

*Канд. техн. наук В.Я. Авербух, канд. техн. наук А.Н. Аронзон, д-р техн. наук  
В.Я. Геча, канд. техн. наук И.А. Кроль, канд. техн. наук В.В. Федоров*  
ФГУП «НПП ВНИИЭМ»  
*д-р техн. наук И.В. Черный, инж. В.Ю. Панцов*  
ФГУП «Центр космических наблюдений»

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОМ СТЕНДЕ**

Достоверность результатов решения задачи о динамической точности космического аппарата (КА) с аппаратурой дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) существенным образом зависит от достоверности определения силовых и моментных возмущений, действующих со стороны электромеханических устройств на корпус КА. Временные зависимости возмущений могут быть определены как с применением математического моделирования электромеханических устройств как источников внутреннего возмущения КА, так и экспериментально. Экспериментальное определение возмущений позволяет получать более достоверные результаты, так как дает возможность непосредственного контроля штатного оборудования, устанавливаемого на КА. Если масса исследуемого привода значительно меньше массы КА, то измеренные на стенде возмущающие воздействия от привода могут интерпретироваться как нагрузки, действующие на корпус КА.

Для надежного экспериментального определения возмущений, создаваемых электромеханическими комплексами на корпус космического аппарата, НПП ВНИИЭМ использует силоизмерительное оборудование - шестикомпонентную силоизмерительную платформу типа 9281В фирмы «Kistler» (далее силоизмерительную платформу) [1]. Платформа позволяет определять реальное воздействие испытываемого электромеханического комплекса (масса комплекса до 300 кг, частота вращения 0,05 – 400 Гц) на места его крепления к КА в виде трех компонент главного вектора силы и трех компонент главного вектора момента.

На базе силоизмерительной платформы еще в середине 80-х годов прошлого века был создан расчетно-измерительный комплекс (РИК), включающий в себя кроме платформы персональный компьютер HP-216 (Hewlett Packard) с многоканальной платой аналого-цифрового преобразования (АЦП) и программное обеспечение [2].

За последние два десятилетия РИК позволил решить множество важнейших задач, связанных с анализом динамических систем космического назначения, а также с исследованиями специальных электромеханических приводных устройств. К примерам применения можно отнести задачи определения динамической точности информационных спутников [3], задачи анализа электромеханических приводных устройств (приводы ориентации солнечных батарей, сканеров, приводов антенн и др.) как источников внутреннего возмущения КА [4], задачи балансировки роторных систем в сборе [5], задачи контроля равномерности вращения роторов [6], задачи орбитального старта малого спутника [7] и многие другие.

Необходимость определения возмущающих воздействий, создаваемых современными приводами электромеханических устройств космического назначения, для которых характерны импульсный, с крутыми фронтами, характер электромагнитного момента двигателя, а также удлиненные нестационарные режимы функционирования, потребовала модернизировать РИК в части измерения и обработки результатов.

Это было вызвано тем, что персональный компьютер HP-216 с платой аналого-цифрового преобразования накладывал на применение РИК ряд ограничений, таких как ограниченный частотный диапазон до 1000 Гц, максимальная длительность измерений до 80 с, отсутствие возможности передачи измерительной информации в числовом виде для дальнейшей обработки и др.

Для решения современных задач в состав РИК был внедрен «виртуальный прибор» [8], реализованный на современном персональном компьютере с применением 16-канальной платы АЦП типа E-440 фирмы «L-Card» [9]. Данная плата аналого-цифровой обработки позволяет осуществлять многоканальный ввод аналоговых сигналов с частотой дискретизации АЦП до 400 кГц. Указанный фактор позволил значительно расширить возможности расчетно-измерительного комплекса, как по проведению более длительных измерений, так и по подробности сбора измерительной информации, что в свою очередь позволило обеспечить более подробную сегментную детализацию измерительной информации и повысить точность определения интегральных характеристик электропривода.

Кроме шести сигналов, поступающих от силоизмерительной платформы, регистрирующий комплекс позволяет производить измерения дополнительных параметров, таких как ток и напряжения, подаваемые на двигатель, сигналы от тахометров и других имеющихся в исследуемом приборе датчиков (до 10 штук). Наличие дополнительной измерительной информации позволяет испытателю более полно провести анализ природы возникновения возмущаю-

щих воздействий, создаваемых исследуемым приводом, провести проверку правильности их определения и выдать рекомендации по снижению уровня.

