

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

УДК 621.311.6

РАЗРАБОТКА БЛОКА БЕСКОНТАКТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

С.А. Афонская, С.А. Афонский,
А.А. Дульцев, Д.С. Шепталин
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Рассматривается блок бесконтактной передачи энергии (ББПЭ), который может повысить точность динамической стабилизации, рабочий ресурс, улучшить массогабаритные и энергетические показатели системы ориентации солнечных батарей космических аппаратов, работающих на солнечно-синхронных орбитах. Приведён алгоритм расчёта отдельных элементов ББПЭ с учётом результатов их моделирования методом конечных элементов.

Ключевые слова: космический аппарат, бесконтактная передача энергии, конечно-элементная модель, метод конечных элементов, расчёт и моделирование системы.

Системы ориентации солнечных батарей (СОСБ) искусственных спутников Земли многообразны и имеют много параметров, которые необходимо учитывать при их проектировании. Несмотря на то, что по многим из них получены хорошие показатели (масса электроприводов СОСБ всего 5 – 7 кг при полезной нагрузке аппарата не менее 350 кг), в СОСБ существует сложная проблема передачи электрической энергии, выработанной вращающимися солнечными батареями, в «неподвижный» корпус КА, где расположены потребители электрической энергии. В результате вращения батарей, в случае использования кабельного барабана, кабели, передающие электрическую энергию, и сигналы управления, подвержены циклическим механическим воздействиям. На протяжении всего полёта кабели испытывают многочисленные циклы кручения [1].

Использование вращающегося контактного токосъёмного устройства характеризуется повышенным моментом сопротивления и износом механически сопряжённых трущихся поверхностей.

Однако для КА на солнечно-синхронных орбитах (ССО) нет необходимости в использовании вращающихся контактных токосъёмных устройств, так как фотоэлектрические батареи всё время ориентированы на Солнце и не вращаются. В связи с этим авторы предлагают рассмотреть принципиально другой способ передачи энергии – бесконтактный.

Известно несколько принципов, способных обеспечить бесконтактную передачу энергии: электромагнитный, инфракрасно-лазерный, передача в диапазоне СВЧ.

Под электромагнитным принципом понимается взаимодействие катушек с определёнными числами витков, аналогичное открытому трансформатору. В случае передачи энергии на резонансных частотах – использование резонансных контуров (LC). Анализ зарубежных источников [2, 3] показал возможность передачи энергии мощностью несколько киловатт (до 3 кВт) на расстояния до 2 м с коэффициентом эффективности 0,86 – 0,93. Такой способ передачи безопасен для окружающего пространства.

В СВЧ-диапазоне возможно создание бесконтактной передачи СВЧ энергии с помощью специальных антенн. Коэффициент передачи между этими антеннами зависит от расстояния между ними, диапазона частот, требований поворота вокруг оси одной из антенн. Возможно достигаемые результаты для коэффициента передачи 0,5 – 0,8 при малых расстояниях до 0,9. Однако для передачи постоянного тока требуется использование СВЧ-генератора большой мощности с высоким КПД, а также приёмник, способный принимать большую мощность в СВЧ-диапазоне, что в настоящее время вызывает большое сомнение, так как отсутствуют диоды СВЧ-диапазона с большой мощностью, кроме того, передача большой мощности СВЧ ограничена пробоем в линиях питания антенны и потерями в питающих линиях. Также имеется опасность облучения СВЧ-сигналами большой мощности бортовой аппаратуры, так как даже при КПД специальной антенны 0,8 – 0,9 оставшая мощность 0,2 – 0,1 излучается во внешнее пространство.

Инфракрасно-лазерный принцип отличает то, что энергию в этом случае переносят непосредственно

частицы света. Однако эффективность таких систем пока не велика 0,15 – 0,3. Это в значительной степени обусловлено расфокусированием лазерного луча при передаче. Вместе с маленьким КПД у этого принципа есть ещё один существенный недостаток – небезопасность использования, связанная с тепловым действием инфрокрасного излучения.

В настоящее время все задачи приёма и передачи энергии, основанные на использовании СВЧ и лазерного излучения в космосе, ограничивались областью передачи и приёма информации и не требовали для своего решения ни относительно больших величин передаваемой мощности, ни высоких значений эффективности её передачи.

В связи с этим для решения задачи по бесконтактной передаче мощности для системы питания КА наиболее подходящим является электромагнитный принцип.

