

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методологические вопросы построения имитационных систем: Обзор / С. В. Емельянов, В. В. Калашиников, В. И. Лутков и др.; Под науч. ред. Д. М. Гвишиани, С. В. Емельянова. М.: МЦНТИ, 1973. 87 с.
2. Охтилев М.Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
3. Калинин В. Н., Соколов Б. В. Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления. 1995. № 1. С. 56—61.
4. Соколов Б. В. Комплексное планирование операций и управление структурами в АСУ активными подвижными объектами. МО: 1992. 232 с.
5. Цвиркун А. Д., Акинфиев В. К. Структура многоуровневых и крупномасштабных систем (синтез и планирование развития). М.: Наука, 1993.
6. Шанпел Д. А. ESB — Сервисная Шина Предприятия. СПб: БХВ-Петербург, 2008.
7. OASIS Standard: Web Services Business Process Execution Language. 2007.
8. Laurent S. St., Johnson J., Dumbill E. Programming Web Services with XML-RPC. CA: O'Reilly, 2001.
9. Vasiliev Y. SOA and WS-BPEL: Composing Service-Oriented Solution with PHP and Active BPEL. Birmingham, UK: Packt Publishing, 2007.

Сведения об авторе**Семен Алексеевич Потрясаев**

— канд. техн. наук; СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании;
E-mail: spotryasaev@gmail.com

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию
10.06.14 г.

УДК 519.711.72

Ю. С. МАНУЙЛОВ, С. В. ЗИНОВЬЕВ, Ю. В. ПРИЩЕПА, Е. Н. АЛЕШИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ УГЛОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГОСТАНЦИИ

Исследуется взаимовлияние процессов функционирования системы позиционирования и управления угловым движением космической солнечной энергостанции в рамках решения оптимизационных задач структурно-параметрического синтеза ее основных подсистем.

Ключевые слова: космическая солнечная энергетическая станция, система позиционирования и управления угловым движением, панель солнечных батарей, концентраторы солнечного излучения.

Введение. Современные оценки целесообразности создания и использования космических солнечных энергетических станций (КСЭС), предназначенных для передачи энергии на Землю в виде СВЧ-излучения, основаны, главным образом, на результатах анализа и структурно-параметрического синтеза отдельных подсистем: солнечных батарей (СБ), генераторов СВЧ-излучения и активных фазированных антенных решеток (АФАР) [1—3]. При этом оценивание эффективности КСЭС осуществляется, как правило, без учета процесса совместного функционирования данных подсистем, внешних воздействий, а также особенностей энерге-

тического и динамического взаимодействия с другими подсистемами и, в первую очередь, с системой позиционирования и управления угловым движением (СПУУД) элементов конструкции КСЭС. Такой подход в определенной степени справедлив при рассмотрении КСЭС с традиционными планарными солнечными батареями, выходные характеристики которых не критичны к точности ориентации панелей на Солнце. В то же время в качестве альтернативных вариантов рассматриваются СБ с концентраторами солнечного излучения (КСИ). Использование последних позволяет в ряде случаев снизить стоимость и повысить ресурс КСЭС, но при этом требуется существенно более высокая точность их ориентации на Солнце. Необходимость снижения потерь (энергетических, информационных в системах связи, экологических и др.) при передаче СВЧ-излучения наряду с поиском эффективных режимов передачи энергии требует принятия мер, обеспечивающих повышение точности наведения АФАР на приемник. Однако поскольку КСЭС представляет собой многосвязный объект с элементами конструкции ограниченной жесткости, то обеспечение высокоточной ориентации одного из элементов (например, АФАР) усложняет решение этой задачи для других элементов (например, СБ с КСИ). Указанные обстоятельства определяют необходимость комплексирования систем на основе решения проблемы энергетической и динамической совместимости СПУУД элементов конструкции КСЭС (АФАР, СБ и др.).

