

Проблемы создания электрогенераторов для турбомашинных преобразователей энергетических установок космического назначения

БОЯРЧУК К.А., ВЕРЖБИЦКИЙ Л.Г., БИРЮЛЯЕВ Ю.А., КРУГЛОВА М.Л.,
КОВАЛЕВ Л.К., КОВАЛЕВ К.Л., ТУЛИНОВА Е.Е.

Анализируются возможные схемы синхронных электрических генераторов для перспективной космической ядерной энергоустановки. Приводятся результаты предварительных расчетов параметров синхронных генераторов с внешнезамкнутым магнитопроводом и генераторов с постоянными магнитами на роторе. Сравниваются возможности их применения в космической ядерной установке.

Ключевые слова: синхронный генератор, энергетические установки, космические объекты

Возросший в последние 20 лет интерес к космической энергетике связан с появлением в промышленно развитых странах национальных программ, предусматривающих расширение масштабов присутствия человека в Солнечной системе для решения актуальных задач в аэрокосмической, научно-технологической, экономической и других областях [1]. Анализ показывает, что для дальнейшего развития космонавтики, особенно в части реализации перспективных межпланетных проектов, необходимо значительно повысить энергетическое обеспечение космических объектов за счёт применения в их составе ядерных энергетических установок (ЯЭУ) [2].

Тепловая энергия в этих установках может быть преобразована в электрическую с помощью либо термоэмиссионных преобразователей (ТЭП) и термоэлектрических генераторов (ТЭГ), либо турбомашинных преобразователей, работающих по различным термодинамическим циклам (Рэнкина, Брайтона и др.) [7, 9].

В 1970-е годы в нашей стране наибольшее внимание уделялось разработке устройств с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую, что объяснялось возможностями реализации ЯЭУ с оптимальными массоэнергетическими показателями при умеренных уровнях мощности (1–30 кВт) [3, 9]. В то же время космические электроэнергетические установки большой мощности (~1 МВт и более) могут быть реализованы на основе ЯЭУ с турбомашинными установками, работаю-

Possible schematic designs of synchronous generators for a prospective space nuclear power installation are analyzed. Results from preliminary calculations of the parameters of synchronous generators with an externally closed magnetic circuit and generators with permanent magnets on the rotor are presented. The possibilities of using them in a space nuclear power installation are compared.

Key words: synchronous generator, power installations, space facilities

щими по замкнутым термодинамическим циклам [3–5].

Выбор и отработка оптимальных термодинамических циклов преобразования и создание легких и надежных высокооборотных электрических машин для космической электростанции являются на данном этапе сложными научно-техническими проблемами [3].

Многочисленными теоретическими и экспериментальными работами, начатыми еще в 60-х годах прошлого века, было показано, что создание ЯЭУ с турбомашинным преобразованием энергии является одним из наиболее перспективных направлений космической энергетике, а при мощностях от десятков киловатт до мегаватт со сроком эксплуатации 7–10 лет, не имеющим в настоящее время альтернативы [6, 7].

Следует особо отметить, что перспективные схемы турбомашинных преобразователей характеризуются высокими значениями частоты вращения и должны выполняться одновальными (без промежуточных устройств между электрогенератором и турбокомпрессорным блоком). Жёсткие ограничения по массогабаритным характеристикам приводят к необходимости повышения частоты вращения до предельных значений, обусловленных механической прочностью ротора турбогенератора-компрессора. Диапазон значений частот вращения от $2 \cdot 10^4$ до 10^5 мин⁻¹, причём нижняя область до $3 \cdot 10^4$ относится к установкам с паротурбинным циклом Рэнкина, а диапазон $(4, 10) \cdot 10^4$ мин⁻¹ — к установ-