В разрабатываемом блоке передача энергии осуществляется бесконтактно через немагнитный зазор.

Основным элементом блока бесконтактной передачи энергии (ББПЭ) является трансформатор, входящий в состав мостового DC-DC преобразователя, для расчёта которого был разработан алгоритм, основу которого составил классический расчёт энергетических параметров трансформатора [4], но с учётом данных, полученных в результате конечно-элементного моделирования данного трансформатора. Разработанный алгоритм предполагает несколько этапов расчёта. На первом этапе на основании геометрии сердечника и технических данных системы, а также на основании выбранной схемы преобразователя рассчитываются: мощность выходной обмотки, суммарная мощность обмоток, а также числа витков для каждой из обмоток [5]. Исходные данные для расчёта: напряжение на входной обмотке U_1 ; напряжение на выходной обмотке $U_{\text{вых}}$; ток нагрузки $I_{\text{н}}$; частота питающей сети f .

Выходная мощность

$$P_{\text{н}} = I_{\text{н}}(U_{\text{вых}} + k_1 g U_{\text{пр}}), \text{ Вт},$$

где k_1 – коэффициент, зависящий от схемы выпрямителя (в рассматриваемой схеме преобразователя $k_1 = 2$); $U_{\text{пр}}$ – прямое падение напряжения на одном диоде выпрямителя (в рассматриваемой схеме преобразователя $U_{\text{пр}} = 1 \text{ В}$).

Габаритная мощность трансформатора

$$P_{\text{т}} = P_{\text{н}} \left(\frac{\sqrt{2}}{\eta} + 1 \right), \text{ В}\cdot\text{А},$$

где η – КПД трансформатора (задаваясь КПД схемы, например, $\eta = 0,98$).

Затем задаётся ряд коэффициентов (из таблиц для выбранной схемы преобразователя), и рассчитывается следующий параметр – произведение сечения сердечника и сечения окна трансформатора $s_c s_0$ [5]. Сравнивается расчётное значение $s_c s_0$ с параметром, взятым из таблицы. И если оно меньше табличного значения, то выбирается табличное значение, и рассчитывается количество витков для входной w_1 и выходной w_2 обмоток. Если же значение $s_c s_0$ трансформатора больше табличного значения, осуществляется корректировка исходных данных, и производится пересчёт этого параметра.

Далее на основании этих данных рассчитывается плотность тока в обмотках трансформатора и площадь сечения витков каждой из катушек. И вносятся как исходные данные в конечно-элементную модель трансформатора.

На втором этапе рассчитываются определяемые энергетические параметры трансформатора на основании данных конечно-элементного моделирования [6].

Геометрические построения конечно-элементной модели сердечника трансформатора были выполнены в программе AutoCad (рис. 1).

Исходные числовые данные получают в результате первого этапа расчёта в соответствии с алгоритмом.

В результате получим значение КПД трансформатора. Используя разработанный алгоритм, были рассчитаны несколько трансформаторов, отличающихся обмоточными данными. После чего были проведены экспериментальные исследования.

