

Применение метода электронной коммутации при синтезе нестационарных систем автоматического управления

Н.В. Решетникова

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического
приборостроения*

Аннотация: В статье приводится применение метода электронной коммутации для решения задачи синтеза систем, параметры которых могут являться функциями времени. Параметрический синтез осуществлен при помощи обобщенного метода Галеркина, распространенного на новый класс нестационарных систем. В качестве объекта исследования рассматривается импульсная система автоматического управления турбоагрегатом при нестационарности параметров неизменяемой части системы. Моделирование производится в системе *Matlab/Simulink*.

Ключевые слова: система автоматического управления, нестационарность параметров, математическое моделирование, обобщенный метод Галеркина.

Введение

В условиях постоянного роста требований к качеству синтезируемых сложных технических систем автоматического управления (САУ) учет нестационарности параметров – критически важное требование, ограничивающее применимость наиболее распространенных алгоритмов, разработанных для линейных стационарных САУ [1]. Подавляющее количество используемых в системах данного класса методов сводится либо к адаптивным алгоритмам управления, либо линеаризации, а чаще всего – к игнорированию дрейфа параметров [2-3]. Однако, подобный подход может проводить не только к выходу показателей качества за пределы требуемых значений, но и к потере устойчивости, т.е. потери работоспособности системы. В связи с этим актуальной задачей является разработка алгоритма решения задачи синтеза нестационарных САУ с достаточной для инженерного расчета точностью. В качестве математического аппарата предлагается использовать распространенный на новый класс систем обобщенный метод Галеркина, позволяющий выполнять поиск параметров

изменяемой части системы исходя из требований к желаемому программному движению [4].

Общая схема решения задачи синтеза импульсных нестационарных САУ

Задача синтеза нелинейных нестационарных САУ решается при технических ограничениях на варьируемые параметры [5]:

$$c_k^-(t) \leq c_k(t) \leq c_k^+(t), \quad k = 1, 2, \dots, m,$$

где $c_k^+(t)$ – максимально допустимые значения варьируемых параметров; $c_k^-(t)$ – минимально допустимые значения варьируемых параметров, которые являются в общем случае функциями времени, а также ограничениях на грубость и устойчивость синтезируемой системы.

Желаемое программное движение задается в виде общего решения линейного дифференциального уравнения 2-го порядка

$$x^0(t) = [x_y + He^{-\alpha t} \cos(\beta t - \varphi_0)]1(t).$$

САУ, содержащая амплитудно-импульсный модулятор и нелинейный элемент, в общем виде описывается следующим дифференциальным уравнением [6]:

$$\begin{aligned} & Q(c_k(t), D)x(t) + Q^*(c_k(t), D)x^*(t) + \\ & + R(c_k(t), D)y(t) + R^*(c_k(t), D)y^*(t) = \\ & = S(c_k(t), D)f(t) + S^*(c_k(t), D)f^*(t), \\ & y(t) = F[x(t), \dot{x}(t)], \quad y^*(t) = F^*[x^*(t), \dot{x}^*(t)], \end{aligned}$$

где $x(t)$, $x^*(t)$ – исследуемая координата на входе и выходе модулятора соответственно; $f(t)$, $f^*(t)$ – внешнее входное воздействие на входе и выходе модулятора соответственно; $y(t) = F[x(t), \dot{x}(t)]$, $y^*(t) = F^*[x^*(t), \dot{x}^*(t)]$ – нелинейные функции;

$$\begin{aligned} Q(c_k(t), D) &= \sum_{i=0}^n a_i(c_k(t)) D^i; \quad Q^*(c_k(t), D) = \sum_{i=0}^{n^*} a_i^*(c_k(t)) D^i; \\ R(c_k(t), D) &= \sum_{i=0}^u b_i(c_k(t)) D^i; \quad R^*(c_k(t), D) = \sum_{i=0}^{u^*} b_i^*(c_k(t)) D^i; \\ S(c_k(t), D) &= \sum_{i=0}^v e_i(c_k(t)) D^i; \quad S^*(c_k(t), D) = \sum_{i=0}^{v^*} e_i^*(c_k(t)) D^i \end{aligned}$$

– полиномы оператора обобщенного дифференцирования D с вещественными коэффициентами степеней n, n^*, u, u^*, v, v^* соответственно.