Блок-схема усовершенствованного расчетно-измерительного комплекса приведена на рис. 1.

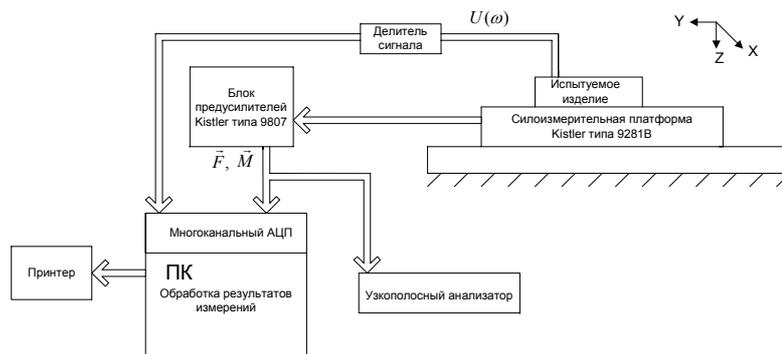
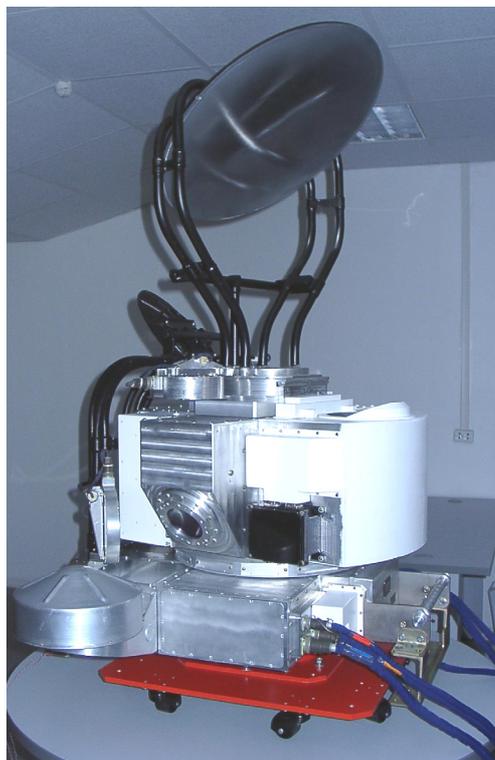


Рис. 1. Схема расчетно-измерительного комплекса

Модернизированный РИК и разработанная методика измерений с его применением были эффективно использованы для определения возмущений, создаваемых оптико-микроволновым сканером-зондировщиком МТВЗА-ОК [10] (рис. 2), который был разработан Центром космических наблюдений для российско-украинского космического аппарата «Січ-1М».

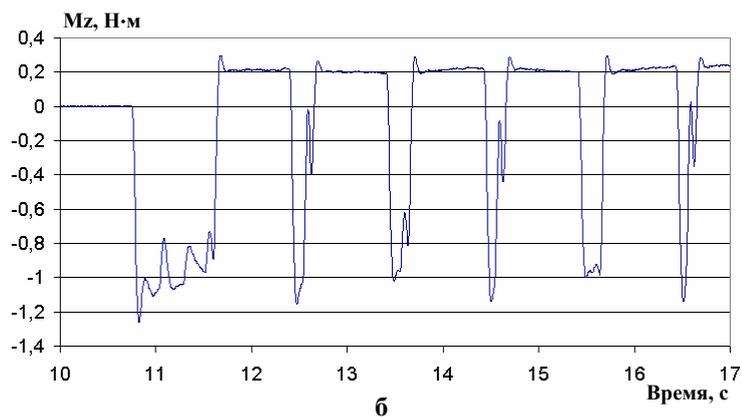
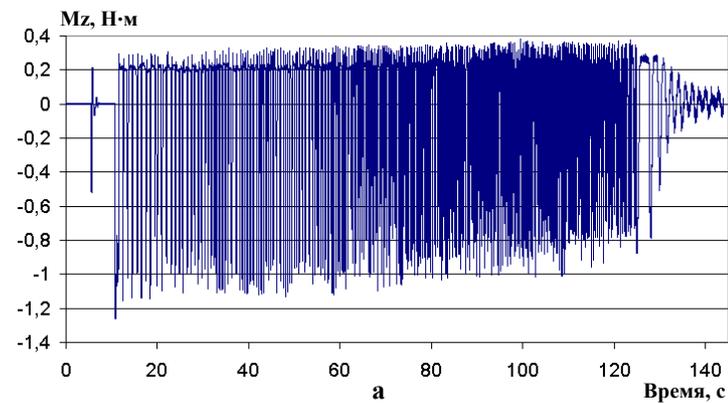
Антенная система сканера-зондировщика (антенный блок) приводится в движение бесконтактным двигателем постоянного тока (БДПТ) [11]. Частота вращения ротора двигателя составляет 0,35 1/с. Вращающаяся платформа антенного блока имеет кинетический момент на уровне 6 Н·м·с и с целью экономии рабочего тела газовой системы ориентации КА «Січ-1М», для сброса кинетического момента прибора применен управляемый от процессора МТВЗА-ОК двигатель-маховик ДМ5-50 [12], имеющий длительность разгона до номинальной скорости ~ 125 с. В связи с этим, для обеспечения требований компенсации кинетического момента антенного блока (АБ) в режиме стационарного вращения с точностью не хуже  $\pm 0,14$  Н·м·с применен специальный закон управления двигателем-маховиком ДМ5-50, при этом во время разгона – останова нескомпенсированный момент не должен превышать величину  $\pm 1,5$  Н·м·с.