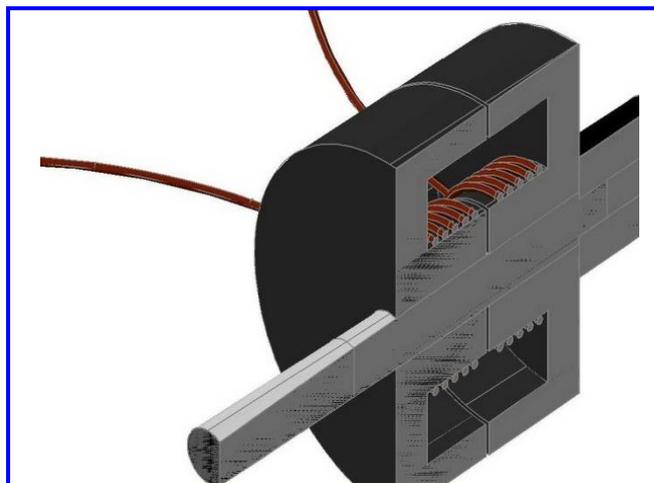


Рис. 1. 3D модель сердечника трансформатора в среде AutoCad

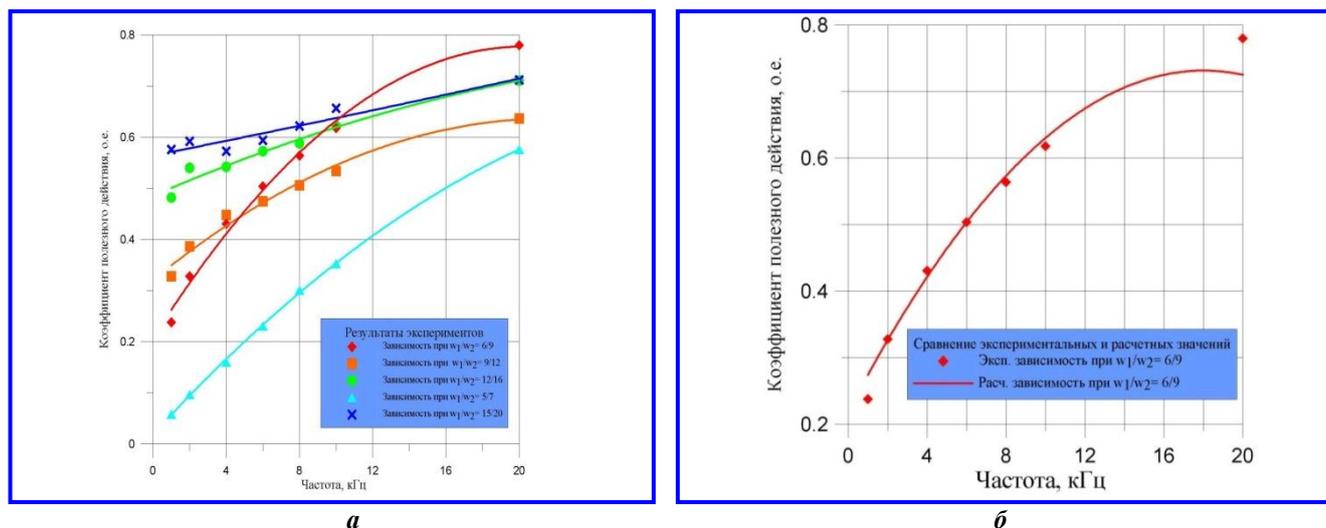


Рис. 2. Зависимости КПД от частоты питающей сети, полученные на макете (а); сравнение экспериментальных и расчётных значений (б)

Для проверки алгоритма был изготовлен и испытан макет БППЭ. Измерение КПД трансформатора проводилось при номинальной выходной мощности 30 Вт и установленном выходном напряжении 27 В. На рис. 2, а приведены экспериментально полученные зависимости КПД трансформатора от частоты, на рис. 2, б – сравнение экспериментальных и расчётных значений.

По данным экспериментов была построена зависимость КПД от частоты питания трансформатора, и выбран наиболее подходящий.

Экспериментальные и расчётные зависимости КПД трансформатора для соотношения витков обмоток 6/9 достаточно близки и различаются незначительно, что является вполне приемлемым.

С этим трансформатором был сконструирован макет БППЭ, который включает следующие элементы:

- трансформатор, обмотки которого поворачиваются друг относительно друга в продольной оси вращения;
- шаговый двигатель SM200-0,22-1-02, используемый для взаимного вращения сердечников трансформатора;
- система управления шаговым двигателем.

Макет БППЭ, представляющий собой аналог электромеханического блока (ЭМБ) СОСБ КА, сравнивался с некоторыми ранее изготовленными, в том числе и в ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» (табл. 1).

Сравнение проводилось для ЭМБ СОСБ КА, классифицируемых в отечественных и зарубежных публикациях как малые космические аппараты со следующими оговорками: масса разработанного макета БППЭ оценивалась без учёта подшипниковых щитов; для разработанного макета БППЭ, такие параметры как скорость вращения и момент

инерции не определялись, так как не являются существенными для КА, работающих на ССО.

Результаты сравнения показали, что разработанный БППЭ достаточно перспективен в составе привода СОСБ КА, работающего на ССО, и имеет следующие особенности:

- увеличение ресурса работы вследствие отсутствия механического контакта (для контактных колец) и циклов закручивания токопроводящего кабеля (для кабельного барабана) в узле токосъёма;
- использование высокочастотных активных материалов сердечника трансформатора и современной элементной базы для БППЭ позволяет уменьшить его габариты и массу до приемлемых размеров и получить высокий КПД;
- схемотехнические силовые элементы преобразователя совместимы с существующими элементами СЭС КА.

Не менее важным элементом БППЭ является мостовой DC-DC преобразователь.