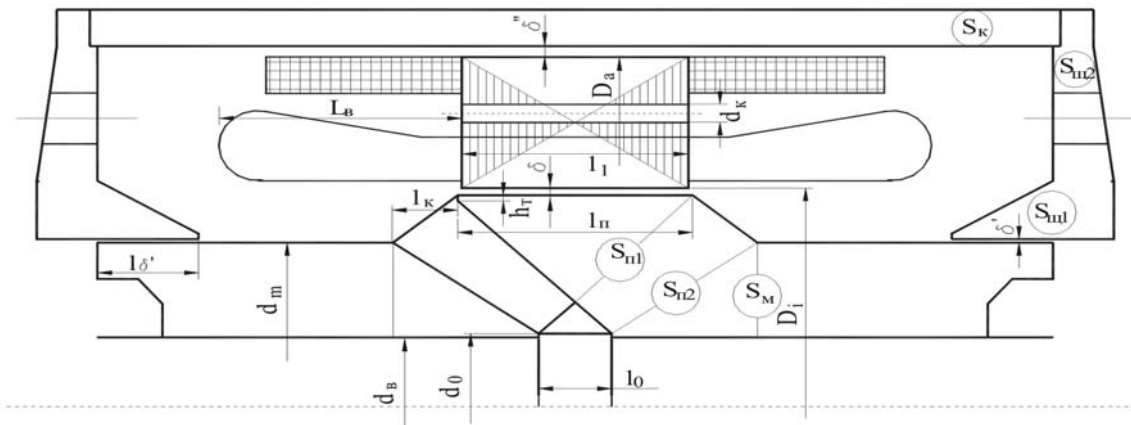
кам, работающим по замкнутому газотурбинному циклу Брайтона [4, 10].

Как известно, повышение частоты вращения электромеханического преобразователя ведёт к снижению его массы и габаритов. С учётом требований по надёжности и ресурсу работы электрогенераторы должны выполняться бесконтактными и без обмоток на роторе. Этим требованиям в наибольшей степени отвечают генераторы с внешне-замкнутым магнитным потоком и когтеобразным ротором (ВЗМП) и синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов на роторе – магнитоэлектрические генераторы (МЭГ). Каждый из генераторов указанных типов обладает рядом особенностей, ограничивающих возможности их применения в зависимости от конструктивного исполнения турбокомпрессорного блока, свойств и параметров рабочего тела и условий работы в энергоустановках определенных типов. Несмотря на свою важность, вопрос использования в составе АЭУ синхронных генераторов с ВЗМП и с постоянными магнитами в литературе рассмотрен недостаточно полно. В данной статье делается попытка восполнить этот пробел.

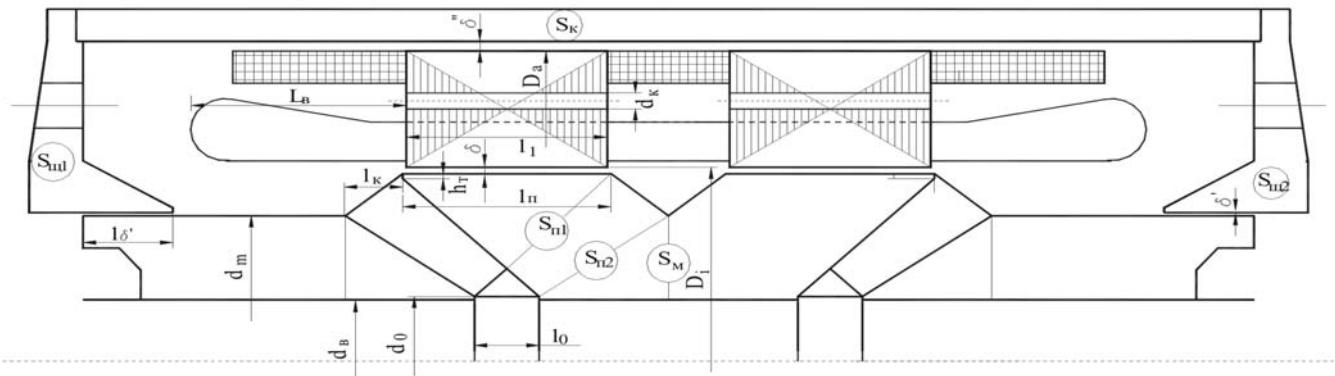
Генераторы с ВЗМП и когтеобразными полюсами на роторе имеют биметаллический ротор, который