**Рис. 2. Оптико-микроволновый сканер-зондировщик МТВЗА-ОК**

При исследовании привода наибольший практический интерес представляли переходные режимы «пуск» и «останов» при автономной и совместной работе составных частей прибора – АБ и двигателя-маховика (ДМ). В этих режимах наиболее значительные возмущения передаются на КА и происходит существенное изменение кинетического момента системы в целом.

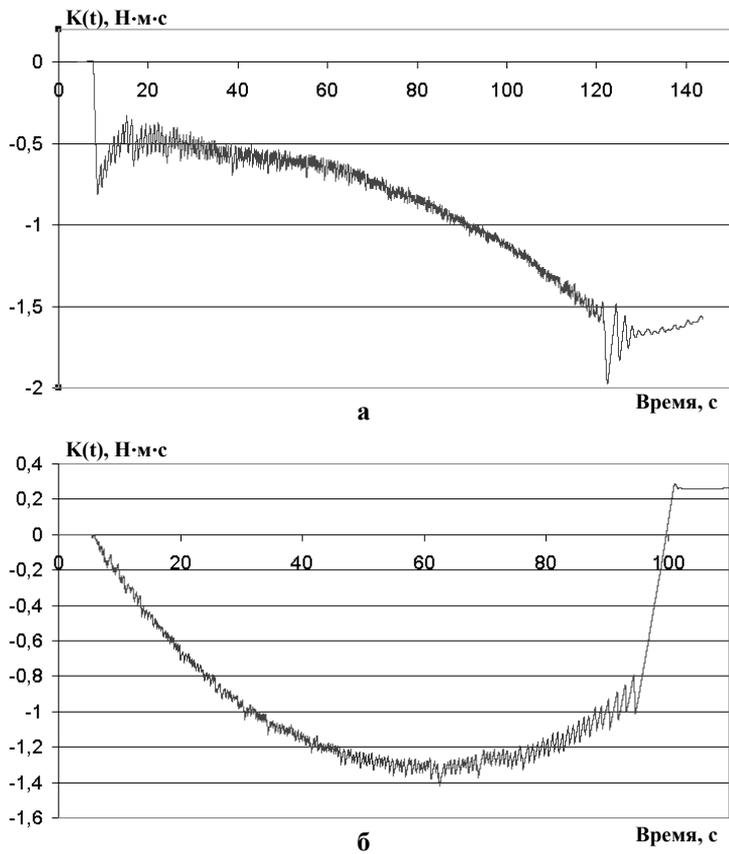
Разгон и управляемое торможение АБ сопровождается воздействием на основание сканера-зондировщика относительно оси  $Z$  знакопеременной последовательности чередующихся импульсов крутящего момента с крутыми фронтами разгонных импульсов момента электромагнитных сил  $M_{\mathcal{C}}$  и тормозных импульсов трения  $M_T^{\mathcal{C}}$  (рис.3).