При подставлении желаемого программного движения в уравнение движения системы образуется невязка

$$\begin{aligned} \psi(c_k(t), t) &= Q(c_k(t), D)x^0(t) + Q^*(c_k(t), D)x^{0*}(t) + \\ &\quad + R(c_k(t), D)F[x^0(t), D\{x^0(t)\}] + \\ &\quad + R^*(c_k(t), D)F[x^{0*}(t), D\{x^{0*}(t)\}] - \\ &\quad - S(c_k(t), D)f(t) - S^*(c_k(t), D)f^*(t). \end{aligned}$$

Если предположить, что система с синтезированными параметрами заведомо устойчива [7], то значения искоемых параметров определяются из условия ортогональности невязки координатным функциям, что приводит к системе алгебраических уравнений, при решении которых определяются значения варьируемых параметров оператора управления. Задача синтеза параметров обобщенным методом Галеркина в вычислительном плане представляет собой задачу нелинейного программирования с целевой функцией.

Математическое моделирование импульсной САУ турбоагрегатом

На рис. 1 приведена структурная схема математической модели системы управления турбоагрегатом [8-9]. Высокие требования к поддержанию качества работы систем подобного класса определяются

необходимостью поддержания частоты (скорости) вращения вне зависимости от нагрузок и возможных нештатных режимов функционирования [10-11].

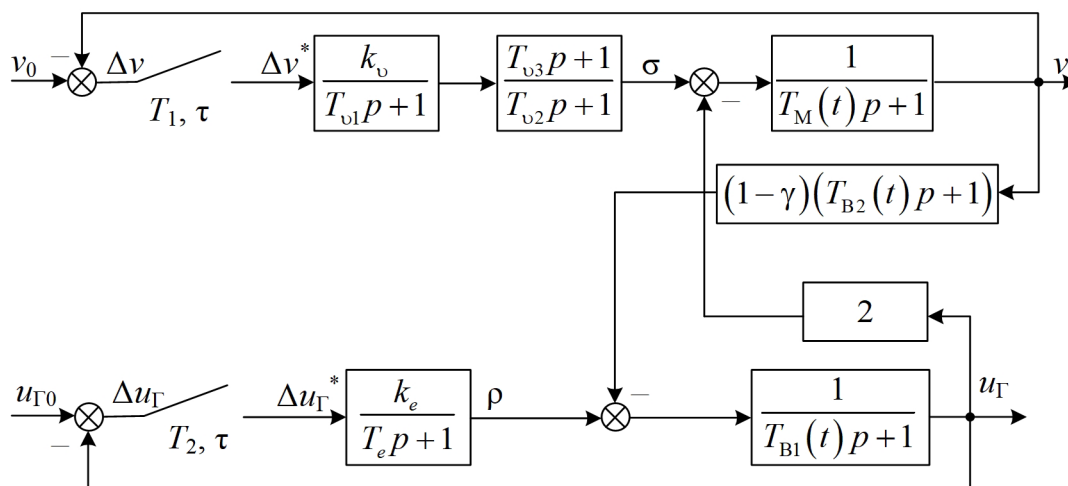


Рис. 1. – Структурная схема импульсной САУ турбоагрегатом

Регулируемыми величинами являются скорость вращения вала v и напряжение на зажимах генератора u_G . Поддержание требуемого режима работы управляемых величин осуществляется за счет регуляторов скорости вращения и напряжения, на вход которых поступают сигналы рассогласования по обоим каналам – Δv и Δu_G соответственно. Задачей синтеза является определение параметров оператора управления для обеспечения желаемых показателей качества. Как отмечалось выше, параметры неизменяемой части системы могут являться функциями времени, т.е. являться нестационарными. В рассматриваемой САУ к таким параметрам относятся постоянная времени турбоагрегата $T_M(t)$, постоянная времени цепи обмотки возбуждения генератора $T_{B1}(t)$ и электромагнитная постоянная времени $T_{B2}(t)$. В качестве желаемых показателей качества рассматривались следующие требования: перерегулирование $\sigma \leq 22\%$, время регулирования $t_P \leq 40$ мс.

По результатам решения поставленной задачи были получены переходные процессы, приведенные на рис. 2.

