

СИНТЕЗ РОБАСТНОЙ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ НАТЯЖЕНИЯ ТРОСА ДЛЯ СТЕНДА ИМИТАЦИИ НЕВЕСОМОСТИ

Гайворонский С.А.* , Езангина Т.А.**

Томский политехнический университет,
пр. Ленина, 30, Томск, 634050, Россия

* e-mail: saga@tpu.ru

** e-mail: eza-tanya@yandex.ru

Разработана структура робастной системы стабилизации натяжения троса для стенда имитации невесомости. Предложен алгоритм параметрического синтеза робастного ПИ-регулятора на основе коэффициентного метода и критерия максимальной степени устойчивости. Работоспособность синтезированной робастной системы подтверждают результаты цифрового моделирования.

Ключевые слова: система стабилизации натяжения троса, синтез робастного регулятора, максимальная робастная степень устойчивости, робастная степень колебательности.

Постановка задачи

У космического аппарата (КА) при выходе на заданную орбиту происходит комплексное раскрытие из транспортного положения в рабочее функционально необходимых элементов (антенн солнечных батарей, выносных источников питания, различных приемопередающих устройств и т.п.). Для разработчиков КА представляет интерес моделирование этих процессов в наземных условиях, позволяющее оценивать параметры раскрытия (скорости, ускорения и т.д.) и повышать его надежность. Для решения указанных задач могут быть использованы специальные испытательные трособлочные стенды имитации невесомости [1]. На них с помощью тросов вывешиваются подвижные элементы КА, которые приводятся в движение электромеханическими системами. При этом происходит компенсация веса звеньев КА в каждый момент времени на протяжении всего процесса раскрытия.

Пример стенда имитации невесомости, предназначенного для компенсации веса штанги антенны солнечной батареи, приведен на рис. 1.

Идеальная компенсация веса штанги достигается при соблюдении следующих условий: в каждый момент времени при движении штанги сила натяжения троса равна весу штанги и вектор силы тяжести штанги сохраняет вертикальность по отношению к точке подвеса. Для этого на стенде существуют два канала управления: вертикальный канал

(ВК) и горизонтальный канал (ГК). ГК поддерживает вертикальное положение троса путем перемещения каретки, а ВК содержит систему стабилизации натяжения троса (ССНТ), разработке которой посвящена данная статья.

Сложность создания ССНТ заключается в необходимости учета априорной неопределенности ряда параметров (удельных значений жесткости троса и потерь его упругости, массы элементов), а также изменения длины троса в процессе испыта-

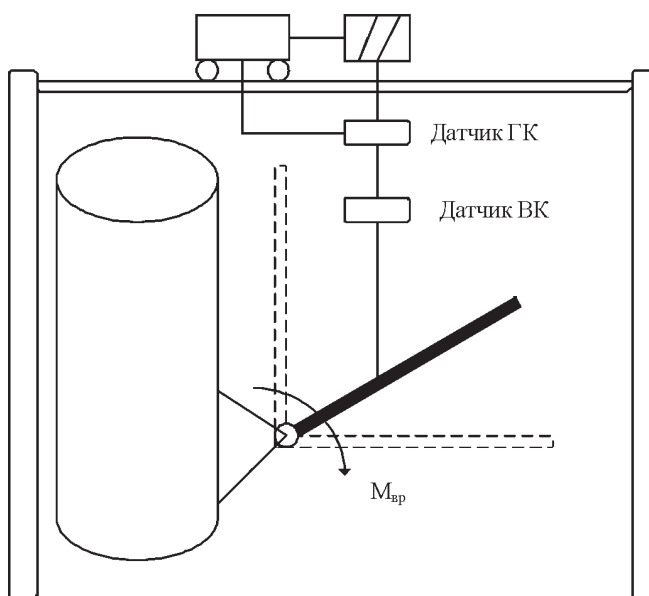


Рис. 1. Стенд имитации невесомости

ний. Указанные параметры предлагается рассматривать как интервально-неопределенные, задаваемые своими граничными значениями.

Известно [2], что при проектировании систем с указанными параметрами целесообразно использовать робастные регуляторы, настройки которых гарантируют сохранение работоспособности систем при всех возможных значениях интервальных параметров.