формирует рабочий магнитный поток в зазоре. Материал полюсов ротора должен обладать высокими магнитными свойствами и прочностными характеристиками. Наилучшим материалом с этой точки зрения является высоколегированная сталь типа 20Х3МВФ, имеющая предел текучести $s_T \gg 75 \text{ кг/мм}^2$ и индукцию насыщения $B_{50} \gg 1,65 \text{ Тл}$ при напряженности магнитного поля 50 А/см и температуре примерно до $300 \text{ }^\circ\text{C}$. Типичные конструктивные схемы одно пакетного и двух пакетного генераторов приведены на рис. 1, а и б.

Особенностью генераторов с ВЗМП является аксиальное направление основного магнитного потока и потока рассеяния в активной зоне генератора, что при повышении частоты вращения и, как следствие, уменьшении по условиям прочности диаметра может приводить к существенному возрастанию индукции в сечениях когтеобразных полюсов и, в конечном счете, к ограничению предельной мощности генератора. На основании анализа разработанных генераторов с ВЗМП можно показать, что при предельно допустимой индукции $B_{кр} \gg 1,8 \text{ Тл}$ в критическом сечении полюсов ротора $S_{п1}$ (рис. 1,а) относительная длина активной зоны одно пакетного генератора с ВЗМП будет обратно пропорциональна индукции в рабочем зазоре:



а)



б)

Рис. 1. Схемы магнитной цепи генератора с ВЗМП при однократном (а) и двукратном (б) использовании потока

$$\frac{l_{\text{п}}}{D_{\text{р}}} = l = \frac{k}{B_{\text{д}}}, \quad (1)$$

где $l_{\text{п}}$ – длина пакета статора; $D_{\text{р}}$ – диаметр ротора; $B_{\text{д}}$ – относительное значение индукции в рабочем воздушном зазоре (за базовую принята индукция 1 Тл); $k = 0,33$ – коэффициент пропорциональности. Зависимость (1) получена на основании обработки экспериментальных данных большой серии разработанных генераторов с осевым возбуждением.

В 1966 г. в Истринском отделении ВНИИЭМ были проведены расчетно-теоретические исследования предельных диаметров, предельной мощности и относительной массы быстроходных синхронных машин с ВЗМП. В итоге получены выражения для предельных диаметров $D_{\text{пр}}$ (см) и мощности $P_{\text{пр}}$ (кВ·А):

$$D_{\text{пр}} = \frac{\sqrt{s_m}}{0,133(n/10^3)}; \quad (2)$$

$$P_{\text{пр}} = 320 \frac{(s_m / 5 \times 10^3)^{1,665}}{(n_{\text{н}} / 2,4 \times 10^4)^{2,48}}. \quad (3)$$

(В (2) и (3) частота вращения n , мин^{-1} .)

По этим выражениям были рассчитаны семейства кривых (рис. 2 и 3) $D_{\text{пр}} = j(s_m, n)$ и $P_{\text{пр}} = y(s_m, n)$, позволяющих определить основные размеры и характеристики генератора при заданных показателях прочности материала ротора и частоте вращения турбокомпрессорного блока. Зависимости на рис. 2 и 3 получены в диапазоне частот вращения $n = 15 \times 10^3, 60 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$. В формулах (2) и (3) приняты коэффициент запаса по прочности $k_3 = 2$ и угонная частота вращения $n_{\text{у}} = 1,1n_{\text{ном}}$.

Зависимости (2) и (3) показывают, что при указанных выше прочностных характеристиках материала ротора ($s_m = 70 \text{ кг/мм}^2$) предельная мощность генератора с ВЗМП, выполненного по классической схеме (см. рис. 1), снижается с ростом частоты вращения и при фиксированном значении частоты вращения с учетом условия (1) может быть увеличена лишь за счёт повышения прочности материала ротора. Аналогичные результаты были получены в США (NASA) [8].