Постановка задачи. При формировании облика КСЭС, характеризуемого вектором параметров $\alpha_i \in \{\alpha_i\}$ ее подсистем, основным требованием является необходимость обеспечения заданного уровня энергоснабжения $P_\tau^\alpha \geq P_{\tau 3}^\alpha$, определяемого среднегодовой полезной мощностью P_τ^α на интервале времени τ ($\tau = 1, \dots, N$, лет) активного существования объекта. Решение данной задачи в оптимизационной постановке предполагает использование показателей экономической эффективности функционирования КСЭС. В качестве одного из таких показателей может быть использована прибыль C , вычисляемая как разность суммарного дохода от реализации энергии C_b^Σ потребителям в течение заданного срока τ и затрат C_l^Σ на обеспечение жизненного цикла функционирования КСЭС:

$$C = C_b^\Sigma(P_\tau^\alpha, c_m^b, \alpha_i) - C_l^\Sigma(P_\tau^\alpha, c_m^l, \alpha_i).$$

Здесь c_m^b — прогнозируемый средний уровень стоимости энергии; c_m^l — прогнозируемый средний уровень стоимости невозполнимых экологических потерь, дополнительных организационно-технических мероприятий, направленных на их предотвращение, а также штрафных санкций, компенсирующих побочные эффекты создания и функционирования КСЭС.

Введем в рассмотрение удельные стоимостные показатели затрат $\bar{c}_i^\varepsilon, i = \overline{1, G}$, на обеспечение жизненного цикла G основных подсистем КСЭС. Учитывая затраты, связанные с экологическими и прочими потерями, а также затраты, связанные с мероприятиями по их предотвращению или компенсации, характеризуемые удельными стоимостными показателями $\bar{c}_j^l, j = \overline{1, l}$, сформируем комплексный экономический показатель эффективности КСЭС:

$$F(\alpha_i) = \sum_{i=1}^G \bar{c}_i^\varepsilon P_\tau^\varepsilon(\alpha_i) + \sum_{j=1}^l \bar{c}_j^l P_\tau^l(\alpha_i),$$

где $P_\tau^\varepsilon, P_\tau^l, P_\tau^l \leq P_\tau^\varepsilon$, — значения выходной мощности КСЭС и уровня мощности СВЧ-излучения, обуславливающего возникновение отрицательных побочных эффектов функционирования КСЭС.

Поскольку удельные стоимостные показатели $\bar{c}_i^\varepsilon, i = \overline{1, G}$, и $\bar{c}_j^l, j = \overline{1, l}$, на некотором конечном интервале жизненного цикла КСЭС являются величинами ограниченными:

$\bar{c}_i^\varepsilon \leq \bar{c}_{i3}^\varepsilon$, $\bar{c}_j^l \leq \bar{c}_{j3}^l$, то оптимизационная задача структурно-параметрического синтеза КСЭС может быть сформулирована как задача математического программирования:

$$\min_{\alpha_i} F(\alpha_i) = \min_{\alpha_i} \left[\sum_{i=1}^G \bar{c}_i^\varepsilon P_\tau^\varepsilon(\alpha_i) + \sum_{j=1}^l \bar{c}_j^l P_\tau^l(\alpha_i) \right];$$

$$P_\tau^\alpha(\alpha_i) \geq P_{\tau 3}^\alpha, \alpha_i \in \{\alpha_i\}.$$

Модели совместного функционирования СПУУД элементов конструкции КСЭС.

Энергетическая модель функционирования солнечных батарей включает в себя математические модели следующих процессов: концентрации солнечного излучения на поверхности фотопреобразователей (ФП), преобразования его в электрическую энергию, отвода тепла от ФП, деградации характеристик КСИ и ФП под действием высокоэнергетических заряженных частиц радиационных поясов Земли и солнечных космических лучей, а также „собирания“ тока коммутирующими элементами СБ. Так, для системы Кассегрена [1] концентраторов солнечного излучения справедлива аналитическая зависимость коэффициента концентрации излучения k_0 от угла ориентации ν КСИ:

$$k_0 = k_p (r_1^2 - r_2^2) \left[\exp(\gamma^2 \nu^2 / W^2) \right] / r_2^2,$$

где k_p — коэффициент „перехвата“ излучения при $\nu = 0$; r_1, r_2 — радиусы первичного и вторичного зеркал КСИ; γ, W — коэффициенты аппроксимации.

В расчетной схеме КСИ учитываются линейные и угловые разъюстировки зеркал, неточности ориентации концентраторов на Солнце, статистические неровности отражающих поверхностей, распределение яркости по солнечному диску, а также индикатрисы рассеяния излучения отражающими поверхностями зеркал.