Таким образом, существует необходимость в разработке ССНТ и методики синтеза ее робастного регулятора, который будет стабилизировать натяжение в тросе в условиях интервальной неопределенности параметров во всех испытательных режимах. Важным с практической точки зрения является доведение разрабатываемых алгоритмов синтеза до программной реализации на ЭВМ, позволяющей проектировщику настраивать регуляторы по заданному критерию функционирования системы.

Структура системы стабилизации натяжения троса

На рис. 2 представлена функциональная схема ССНТ, состоящая из механической системы (МС), датчика натяжения (ДН) троса, тиристорного пре-

образователя (ТП), двигателя (М), редуктора (Р), упругого элемента (УЭ) — троса и регулятора.

Компенсация веса звена КА осуществляется путем его вывешивания на тросе за центр масс и поддержания при движении звена постоянного натяжения троса с помощью момента на валу двигателя. На основании дифференциальных уравнений отдельных элементов ССНТ составлена ее математическая модель в виде структурной схемы, приведенной на рис. 3.

На рисунке используются следующие обозначения: $J = 0,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ — момент инерции электропривода ССНТ; $C = C_{уд} / l \text{ Н/м}$ — жесткость троса; $\chi = \chi_{уд} / l \text{ Н}\cdot\text{с/м}$ — коэффициент демпфирования колебаний в тросе; $C_{уд} = 2000 \text{ Н}$ — удельная жесткость троса; $\chi_{уд} = 1000 \text{ Н}\cdot\text{с}$ — удельный коэффициент демпфирования; $r = 0,05 \text{ м}$ — радиус приводного шкива электропривода. Передаточная функ-

ция $W = \frac{r^2}{Js}$ на рис. 3 моделирует механическую

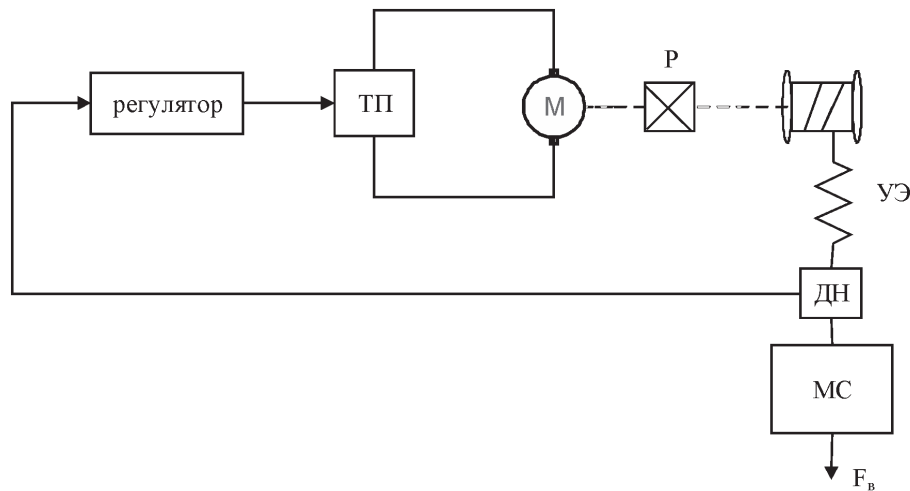


Рис. 2. Функциональная схема ССНТ

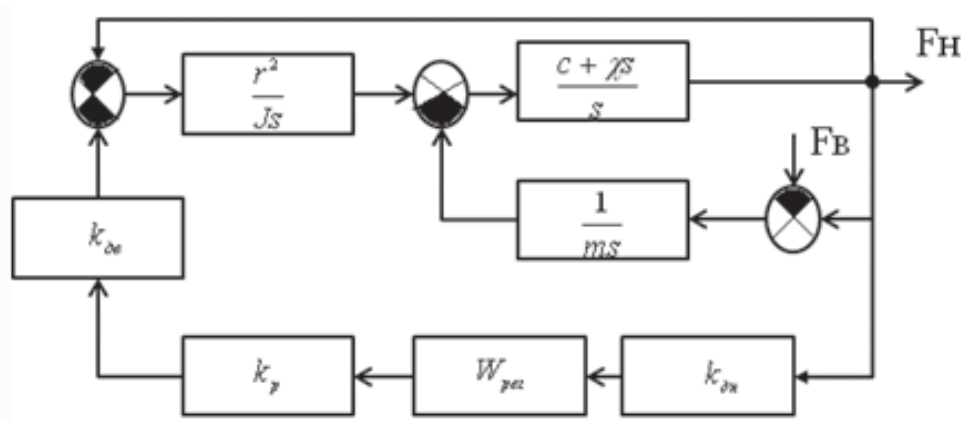


Рис. 3. Структурная схема ССНТ

часть электропривода ССНТ, преобразующую эквивалентную силу электродвигателя в скорость сматывания троса с барабана. Передаточной функцией