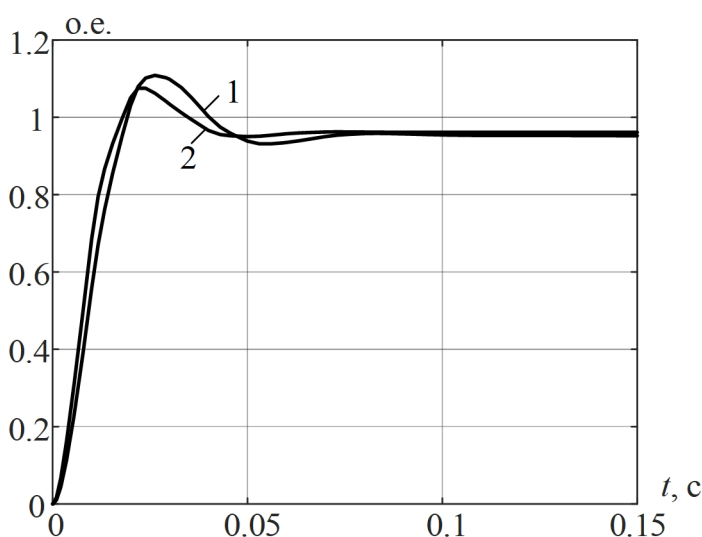


Рис. 2. – Переходные процессы: 1 – по скорости; 2 – по напряжению

Как видно из рис. 2, показатели качества соответствуют желаемым.

Для учета негативного влияния нестационарности параметров объекта было проведено экспериментальное исследование динамики системы при дрейфе постоянных времени. По результатам экспериментов, проведенных путем моделирования в *Matlab/Simulink*, было определено, что качество переходного процесса существенно ухудшается только в случае дрейфа параметра $T_M(t)$ на 20% от стационарного значения, влияние $T_{B1}(t)$ и $T_{B2}(t)$ не является критическим. Таким образом, можно сделать вывод о том, что параметры регулятора, определенные для стационарного состояния, не позволяют добиться требуемого качества, следовательно, синтез требуется повторить для критического режима работы.

В ходе повторного решения задачи синтеза были получены переходные процессы, приведенные на рис. 3.

Эксперимент показал, что для рассматриваемой импульсной САУ ввиду нестационарности параметров неизменяемой части системы невозможно добиться требуемого режима управляемых величин путем однократного синтеза регулятора.

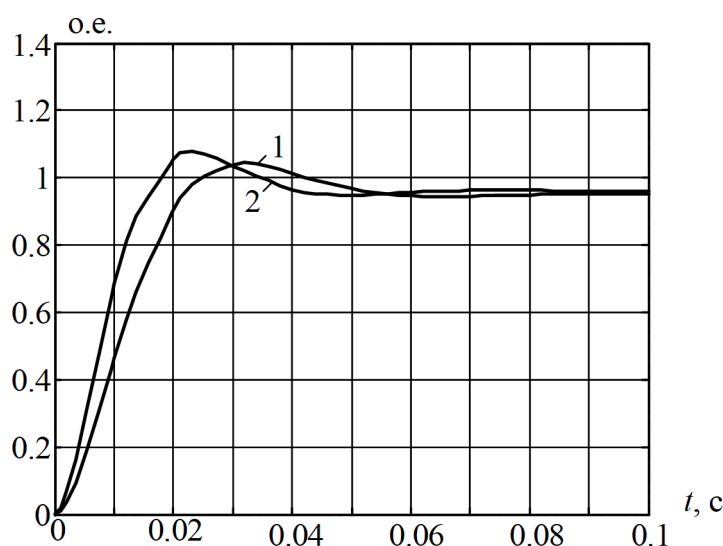


Рис. 3. – Переходные процессы: 1 – по скорости; 2 – по напряжению

Поскольку для разных величин $T_M(t)$ требуются различные параметры закона управления, предлагается применять метод электронной коммутации. На рис. 4 приведена разработанная в *Matlab/Simulink* структурная схема.