Указанные проблемы могут быть преодолены при конструкции ротора со сдвоенной когтеобразной полюсной системой, обеспечивающей двукратное использование магнитного потока (рис. 1,б). Это позволит увеличить относительную активную длину машины при предельном диаметре ротора и максимальной по механической прочности частоте вращения в 1,5–2 раза. Следует также иметь в виду, что при увеличении конструктивной длины

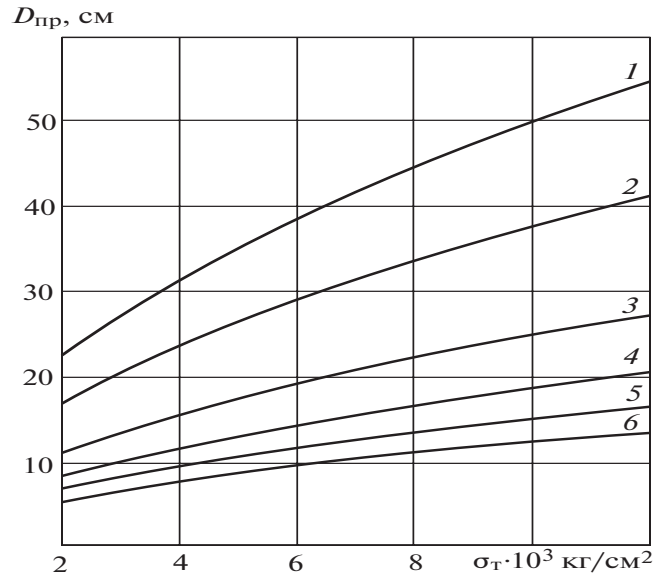


Рис. 2. Предельные значения диаметра роторов для различных значений частоты вращения: 1 – $n = 15 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$; 2 – $n = 20 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$; 3 – $n = 30 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$; 4 – $n = 40 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$; 5 – $n = 50 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$; 6 – $n = 60 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$

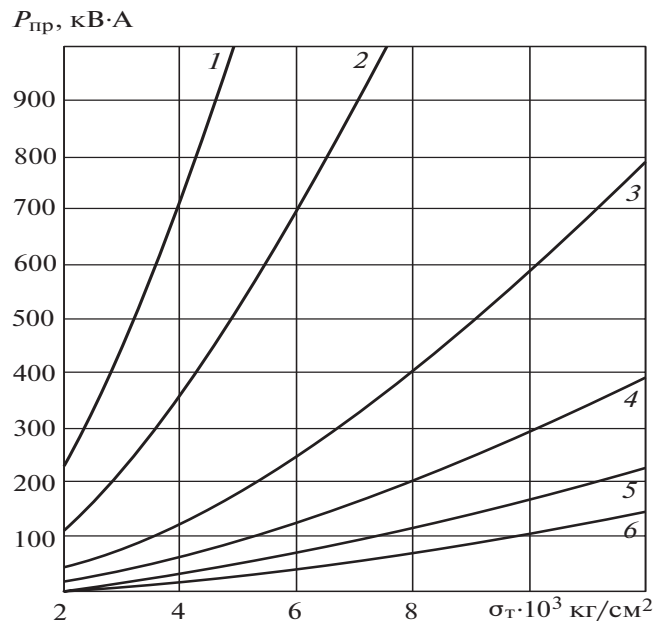


Рис. 3. Предельные значения мощности генератора для различных значений частоты вращения: 1–6 – то же, что на рис. 2

и массы генератора снижается динамическая устойчивость ротора. Важно, однако, отметить, что простота конструкции, повышенная устойчивость активных элементов машины в условиях высоких радиационных потоков позволяют заключить, что такие генераторы могут оказаться перспективными при длительных ресурсах в составе космических энергетических комплексов с ЯЭУ.

Магнитоэлектрические генераторы (МЭГ) не имеют электромагнитных ограничений по длине активной части [10] и могут быть спроектированы

с относительной длиной $l > 1$. Это позволяет преодолеть ограничение по предельной мощности при ограничении по диаметру ротора для заданной частоты вращения. При этом возможны два варианта исполнения магнитной системы ротора, отличающиеся направлением намагничивания магнитов — радиальным или тангенциальным (рис. 4).