$W = \frac{C + \chi s}{s}$ описывается трос как упругий элемент, который преобразует разность скоростей на его концах в натяжение троса. Модель инерционного звена КА массой m представлена функцией

$W = \frac{1}{ms}$. Блоки схемы на рис.3 с коэффициентами

передач $k_{дн}, k_p, k_{дв}$ моделируют соответственно датчик натяжения троса, усилитель и электрическую часть привода. В качестве интервальных параметров ССНТ рассматриваются длина троса l и масса m . Входным сигналом ССНТ является сила внешнего воздействия F_b , приводящая звено КА в движение в условиях невесомости. Выходным сигналом ССНТ является сила натяжения троса F_n .

Анализ передаточных функций ССНТ по возмущению в установившемся режиме с различными передаточными функциями регулятора показал, что в системе целесообразно использовать ПИ-регулятор, который обеспечивает астатизм 1-го порядка. Его передаточная функция имеет вид

$$W_p(s) = \frac{k_1 + k_2 s}{s}$$

Данный регулятор содержит два параметра настройки — k_1 и k_2 , определяющие качество переходных процессов в ССНТ.

Выбор критерия качества процессов управления

В результате преобразования структурной схемы, приведенной на рис.3, получен характеристический полином системы

$$P(s) = p_3 s^3 + p_2 s^2 + p_1 s^1 + p_0, \quad (1)$$

где

$$p_3 = Jl; \quad p_2 = \frac{1}{m} J\chi + r\chi(k_2 K + 1);$$

$$p_1 = \frac{1}{m} J + r(Ck_2 K + \chi k_1 K + C); \quad p_0 = k_1 K r^2 C.$$

Как видно из (1), в коэффициенты полинома линейно входят настройки регулятора и полилинейно — интервальные параметры системы.

Пусть масса звена КА m принадлежит диапазону [40; 50] кг, а длина троса l в процессе раскрытия принимает любые значения из интервала [1; 5] м. Тогда, используя правила интервальной

арифметики, приведем полином (1) к интервальному виду

$$P(s) = [p_3]s^3 + [p_2]s^2 + [p_1]s^1 + [p_0], \quad (2)$$

где

$$p_3 = [0,5; 2,5]; \quad p_2 = [12,5; 15] + 2,50k_2;$$

$$p_1 = [25; 30] + 5k_2 + 2,5k_1; \quad p_0 = 5k_1.$$

Заметим, что в полиноме (2) коэффициент p_0 не зависит от интервальных параметров и является постоянным. В этом случае будем считать, что нижние и верхние пределы p_0 равны. Интервальные коэффициенты p_1, p_2, p_3 образуют параметрический многогранник M , вершины которого определяются крайними значениями коэффициентов.

Дальнейший синтез робастного регулятора ССНТ предлагается проводить с помощью коэффициентного метода [2], использующего соотношения между коэффициентами полинома $P(s)$ и корневыми показателями качества. Для анализа робастной устойчивости интервальной системы вводится показатель устойчивости [3]:

$$\lambda_i = \frac{\overline{p_{i-1} p_{i+2}}}{\underline{p_i p_{i+1}}}, \quad i = \overline{1, n-2}.$$

Для анализа колебательности может быть использован показатель колебательности:

$$\delta_l = \frac{\underline{p_l^2}}{(\underline{p_{l-1} p_{l+1}})}, \quad l = \overline{1, n-1}.$$

В качестве критерия синтеза выбран критерий максимальной степени устойчивости. Известно [3], что системы, синтезированные по этому критерию, обладают более высоким быстродействием, меньшим перерегулированием и большим запасом устойчивости.