**Рис. 3. Крутящий момент, создаваемый приводом МТВЗА-ОК относительно оси вращения (Z) при разгоне (а); то же в меньшем масштабе (б)**

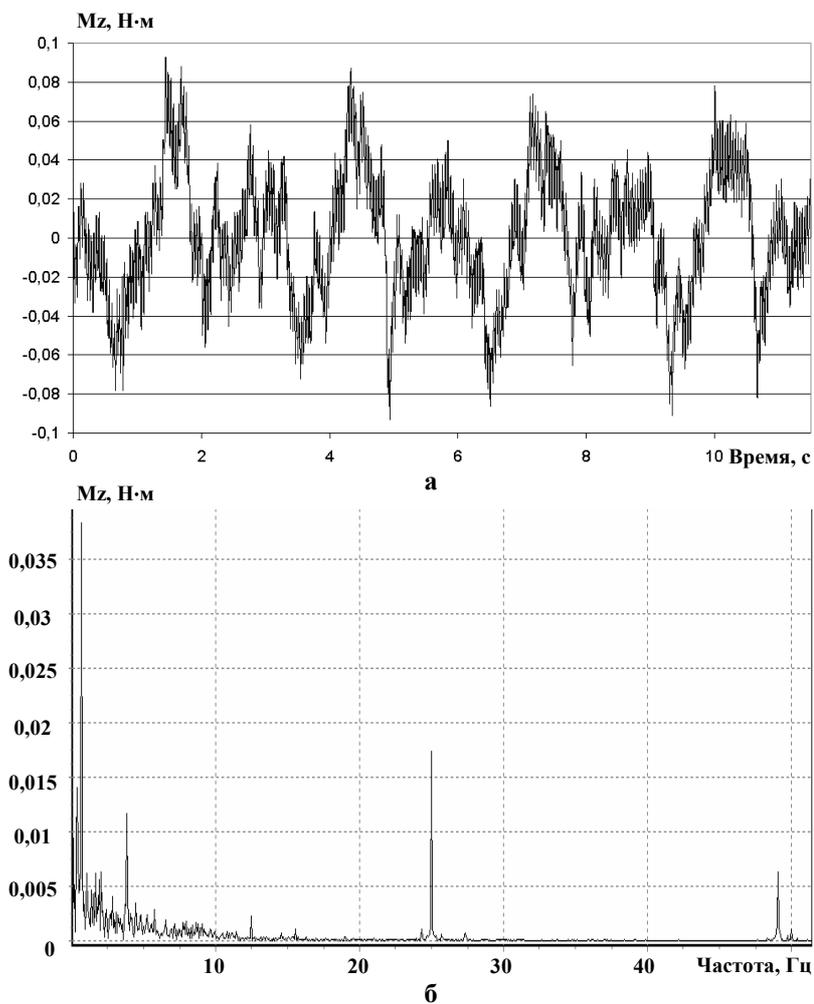
По результатам измерений в режиме «пуск-стационарный режим-останов» для сканера-зондировщика были установлены следующие параметры, характеризующие его импульсные некомпенсированные воздействия относительно оси Z на КА (рис. 4):

- импульс крутящего момента при первом импульсе разгона;
- кинетический момент при завершении разгона и переходе АБ на стационарный режим работы;
- кинетический момент в момент останова АБ после завершения управляемого торможения.



**Рис. 4. Кинетический момент, развиваемый приводом МТВЗА-ОК:  
а - при разгоне; б – при выбеге**

При работе в стационарном режиме поддержание постоянной скорости вращения сопровождается колебаниями момента приложенного к ротору двигателя АБ (рис.5,а). Спектральный состав крутящего момента в диапазоне частот 0-55 Гц (рис.5,б) включает частоты вращения АБ (0,35 Гц) и ДМ (48 Гц), а также гармоники с большими амплитудами на удвоенной частоте вращения АБ, частоте 4 и 25 Гц.



**Рис. 5. Крутящий момент привода:**  
**а – в стационарном режиме работы; б - спектральный состав**

Также для МТВЗА-ОК были определены кинетический момент, развиваемый АБ, момент инерции АБ, неравномерность вращения АБ, уровень остаточного дисбаланса АБ, предложен закон управления ДМ, обеспечивающий компенсацию кинетического момента прибора в пределах, заявленных в техническом задании на его раз-

работку. Полученные результаты были использованы для определения всех компонентов возмущений, создаваемых сканером-зондировщиком МТВЗА-ОК в различных режимах его функционирования на места крепления к космическому аппарату и для настройки сканирующей системы прибора с целью минимизации величины его динамического воздействия на корпус КА.