Внутри системы питания КА с бесконтактной передачей энергии можно рассматривать две основные технологии проектирования DC-DC преобразователей:

- технологию импульсных источников питания с широтно-импульсной модуляцией;
- резонансную технологию импульсных источников питания с высоким КПД.

Импульсные источники питания с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) обычно используются в переносных изделиях, в авиации и автомобилестроении, в небольших измерительных приборах, автономных устройствах и особенно в тех устройствах, в которых требуются высокий КПД и несколько выходных напряжений.

Квазирезонансные импульсные источники питания с ШИМ нашли своё место в устройствах, от которых также требуются минимальная масса и наименьшие размеры, более высокое КПД и, что самое важное, пониженный уровень излучаемого шума. Обычно такие источники питания используются в оборудовании воздушных судов, электронике космических кораблей, легковесном переносном оборудовании и модулях.

Недостатками квазирезонансного преобразователя являются повышенные нагрузки по напряжению и току на силовые компоненты. Максимальные напряжения или токи могут быть в два – три раза больше, чем в преобразователях с ШИМ. Следовательно необходимо использовать ключи и выпрямители с большими номиналами, которые могут и не иметь хороших характеристик проводимости.

Квазирезонансные преобразователи используют колебательный LC-контур, который размещается между ключом и трансформатором и/или между

трансформатором и выходным фильтром. В табл. 2 приведены технологии источников питания по различным показателям [7].

Для бесконтактного способа передачи энергии на КА и создания макетного образца для испытаний применяется технология импульсных источников питания с ШИМ.

При мощностях от 500 Вт до нескольких киловатт применяется мостовая топология. Она требует четыре ключа, два из которых имеют плавающие схемы управления, и её реализация самая дорогостоящая, однако, при таких уровнях выходной мощности дополнительные расходы необходимы.

Для разрабатываемого привода с бесконтактной передачей энергии требуется диапазон мощностей 300 – 500 Вт, поэтому целесообразнее проектировать преобразователь типа DC-DC, собранный на основе транзисторного моста и мостового выпрямителя с выходным LC-фильтром.

Для исполнения транзисторного преобразователя

Таблица 1

Системы ориентации солнечных батарей космических аппаратов

Параметры	Космический аппарат, модель			
	Монитор-Э, У10	Кондор-Э, Р10	Метеор-М, 830	Макет ББПЭ
Состав СОСБ: блок (количество блоков)	БУ (1) ЭМБ (2)	БУ (1) ЭМБ (4)	БУ (1) ЭМБ (2) БДС (4)	БУ (1) ЭМБ (1)
Скорость вращения СБ, град/с	0,57	0,25 0,75	0,3	–
Момент инерции СБ, кг·м ²	4	125 7	40	–
Максимальный угол поворота, град	без ограничения	180 – 240	120	без ограничения
Погрешность ориентации СБ, град	3,5	2,0	2,0	1,8
Потребляемая мощность, Вт	15	20	20	6
Масса СОСБ (ЭМБ), кг	17,0(7,0 × 2)	21,5(5,25 × 2 – 4,0 × 2)	16,0(4,5 × 2)	3,5(1 – 1,5)