Параметрический синтез робастного регулятора

Для решения задачи параметрического синтеза робастного ПИ-регулятора предлагается использовать достаточное условие максимальной степени устойчивости системы [4] при ограничении на ее колебательность. Указанное достаточное условие представляет собой систему условий, связывающих интервальные коэффициенты характеристического полинома системы со степенью устойчивости η и показателем колебательности $\mu = \text{tg}(\varphi)$, зависящим от $\delta_l, l = \overline{1, n-1}$. Согласно [4, 5] указанная система имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\overline{p_{i-1}(\bar{k})} \overline{p_{i+2}(\bar{k})}}{(\underline{p_i(\bar{k})} - \overline{p_{i+1}(\bar{k})}(n-i-1)\eta)(\overline{p_{i+1}(\bar{k})} - \underline{p_{i+2}(\bar{k})}(n-i-2)\eta)} = 0,465, \quad i = \overline{1, n-2}; \\ \frac{\overline{p_{j-1}(\bar{k})} \overline{p_{j+2}(\bar{k})}}{(\underline{p_j(\bar{k})} - \overline{p_{j+1}(\bar{k})}(n-i-1)\eta)(\overline{p_{j+1}(\bar{k})} - \underline{p_{j+2}(\bar{k})}(n-i-2)\eta)} < 0,465, \quad j = \overline{1, n-2}, \quad j \neq i; \\ \underline{p_m(\bar{k})} - \overline{p_{m+1}(\bar{k})}(n-i-1)\eta \geq 0, \quad m = \overline{1, n-1}; \\ \underline{p_0(\bar{k})} - \overline{p_1(\bar{k})}\eta + 2\underline{p_2(\bar{k})} \frac{\eta^2}{3} \geq 0; \\ \frac{\underline{p_l^2}}{\underline{p_{l-1} p_{l+1}}} \geq \delta_\delta, \quad l = \overline{1, n-1}, \end{array} \right. \quad (3)$$

где $\overline{p_i}$ — верхний предел; $\underline{p_i}$ — нижний предел i -го коэффициента полинома; δ_Δ — допустимый показатель колебательности, определяемый из таблицы [4].

Количество решаемых систем определяется числом коэффициентов полинома (2). Из полученных в результате решений системы (3) наборов значений параметров регулятора выбираются те, которые обеспечивают максимальное значение η . На основании (3) составим систему условий максимальной степени устойчивости для рассматриваемой ССНТ:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{12,5k_1}{((25 + 5k_2 + 2,5k_1) - (15 + 2,5k_2)\eta)(15 + 2,5k_2)} = 0,465; \\ (25 + 5k_2 + 2,5k_1) - (15 + 2,5k_2)\eta \geq 0; \\ 5k_1 - (30 + 5k_2 + 2,5k_1)\eta + (12,5 + 2,5k_2) \frac{\eta^2}{3} \geq 0; \\ \frac{(25 + 5k_2 + 2,5k_1)^2}{5k_1(15 + 2,5k_2)} \geq \delta_\Delta; \\ \frac{(12,5 + 2,5k_2)^2}{2,5(30 + 5k_2 + 2,5k_1)} = \delta_\Delta. \end{array} \right. \quad (4)$$

Приняв в (4) в последнем выражении $\delta_\Delta = 1,7$, что соответствует сектору $\varphi = \pm 70^\circ$ расположения корней полинома, выразим параметр регулятора k_1 через k_2 :

$$k_1(k_2) = \frac{\left(\frac{1}{m} J\chi + r\chi(k_2 + 1)\right)^2 - 1,7l^2 J C \left(\frac{J}{m} - r^2 k_2 - r^2\right)}{1,7l_2 J r^2 \chi}$$

Далее из первого выражения системы (4) получим уравнение

$$\overline{p_0(k_1)} \overline{p_3} - 0,465 \left(\underline{p_1(k_1, k_2)} - \eta \overline{p_2(k_1, k_2)} \right) \left(\overline{p_2(k_1, k_2)} \right) = 0,$$

из которого выразим второй параметр регулятора k_2 через степень устойчивости η . Проведя указанные преобразования, получим систему неравенств

$$\left\{ \begin{array}{l} (25 + 5k_2(\eta) + 2,5k_1(k_2(\eta))) - (15 + 2,5k_2(\eta))\eta \geq 0; \\ 5k_1(k_2(\eta)) - (30 + 5k_2(\eta) + 2,5k_1(k_2(\eta)))\eta + (12,5 + 2,5k_2(k_1(\eta))) \frac{\eta^2}{3} \geq 0; \\ \frac{(25 + 5k_2(\eta) + 2,5k_1(k_2(\eta)))^2}{5k_1(k_2(\eta))(15 + 2,5k_2(\eta))} \geq 1,7. \end{array} \right. \quad (5)$$