Для того чтобы провести точную настройку режима компенсации кинетического момента в условиях, исключающих влияние воздушной среды, главным образом на вращение маховика-компенсатора, а также подтверждения правильности экспериментально полученных величин кинетического момента АБ и его момента инерции был проведен второй этап испытаний прибора МТВЗА-ОК в вакуумной камере.

В ходе испытаний проведены исследования динамических характеристик маховика-компенсатора ДМ5-50 в вакууме. Развиваемый максимальный кинетический момент маховика-компенсатора ДМ5-50 при давлении  $10^{-5}$  мм рт.ст. и напряжении питания 30 В составляет  $\pm 6,0$  Н·м·с.

В соответствии с результатами, полученными на первом этапе испытаний, кинетический момент антенного блока МТВЗА-ОК в режиме стационарного вращения составляет  $K_{АБ} = 5,7$  Н·м·с (момент инерции антенного блока равен  $J_{АБ} = 2,61$  Н·м·с<sup>2</sup>). Для того, чтобы его скомпенсировать, кинетический момент маховика-компенсатора был установлен равным  $K_{МК} = -5,7$  Н·м·с (момент инерции ротора двигателя-маховика ДМ5-50 равняется  $J_{МК} = 0,0137$  Н·м·с<sup>2</sup>).

Контроль кинетического момента производился на основании измерений скорости вращения  $\omega$  как маховика-компенсатора, так и АБ и определялся соответственно

$$K_{МК} = J_{МК} \omega_{МК} \text{ и } K_{АБ} = J_{АБ} \omega_{АБ}.$$

Циклограмма разгона и стационарного вращения, а также циклограмма стационарного вращения и останова для рабочего режима привода МТВЗА-ОК приведены на рис. 6.

На этапе разгона максимальное значение нескомпенсированного кинетического момента АБ МТВЗА-ОК наблюдается перед выходом на режим стационарного вращения и достигает величины 0,5 Н·м·с.

В режиме стационарного вращения погрешность компенсации кинетического момента не превышает величину  $\pm 0,08$  Н·м·с.

На этапе останова антенного блока МТВЗА-ОК наблюдается избыточная компенсация кинетического момента, которая достигает величины 0,5 Н·м·с.

Таким образом, разработанная методика исследования динамических характеристик бортовых сканирующих систем на примере прибора МТВЗА-ОК демонстрирует возможность в достижении требуемых результатов по настройке режима компенсации кинетического момента в наземных условиях.