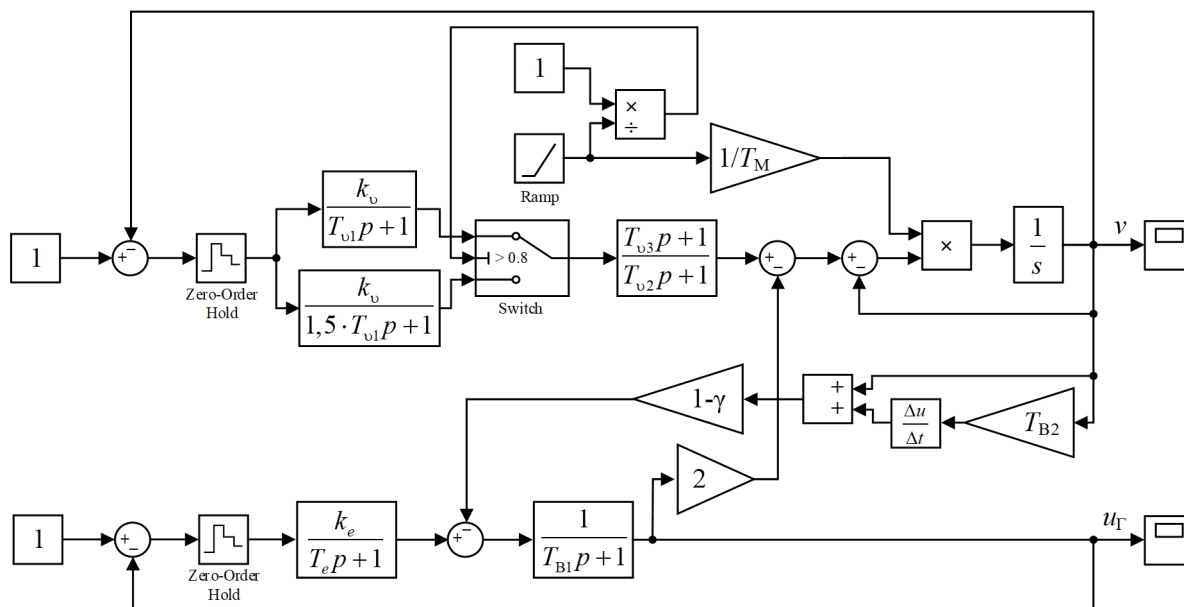


Рис. 4. – Структурная схема системы с коммутатором

При рассмотрении данного метода решения задачи не рассматриваются флуктуационные процессы, возникающие в момент срабатывания ключа, так

как полагается, что их длительность значительно меньше времени переходного процесса.

Результирующий переходный процесс по скорости, полученный в разработанной системе, представлен на рис. 5.

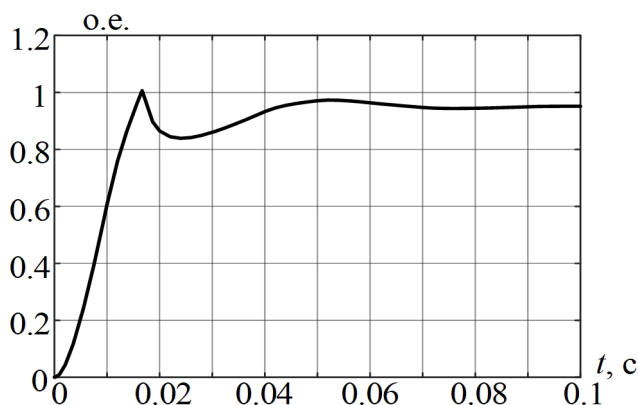


Рис. 5. – Переходный процесс по скорости

Как видно из рис. 5, предлагаемый метод позволяет обеспечивать необходимое качество регулирования.

Заключение

В ходе работы задача синтеза нестационарной импульсной системы управления турбоагрегатом была решена путем метода параметрического синтеза, позволяющего приближенно обеспечивать требуемые показатели качества работы системы. Поскольку нестационарность параметров может приводить к потере качества управления, важной задачей была разработка метода, позволяющего добиться учета влияния критического дрейфа без введения сложных алгоритмов управления.