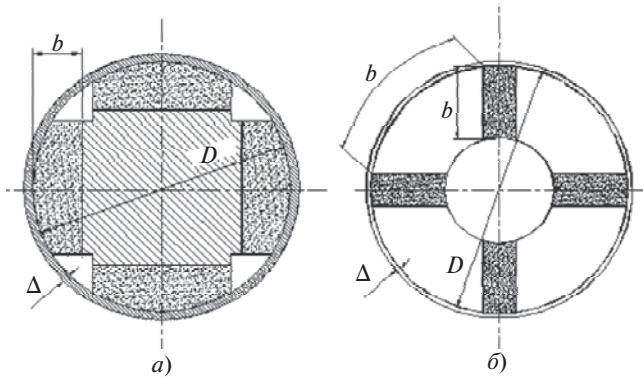


Рис. 4. Конструктивные схемы ротора МЭГ с радиальными (а) и тангенциальными (б) магнитами

Из известного выражения для предельной мощности

$$P_{\text{пр}} = k D_{\text{пр}}^3 l A B_{\text{д}} n \quad (4)$$

следует, что при заданных значениях диаметра ротора $D_{\text{пр}}$, частоте вращения n , магнитной индукции в зазоре $B_{\text{д}}$, определяемой конструкцией магнитной системы ротора и характеристиками магнита, линейной нагрузке статора A , диапазон изменения которой ограничен параметрическими требованиями и тепловыми условиями работы, значение $P_{\text{пр}}$ пропорционально относительной длине линейной зоны машины. Некоторые возможности увеличения индукции в зазоре $B_{\text{д}}$ могут быть реализованы в магнитной системе с тангенциальным намагничиванием, позволяющим повысить значение $B_{\text{д}}$ за счёт концентрации магнитного потока в ферромагнитных полюсах. При этом, однако, должно выполняться следующее соотношение для радиального размера магнита b_m :

$$\frac{b_m}{D_{\text{пр}}} = b^3 \frac{0,785}{p}, \quad (5)$$

где b — относительный радиальный размер магнитного слоя; p — число пар полюсов.

С учетом очевидных ограничений по радиальному размеру магнита $b_m < D_{\text{пр}} / 2$ или $b_m < 0,5$ можно выразить следующую функциональную связь между параметрами p и b :

$$\frac{0,785}{p} < b \leq 0,4. \quad (6)$$

Из (6) следует, что применение конструкции с тангенциальным намагничиванием эффективно при $p^3 > 2$. Можно показать, что при этом будет возрастать нагрузка на бандаж, а частота напряжения генератора ($f \sim b$) превысит 2 кГц.

Диаметр ротора необходимо выбирать по условиям механической прочности для заданной частоты вращения. Предельное значение диаметра ротора зависит от радиальной толщины магнитного пояса b_m , его массы и характеристик прочности материала бандажа. Радиальное значение толщины бандажа (см) может быть оценено по соотношению [1, 3]:

$$D_{\text{б}} = \frac{2,8 g_m D_{\text{пр}}^3 \frac{\sigma}{\sigma_{\text{б}}} \frac{n}{10^3} (1-b)b}{s_{\text{б}}}, \quad (7)$$

где g_m — плотность материала магнитного пояса кг/см³; $s_{\text{б}}$ — удельная прочность материала бандажа, кг/см².