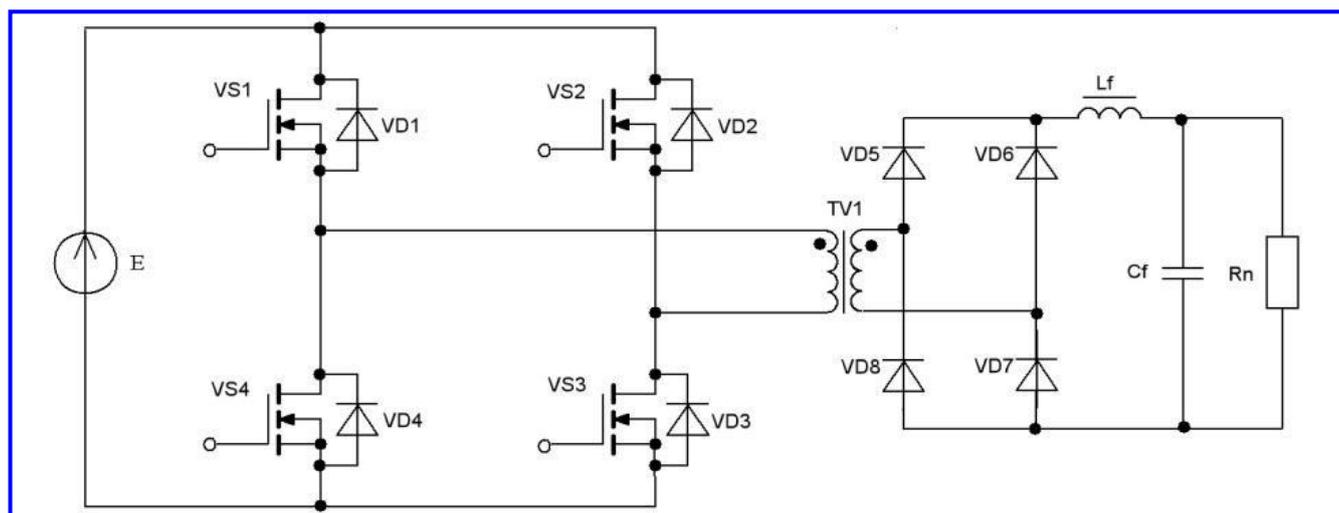


Рис. 3. Функциональная схема силовой части преобразователя

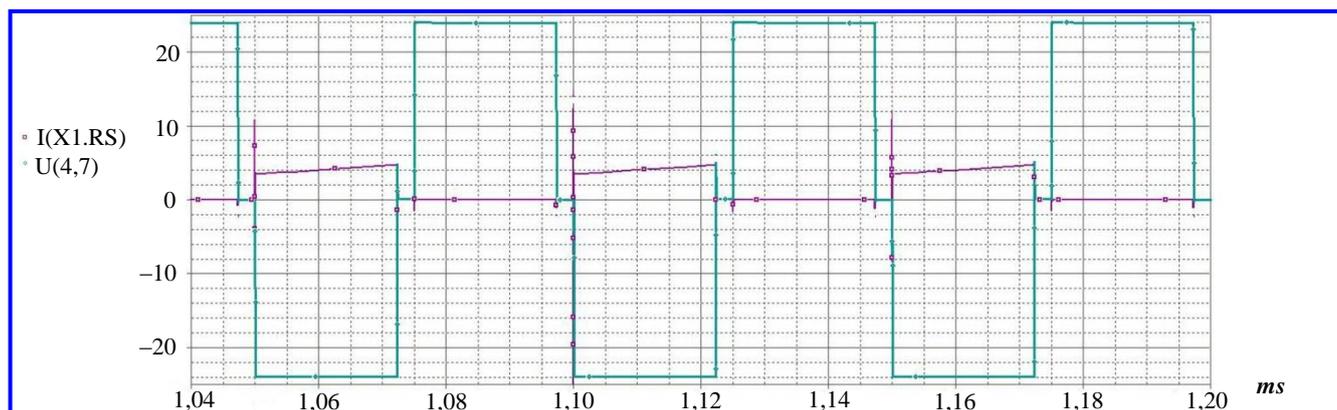


Рис. 4. Ток транзистора VS1 и напряжение на выходе автономного инвертора напряжения

Таблица 2

Технологии источников питания по различным показателям

Показатель	Импульсный стабилизатор с ШИМ	Импульсный стабилизатор с резонансным переходом	Квазирезонансный импульсный стабилизатор
Стоимость	Высокая 2600 р. Mean Well Enterprises Co., Ltd.	Высокая 3100 р. Mean Well Enterprises Co., Ltd.	очень высокая 4900 р. Mean Well Enterprises Co., Ltd.
Масса	Небольшая (1000г)	Небольшая (1100г)	Небольшая (1200 г)
RF-шум	Высокий	Средний	Средний
КПД	70 – 85 %	78 – 92 %	78 – 95 %

типа DC-DC требуется три основных блока [5]:

- входной блок – инвертор;
- промежуточный блок – трансформатор;
- выходной блок – выпрямитель (для улучшения качества выходного напряжения ставится выходной фильтр).

Мостовой преобразователь, спроектированный авторами, состоит из транзисторного моста, трансформатора, мостового выпрямителя и индуктивно-ёмкостного фильтра (рис. 3).

Фактические кривые токов, протекающие в первичных и вторичных обмотках трансформатора, отличаются от тех, что показаны на рис. 4, вследствие влияния индуктивностей рассеяния, паразитных ёмкостей.

Входной транзисторный мост преобразует входное постоянное напряжение в переменное напряжение высокой частоты, которое подаётся на первичную обмотку трансформатора. Через трансформатор напряжение передаётся во вторичную обмотку, которая является дросселем мостового выпрямителя. На выходе выпрямителя получаем однополярное напряжение. Для увеличения качества напряжения на выходе выпрямителя ставится сглаживающий фильтр.