Относительный коэффициент энергосъема [4] для двух установленных на объекте солнечных батарей планарного и концентраторного типов рассчитывается по формуле

$$K = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^2 E_i / E_0 \right) / T,$$

где E_i — усредненный на характерном интервале времени $[0, T]$ энергосъем с учетом неточности ориентации ячеек на Солнце и временной деградации удельных энергетических характеристик СБ указанных типов, E_0 — действительное значение энергосъема для интервала $[0, T]$.

Расчет средней мощности P^α , генерируемой ректенной за период T , равный постоянной времени углового движения АФАР, осуществляется путем интегрирования парциальных мощностей элементов ректенны (с учетом схемы их коммутации) в моменты времени фактического приема излучения.

Яркость излучения в заданном направлении φ_B рассчитывается при этом по формуле [5]

$$L(\varphi_B) = \frac{\kappa E_0 \chi_\Sigma \delta}{\pi \varphi_c^2 (1 + D)} \left(1 + D \sqrt{1 - \varphi_B / \varphi_c^2} \right),$$

где κ — коэффициент отражения излучения в направлении φ_B , определяемый индикатрисой рассеяния; φ_c — угловой размер солнечного диска; χ_Σ — функция Хевисайда, характеризующая выполнение совокупности условий видимости солнечного диска из рассматриваемой точки B ; δ, D — коэффициенты аппроксимации.

Отдельный энергоизлучающий модуль КСЭС как механическая система представляет собой несущее абсолютно твердое тело и N упругодеформированных элементов (УДЭ), соответствующих системе наименее жестких конструктивных компонентов (СБ и АФАР). С несущим телом связана система координат $Oxyz$, а его движение определяется вектором скорости V_0 поступательного движения полюса O и вектором скорости ω вращения относительно некоторой инерциальной системы координат $Ox\eta\zeta$.

В соответствии с методом Лурье вектор u смещений элементарных частиц УДЭ объекта определяется как [6]

$$u(\rho) = \sum_{\zeta=1}^{n_0} q_{\zeta} \Lambda_{\zeta}(\rho) + \frac{1}{2} \sum_{\zeta=1}^{n_0} \sum_{\xi=1}^{n_0} q_{\zeta} q_{\xi} \Lambda_{\zeta\xi}(\rho) + \dots,$$

где $\Lambda_{\zeta}(\cdot)$, $\Lambda_{\zeta\xi}(\cdot)$, $\zeta, \xi = \overline{1, n_0}$, — некоторая система вектор-функций от радиус-векторов ρ положения элементарных частиц УДЭ массой dm , q — обобщенная фазовая координата УДЭ.

Динамика упругого объекта описывается уравнениями Эйлера — Лагранжа. Объемные, поверхностные, линейно-распределенные и/или сосредоточенные силы, действующие на систему УДЭ объекта, рассчитываются в соответствии с заданной схематизацией конструкции.

Результаты исследований. Желаемую динамику корпуса объекта с закрепленным на нем приводным устройством АФАР, к параметрам движения оси диаграммы направленности которой, собственно, и предъявляются высокие требования, зададим опорной траекторией, определенной на множестве решений системы дифференциальных уравнений вида [7]

$$\dot{\varphi}_{\text{оп}} = \Phi(\varphi_{\text{оп}})\omega_{\text{оп}}; \quad \dot{\omega}_{\text{оп}} = U_{\Gamma}(\omega_{\text{оп}}) + U_{\text{оп}},$$

где $\varphi_{\text{оп}}$, $\omega_{\text{оп}}$ — векторы углов и угловых скоростей; $U_{\Gamma}(\omega_{\text{оп}})$, $U_{\text{оп}}$ — векторы обусловленного гироскопическими связями ускорения корпуса и управляющего ускорения соответственно.

Условие квазизатвердевания системы УДЭ [8] запишем в форме

$$\|U - U_{\text{оп}} - U_{\Gamma}(\omega_{\text{оп}}) + U_q(\ddot{q}) + U_{\text{вн}}\| \leq \Theta,$$

где параметр Θ характеризует близость реальной динамики объекта к заданному опорному движению, U — централизованное управление, $U_{\text{вн}}$ — внешние управляющие воздействия.