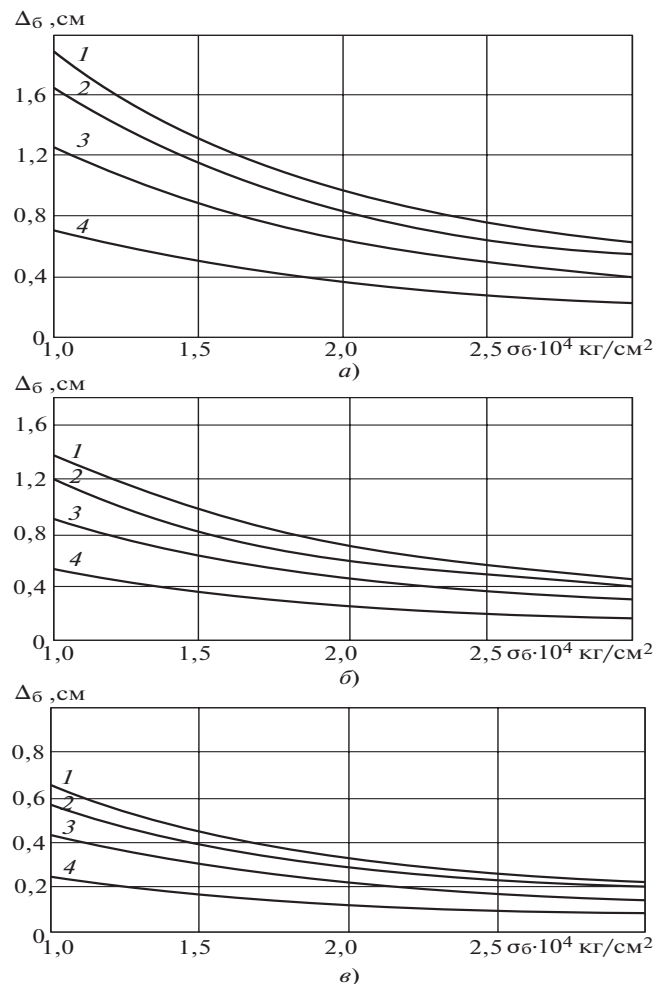


Рис. 5. Зависимость толщины бандажа от прочности материала и относительного радиального размера магнитного слоя для различных значений предельного диаметра ротора: а — $D_{\text{пр}} = 10$ см; б — $D_{\text{пр}} = 9$ см; в — $D_{\text{пр}} = 7$ см; 1 — $b = 0,4$; 2 — $b = 0,3$; 3 — $b = 0,3$; 4 — $b = 0,1$

По (8) рассчитаны зависимости толщины бандажа от удельной прочности при $n = 6 \cdot 10^4 \text{ мин}^{-1}$ с учетом относительного значения толщины магнитного пояса b и предельного по прочности диаметра $D_{\text{пр}}$. Результаты расчета приведены на рис. 5. Таким образом, совместное решение (5) и (7) с учетом неравенства (6) позволяет оценить границы области параметров, дающих возможность разработки и технического проектирования МЭГ.

На основании вышеприведенных рассуждений можно заключить, что применение магнитоэлектрических генераторов позволяет повысить предельную мощность за счет увеличения относительной длины активной части $l > 1$. Следует, однако, отметить, что при большой длине ротора номинальная частота вращения может превысить вторую и даже третью критические скорости, что предъявит особые требования к жесткости конструкции ротора и опорам вращения. Эта проблема с учетом требуемых ресурсов работы (10, 15 лет) является технически весьма сложной. Высокая частота вращения усложняет решение актуальных вопросов снижения потерь на трение ротора о среду, заполняющую внутреннюю полость генератора, охлаждения ротора и постоянных магнитов. Одновременно необходимо решать задачи создания бесконтактных вращающихся опор ротора, совместимых с системой охлаждения ротора и статора [8]. Следует также отметить, что в настоящее время не ясны вопросы возможной деградации постоянных магнитов в условиях повышенной радиации от ядерного реактора, что может привести к ограничению предельного ресурса работы ЯЭУ.

Выводы 1. На современном этапе развития высокофорсированных и высокооборотных генераторов мощностью 200–300 кВ \cdot А наибольший интерес для АЭУ могут представлять синхронные генераторы с внешнезамкнутым магнитопроводом (ВЗМП) и с возбуждением от постоянных магнитов (МЭГ).

