIR orbital space station / D. M. Veinberg, V. P. Vereshchagin, O. M. Miroshnik [et al.]. – Moscow : Nauka (Science), 2001. – 52, [3] p.
4. Electric DC reaction wheel / V. Ia. Zhuravlev, V. N. Kuzmin, E. M. Mikhailov [et al.] // VNIEM proceedings. High-precision electromechanical devices. – Moscow : VNIEM, 1985. – V. 78. – Pp. 67 – 74.
5. Study of non-uniformity of magnetic field of single-crystal permanent magnets / Iu. M. Rabinovich, E. P. Rudobaba, R. Ia. Larichkina // VNIEM proceedings. Electric machines of automatic devices. – Moscow : VNIEM, 1976. – V. 44. – Pp. 129 – 137.
6. Permanent magnets made of Nd – Fe – B alloys and hydrogen / M. I. Bartashevich, A. V. Andreev [et al.] // Abstracts of proceedings of IXth All Soviet Union Conference on Permanent Magnets, Suzdal, 20 – 23 September 1988. – Moscow : Informelectro, 1988.
7. Electrically driven pumps with rotor hydromounts for spacecraft / V. N. Kuzmin, E. M. Mikhailov, S. A. Stoma // Elektrotehnika (Electrical Engineering). – 1996. – No. 5. – Pp. 24 – 26.
8. Influence of solvent nature and hydrogenation stimulants on hydrogen diffusion through a steel diaphragm / I. V. Zarapina, N. V. Shel, E. Iu. Kopylova [et al.] // Condensed media and interphase boundaries. – 2010. – Volume 12. – No. 1. – Pp. 204 – 211.
9. Archakov Iu. I. Hydrogen-induced corrosion of steel / Iu. I. Archakov. – Moscow : Metallurgia (Metallurgy), 1985. – 192 p.
10. Contactless electric DC motors in electrically driven pumps of spacecraft / S. A. Stoma, V. V. Kudriavtsev, V. N. Kuzmin, E. M. Mikhailov // Elektrotehnika (Electrical Engineering). – 1999. – No. 6. – Pp. 11 – 14.

*Evgenii Mikhailovich Mikhailov, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.),
Leading Design Engineer, tel.: +7 (495) 365-30-41, +7 (903) 226-34-89.
(JC «Corporation VNIEM»).*