Так как параметры неизменяемой части системы могут быть подвержены дрейфу, а коэффициенты оператора управления, рассчитанные для стационарного режима, могут не удовлетворять критическим режимам работы, было предложено применить метод электронной коммутации между параметрами регулятора в зависимости от величины критически

дрейфующего параметра. Поскольку метод Галеркина обеспечивает приближенное соответствие желаемому программному движению, было проведено моделирование полученного решения, которое подтвердило достаточную для инженерных расчетов точность.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Литература

1. Ortega R., Yi B., Bobtsov A. [et al.] Adaptive state observers for a class of nonlinear systems: The non-triangular and non-state-affine case // Systems & Control Letters. 2025. Vol. 196. P. 106020.
2. Фролов С.В., Синдеев С.В., Коробов А.А., Савинова К.С., Потлов А.Ю. Двухэтапная процедура синтеза управления нелинейными нестационарными объектами с использованием многослойного персептрона // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8. № 3(30). URL: <https://moitvivi.ru/ru/journal/pdf?id=822>.
3. Козачек О.А., Бобцов А.А., Николаев Н.А. Адаптивный наблюдатель переменных состояния линейного нестационарного объекта с периодически изменяющимися неизвестными параметрами // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления: сборник научных трудов. Москва. 2024. С. 968-972.
4. Никитин А.В., Шишлаков В.Ф. Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления. Санкт-Петербург: ГУАП, 2003. 358 с.

5. Шишляков В.Ф., Решетникова Н.В., Ватаева Е.Ю., Шишляков Д.В. Общая схема решения задачи синтеза нелинейных нестационарных САУ во временной области // Датчики и системы. 2020. № 7(249). С. 12-16.

6. Шишляков В.Ф. Синтез нелинейных САУ с различными видами модуляции. Санкт-Петербург: ГУАП, 1999. 268 с.

7. Zhumatov S.S., Karekenova S.G. On a stability of a program manifold of variable indirect control system with non-stationary nonlinearities // LVI All-Russia Conference on Problems in Dynamics, Particle Physics, Plasma Physics and Optoelectronics. Москва. 2020. P. 154-156.

8. Манапова Н.М., Демьяненко А.В., Манапова Г.А. Интеллектуальные системы мониторинга и управления турбоагрегатом тепловой электростанции // Тенденции развития естественных и технических наук в современном мире. Петропавловск. 2022. С. 520-525.

9. Таранов М.А., Касьянов А.С. Математическая модель рабочего процесса паросиловой установки для получения тепла и электрической энергии // Инженерный вестник Дона. 2018. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4716.

10. Волков, Д. В. Автоматическое выравнивание нагрузки в многодвигательном электроприводе // Инженерный вестник Дона. 2023. № 9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2023/8690.

11. Нгуен Тхань, З. Синтез системы управления электроприводом на основе вентильных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов // Инженерный вестник Дона. 2021. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7302.

References

1. Ortega R., Yi B., Bobtsov A. [et al.] Systems & Control Letters. 2025. Vol. 196. P. 106020.

2. Frolov S.V., Sindeev S.V., Korobov A.A., Savinova K.S., Potlov A.Yu. Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionny'e tekhnologii. 2020. T. 8. № 3(30). URL: moitvivi.ru/ru/journal/pdf?id=822.
3. Kozachek O.A., Bobczov A.A., Nikolaev N.A. XIV Vserossijskoe soveshhanie po problemam upravleniya: sbornik nauchny'x trudov. Moskva. 2024. pp. 968-972.
4. Nikitin A.V., Shishlakov V.F. Parametricheskij sintez nelinejny'x sistem avtomaticheskogo upravleniya [Parametric synthesis of nonlinear automatic control systems]. Sankt-Peterburg: GUAP, 2003. 358 p.
5. Shishlakov V.F., Reshetnikova N.V., Vataeva E.Yu., Shishlakov D.V. Datchiki i sistemy`. 2020. № 7(249). pp. 12-16.
6. Shishlakov V.F. Sintez nelinejny'x SAU s razlichny'mi vidami modulyacii [Synthesis of nonlinear automatic control systems with different types of modulation]. Sankt-Peterburg: GUAP, 1999. 268 p.
7. Zhumatov S.S., Karekenova S.G. On a stability of a program manifold of variable indirect control system with non-stationary nonlinearities. LVI All-Russia Conference on Problems in Dynamics, Particle Physics, Plasma Physics and Optoelectronics. Москва. 2020. P. 154-156.
8. Manapova N.M., Dem`yanenko A.V., Manapova G.A. Tendencii razvitiya estestvenny'x i tekhnicheskix nauk v sovremennom mire. Petropavlovsk. 2022. pp. 520-525.
9. Taranov M.A., Kas`yanov A.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4716.
10. Volkov, D. V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. № 9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2023/8690.
11. Nguen Txan`, Z. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7302.

Дата поступления: 8.05.2025 Дата публикации: 27.06.2025