С позиций теории инвариантного синтеза управление U представляется состоящим из опорного $U_{\text{оп}}$ и „синтезирующего“ $\Delta U = \Delta U(\varphi_{\text{оп}}, \omega_{\text{оп}}, q, \dot{q}, U_{\text{оп}}, U_{\Gamma}, U, U_{\text{вн}})$.

Для снижения уровня возмущений, обусловленных динамикой УДЭ, предлагается за счет „профилирования“ централизованного управления и использования локальных средств активного демпфирования колебаний обеспечивать перевод упругой системы в стационарное состояние, соответствующее действующему нагружению [8]:

$$\ddot{q}_s = 0, \quad \dot{q}_s = 0, \quad s = \overline{1, N}.$$

При этом в идеальном случае может быть обеспечено условие $U_q(\ddot{q}_s, s = \overline{1, N}) \equiv 0$.

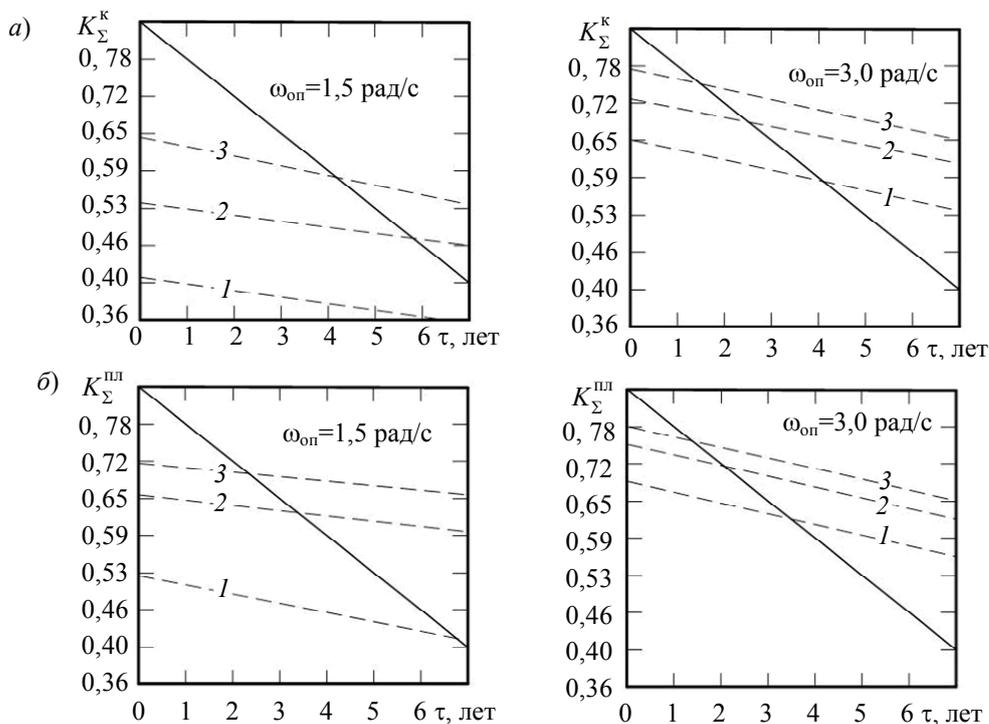
„Синтезирующую“ составляющую предлагается формировать с использованием информации Y_{ω} об угловом ускорении корпуса объекта: $\Delta U = -Y_{\omega} + U + U_{\Gamma}(\omega_{\text{оп}})$.

При этом компенсирующая составляющая ΔU в соответствии с принципом двухканальности Петрова формируется по двухконтурной схеме: $\Delta U = \Delta U_{\Gamma} + \Delta U_{\text{гр}}$, где ΔU_{Γ} , $\Delta U_{\text{гр}}$ — составляющие, формируемые контурами точного (по отклонению) и грубого (по возмущению) управления. В качестве контура точного управления предлагается использовать пропорционально-дифференциальный регулятор, параметрически оптимизируемый, например, по квадратичному критерию качества.