2. При установленной мощности генераторного блока примерно 300 кВ \cdot А генераторы с ВЗМП и когтеобразными полюсами при частотах вращения более $50 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$ целесообразно выполнять в виде размещенных на одном валу двух когтеобразных полюсных систем. Это позволит повысить единичную мощность при ограничении диаметра по условиям прочности. Такие генераторы будут иметь высокую прочность и повышенную надежность в условиях сильной радиации.

3. Магнитоэлектрические синхронные генераторы с постоянными магнитами из редкоземельных материалов (РЗМ) при мощности около 300 кВ \cdot А и частотах вращения больше $50 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$ могут быть выполнены с одним ротором $l > 1$. Следует, однако, отметить, что при этом необходимо решить ряд

сложных проблем по обеспечению прочности составного ротора МЭГ и стабильности свойств постоянных магнитов в условиях сильной радиации.

4. Окончательный выбор концепции синхронных генераторов для АЭУ требует детальной проработки их конструктивных схем и анализа свойств используемых в их составе конструктивных и активных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коротеев А.С.** Актуальные задачи в космонавтике XXI века. Доклад на первом Международном симпозиуме «Космос и глобальная безопасность человечества», 05.11.2009.
2. **Пилотируемая** экспедиция на Марс/Под ред. А.С. Коротеева. — М.: Российская академия космонавтики им. К.Э. Циолковского, 2006.
3. **Сенченко А.П.** Атомные ракеты и проблемы освоения космоса. — М.: Атомиздат, 1964.
4. **Подшивалов С.А. и др.** Энергетические установки космических аппаратов. — М.: Энергоиздат, 1981.
5. **Энергетические** установки космических аппаратов/Под ред. Д.Д. Неверовского. — М.: Энергоиздат, 1981.
6. **Кейвни Л.** Космические двигатели. Состояние и перспективы. — М.: Мир, 1988.
7. **Гильзин К.А.** Электрические межпланетные корабли. — М.: Наука, 1970.
8. **Nuclear Brayton Turboalternator-compressor (TAC) Conceptual Design Study.** — NASA Lewis Research Center, Final Report, 1970.
9. **Квасников Л.А., Латышев Л.А., Севрук Д.Д.** Теория и расчет энергетических установок космических летательных аппаратов. — М.: Изд-во МАИ, 2001.
10. **Jacek F. Gieras.** Permanent Magnet Motor Technology. — New York—Basel, 2002.

[02.04.12]

Авторы: Боярчук Кирилл Александрович окончил физический факультет Ленинградского государственного университета в 1983 г. Докторскую диссертацию защитил в 1998 г. Генеральный директор ОАО «Научно-исследовательский институт электромеханики» («НИИЭМ»), г. Истра Московской области.

Вержбицкий Леонид Григорьевич окончил энергетический факультет Львовского политехнического института в 1960 г. Директор отделения электрических машин и источников питания ОАО «НИИЭМ».

Берюляев Юрий Андреевич окончил электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1962 г. Ведущий научный сотрудник отделения электрических машин и источников питания ОАО «НИИЭМ».

Круглова Маргарита Леонидовна окончила энергетический факультет Ростовского-на-Дону института инженеров железнодорожного транспорта в 1966 г. Кандидатскую диссертацию защитила в Московском авиационном институте (МАИ) в 1975 г. Ведущий научный сотрудник отделения электрических машин и источников питания ОАО «НИИЭМ».

Ковалев Лев Кузьмич окончил факультет «Энергомашиностроение» МВТУ им. Баумана в 1964 г. и механико-математический факультет МГУ в 1968 г. В 1996 г. защитил докторскую диссертацию по авиационно-космической электроэнергетике в МАИ. Профессор, заведующий кафедрой «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

Ковалев Константин Львович окончил в 1993 г. факультет «Экспериментальная и теоретическая физика» Московского инженерно-физического института. В 2005 г. защитил докторскую диссертацию по сверхпроводниковым электрическим машинам. Профессор, ведущий научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

Тулинова Екатерина Евгеньевна окончила факультет «Системы управления, информатика и электроэнергетика» МАИ в 2011 г. Инженер кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.