Силовая часть преобразователя и система управления были рассчитаны в MathCad и промоделированы в соответствующих программных продуктах. При моделировании в качестве ключевых элементов использовались реальные модели ключей.

Полученные данные при моделировании были подтверждены результатами испытаний макетного образца DC-DC преобразователя.

Система управления преобразователем должна:

- осуществлять подачу импульсов напряжения на выводы управления мостового преобразователя;
- иметь достаточную амплитуду импульсного напряжения для нормальной работы транзисторов VS1 – VS4;
- обеспечивать стабилизацию выходного напряжения;
- реализовывать требуемый коэффициент заполнения для допустимой стабилизации напряжения на нагрузке;
- обеспечивать защиту по току и напряжению.

Таким образом, обеспечивается слежение за током и напряжением нагрузки.

Система управления на контроллере PIC18 [8] обрабатывает сигналы с датчиков тока и напряжения, которые установлены в силовой части схемы мостового преобразователя, в соответствии с этими сигналами вырабатывает сигналы управления, которые через драйверы управления передаются в силовую часть схемы. Напряжение регулируется подачей на транзисторы входного инвертора сигнала, модулированного широтно-импульсным способом.

Системы управления можно разбить на несколько блоков:

- контроллер, отвечающий за формирование ШИМ-сигнала. Реагирует на изменение выходного напряжения при перепадах напряжения на входе в

допустимых пределах ($\pm 2\%$). Содержит в себе схему делителя частоты и распределения импульсов управления между диагоналями входного инвертора;

– схему защиты по максимальному току. Отключает передачу импульсов управления с драйвера на входной инвертор в случае превышения максимального значения тока нагрузки;

– систему индикации, которая показывает по какой причине произошло отключение устройства.

Выводы

1. Применение БПЭ в составе СОСБ КА может повысить точность динамической стабилизации, рабочий ресурс, улучшить массогабаритные и энергетические показатели.

2. Разработан алгоритм расчёта отдельных элементов БПЭ с учётом результатов их конечно-элементного моделирования. Весь алгоритм выполнен при использовании современных общедоступных программ.

3. Разработанный БПЭ может быть использован не только в системе привода СОСБ КА, но и в других системах, где есть необходимость в бесконтактной передаче электрической энергии между подвижными частями.

Литература

1. Васильев В.Н. Системы ориентации космических аппаратов / В.Н. Васильев – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – 310 с.
2. Contactless power transfer to a rotating disk / J. P. C. Smeets, D. C. J. Krop, J. W. Jansen, E. A. Lomonova // Electromechanics and Power Electronics Group. – Eindhoven University of Technology, Netherlands, 2010. – 4 – 7 July, 2010. – P. 748 – 753.
3. High efficiency contactless energy transfer system with power electronic resonant converter // A. J. Moradewicz, M. P. Kazmierkowski. – Electrotechnical Institute IEL, 04-703 Warsaw, Poland. – Vol. 57. – № 4. – 2009.
4. Шахов С. Проектирование планарных трансформаторов / С. Шахов // Компоненты и технологии. – 2003. – № 7.
5. Мелешин В. Транзисторная преобразовательная техника / В. Мелешин. – М. : Техносфера, 2006. – 632 с.
6. Буль О. Б. Методы расчёта магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поля и программа FEMM: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / О. Б. Буль. – М. : Издательский центр «Академия», 2005. – 336 с.
7. Кёниг М. Полное руководство по PIC-микроконтроллерам / М. Кёниг. – Киев : «МК-Пресс», 2008. – 320 с.
8. Авербух В. Я., Лещинский Э. А. Новое поколение систем ориентации солнечных батарей космических аппаратов / В. Я. Авербух, Э. А. Лещинский // Вопросы электромеханики. Приборы и сферы использования космических аппаратов дистанционного зондирования земли. Итоги и перспективы развития. Труды НПП ВНИИЭМ, 2005. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ». – Т. 102. – С. 35 – 39.

Поступила в редакцию 01.03.2011

Светлана Андреевна Афонская, инженер, e-mail: safonskaya@ya.ru.

Сергей Андреевич Афонский, инженер.

Александр Александрович Дульцев, начальник лаборатории.

Денис Сергеевич Шепталин, аспирант, мл. научн. сотрудник.

Т. (495) 366-33-56.