Оценка эффективности предложенного подхода к формированию облика КСЭС проводилась с использованием разработанного программно-моделирующего комплекса путем

совместного математического моделирования управляемых процессов углового движения корпуса и относительной (в том числе, колебательной) динамики СБ и АФАР КСЭС, а также процессов приема, преобразования и передачи потребителям соответствующих энергетических потоков.

Основная задача экспериментальных исследований заключалась не только в определении структурного и алгоритмического состава СПУУД элементов конструкции КСЭС, при котором обеспечивается преимущество СБ концентраторного типа относительно СБ планарного типа. В ходе экспериментов установлено, что при сопоставимых массогабаритных и удельных энергетических характеристиках обоих типов солнечных батарей возможно обеспечить такую ориентацию фотоприемников на Солнце, при которой СБ концентраторного типа становятся конкурентоспособными уже при сроках активного функционирования объекта от одного года и более. Это объясняется более низким коэффициентом деградации параметров концентраторов по сравнению с планарными панелями. Зависимости коэффициентов относительного энергосъема для СБ концентраторного (*a*) и планарного (*б*) типов ($K_{\Sigma}^k, K_{\Sigma}^{pl}$) от срока активного функционирования объекта при различных значениях $\omega_{оп}$ представлены на рисунке, где приняты следующие обозначения: 1 — оптимальное управление по фазовому состоянию, 2 — оптимальное управление по расширенному вектору фазового состояния, 3 — управление с учетом „синтезирующей“ составляющей ΔU .



Заключение. Использование разработанного программно-моделирующего комплекса позволяет вплотную подойти к практическому решению задачи оптимального структурно-параметрического синтеза основных подсистем космических солнечных энергостанций при заданных требованиях к выходной мощности, сроку активного существования и допустимому максимально возможному экологическому ущербу от их штатной эксплуатации. Предложенный подход может быть использован для оценки экономической целесообразности реализации и других космических программ, в частности освещения участков земной поверхности в темное время суток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Piland R.* The solar power satellite concept evaluation program // Proc. of NASA Conf. "Radiation Energy Conversion in Space". N. Y., 1978. P. 3—25.
2. *Dockinson R.* SPS microwave subsystem potential impacts end benefits // Proc. of NASA Conf. "Radiation Energy Conversion in Space". N. Y., 1987. P. 25—35.
3. *Kerwin E. M., Suddath I. H., Arndt G. P.* Antenna optimization and cost consideration for the SPS microwave system // Proc. of IECEC. N. Y., 1981. Vol. 1. P. 272—277.
4. *Armand N. A., Lomakin A. N., Paramonov B. M.* To the solar power satellite accuracy orientation problem // Proc. of Conf. Devoted to Development of K. E. Tsiolkovsky's Ideas. M., 1982. P. 123—132.
5. *Monzingo R. A., Miller T. N.* Introduction to adaptive arrays // New York-Chichester-R'islar. Toronto, 1980. 446 p.
6. *Ликинз П.* Уравнения в квазикоординатах для космических аппаратов нежесткой конструкции // Ракетная техника и космонавтика. 1975. Т. 13, № 4. С. 137—140.
7. *Мануйлов Ю. С.* Метод логико-аналитического синтеза в задачах оптимального и адаптивного управления. МО СССР, 1986. 188 с.
8. *Горелов Ю. Н., Мануйлов Ю. С., Шальмов С. В.* Методы реализации принципа квазизатвердевания при стабилизации движения упругих динамических объектов // Методы и алгоритмы исследования и разработки автоматических систем управления: Сб.; Под ред. Л. А. Майбороды. МО СССР, 1989. С. 24—31.

Сведения об авторах

- Юрий Сергеевич Мануйлов** — д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем управления космическими комплексами, Санкт-Петербург;
E-mail: ymanoff@yahoo.com, kotmanoff@rambler.ru
- Сергей Валерьевич Зиновьев** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем управления космическими комплексами, Санкт-Петербург; E-mail: zinoviev_sv@mail.ru
- Юрий Владимирович Прищеп** — канд. техн. наук; Филиал открытого акционерного общества «Концерн радиостроения „Вега“», Санкт-Петербург; директор;
E-mail: mail@spb.vega.su
- Евгений Николаевич Алешин** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем управления космическими комплексами, Санкт-Петербург; E-mail: aleshin_evgeny@inbox.ru

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию
10.06.14 г.