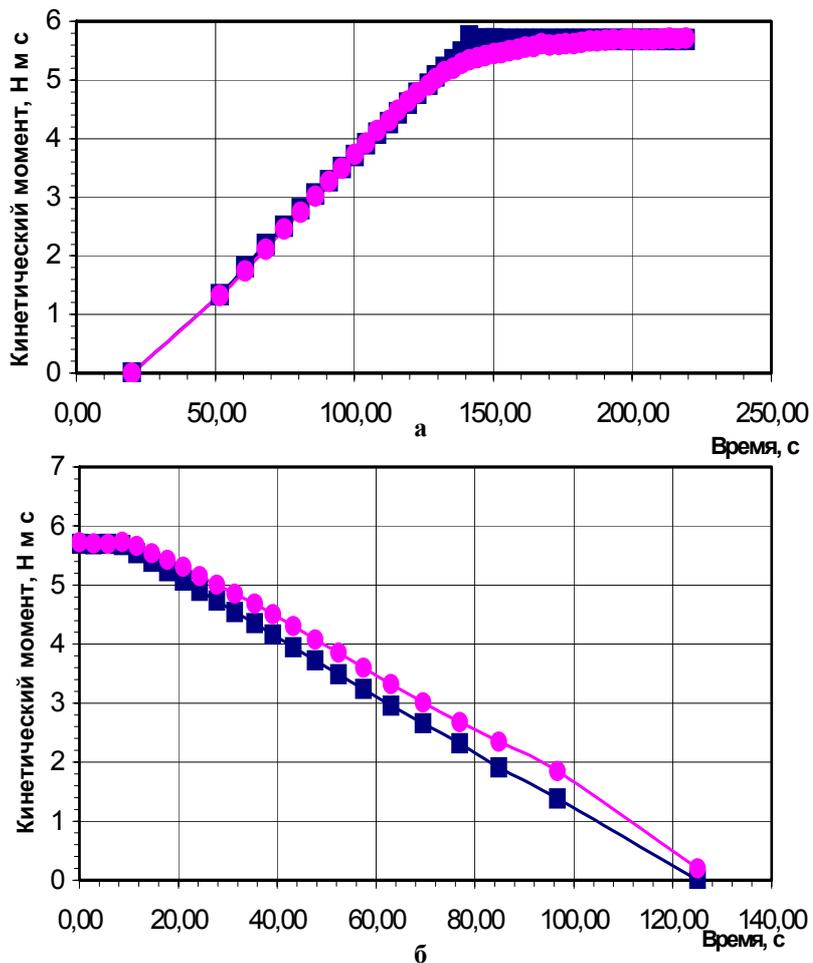


Рис. 6. Изменение кинетического момента АБ  $K_{AB}$  и маховика-компенсатора  $K_{MK}$  : а - во время разгона после подачи команды на включение МТВЗА-ОК; б - во время останова после подачи команды на отключение МТВЗА-ОК; ■ -  $K_{AB}$ ; • -  $K_{MK}$

## Выводы

1. Модернизированный расчетно-измерительный комплекс на базе шестикомпонентной силоизмерительной платформы Kistler 9281В позволяет определять весь спектр динамических характеристик современных электроприводов устройств космического назначения.

2. Результаты экспериментальных исследований могут быть использованы:

- для оценки возмущений, действующих на КА со стороны электроприводов устройств ДЗЗ;
- для математического моделирования динамики КА при этих возмущениях;
- для выбора законов управления приводами, обеспечивающих требуемый уровень возмущающих воздействий, передаваемых на корпус КА;
- приемочных испытаний приводов.

3. Аналогичный подход может использоваться для анализа динамики приводов устройств наземного назначения, например ответственных приводов механизмов, эксплуатируемых на АЭС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Martini K.H. Multicomponent Dynamometr using Quartz Crystals as Sensing Elements // ISA Transactions, V.22 N 1, P. 35. 1983.

2. Малаховский Е.Е. Динамическая точность стабилизации гибких космических аппаратов при внутренних возмущениях от электромеханических комплексов. Диссертация доктора технических наук. М.: НИИ ВНИИЭМ. 185 с. 1994.

3. Данилов-Нитусов А.Н., Колосов А.И., Малаховский Е.Е. Возбуждение гибкой структуры внутренним приводным устройством. М.: Проблемы машиностроения и надежности машин. № 3. С. 26. 1992.

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

5. Айриян Г.В., Малаховский Е.Е. Балансировка ротора на основе измерения сил и моментов, действующих на корпус машины. М.: Проблемы машиностроения и надежности машин. № 1. С. 23. 2000.

6. Малаховский Е.Е., Федоров В.В. Измерение неравномерности угловой скорости вращения. М.: Электротехника. № 3. С. 55-60. 2001.

7. Малаховский Е.Е. и др. Моделирование орбитального старта малого спутника. М.: Космические исследования. Т.38. № 1. С. 85. 2000.

8. Аронзон А.Н., Блинников Д.Н., Кроль И.А. Программно-аппаратное обеспечение измерений характеристик автоматизированных электроприводов. М.: Труды ВНИИЭМ. Т. 101. С. 219-236. 2004.
9. L-Кард. Каталог продукции. М.: L-Кард. 40 с. 2004.
10. Наконечный В.П., Панцов В.Ю., Прохоров Ю.Н., Стрельников Н.И., Черный И.В., Чернявский Г.М. и др. Оптико-микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ОК // Всероссийская научная конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Сборник докладов. М.: ИКИ РАН. С.139-145. 2003.
11. Федоров В.В. Синхронизированный тихоходный привод с бесконтактным двигателем постоянного тока. М.: Труды ВНИИЭМ. Т.83. С. 116-119. 1987.
12. Бугаева Е.М., Кузьмин В.Н., Михайлов Е.М., Стома С.А. Анализ конструкции двигателей маховиков. М.: Электротехника. № 7. С. 8-11. 2001.