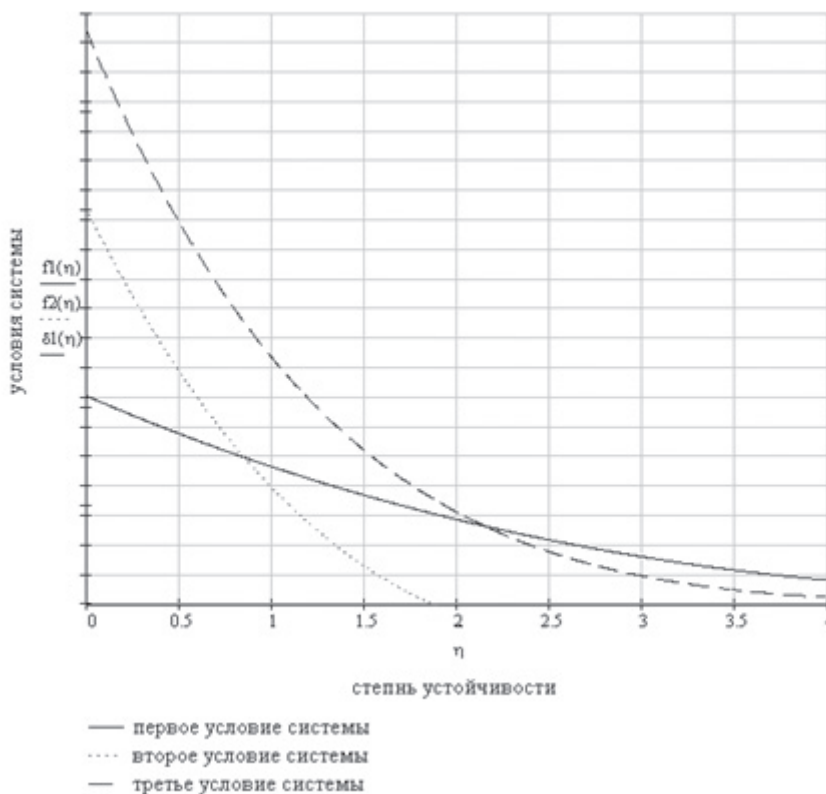


Рис. 4. Графическое решение системы (5)

Решение системы (5) удобно получить графическим способом (рис. 4).

Из рисунка определим для ССНТ максимально возможную степень устойчивости $\eta_{\max} = 1,987$, которую обеспечивает ей синтезируемый ПИ-регулятор. Подставив найденное значение η_{\max} в выражения для параметров регулятора, найдем $k_1 = 5,71$, $k_2 = 0,37$.

Программная реализация алгоритма синтеза робастного регулятора

Для проектировщика ССНТ желательно иметь удобный и эффективный инструмент, позволяющий синтезировать систему с помощью ЭВМ. Поэтому на основании полученных алгоритмов синтеза робастных регуляторов интервальных систем на языке C++ разработан программный комплекс (ПК) RASILS[4]. Интерфейс ПК RASILS предполагает выбор типа регулятора и задание ограниченный (требуемой добротности системы и допустимого показателя колебательности). На рис. 5 приведены главное окно программного комплекса и результаты синтеза ПИ-регулятора ССНТ в ПК RASILS. Из окна видно, что $k_1 = 5,71$, $k_2 = 0,37$ и $\eta_{\max} = 1,98$ при ограничении колебательности ССНТ сектором $\varphi = \pm 70^\circ$.

Для оценки робастного качества ССНТ корневым методом проведено построение областей локализации корней интервального характеристического полинома ССНТ (рис. 6).

Из рис. 6 видно, что ССНТ имеет максимальную робастную степень устойчивости $\eta_{\max} = 2$ и робастную колебательность $\varphi = \pm 65^\circ$. Отличие реальных оценок робастного качества от расчетных объясняется достаточностью условий, примененных при синтезе регулятора.

Моделирование процессов управления

Для проверки работоспособности робастной ССНТ с синтезированным регулятором проведено ее моделирование в пакете Matlab с помощью приложения Simulink. Моделирование системы проведе-

но в вершине V многогранника ее интервальных параметров, которая соответствует максимальной робастной степени устойчивости. При построении областей локализации корней интервального характеристического полинома (рис. 6) установлено, что указанная вершина имеет координаты V (40;1), где

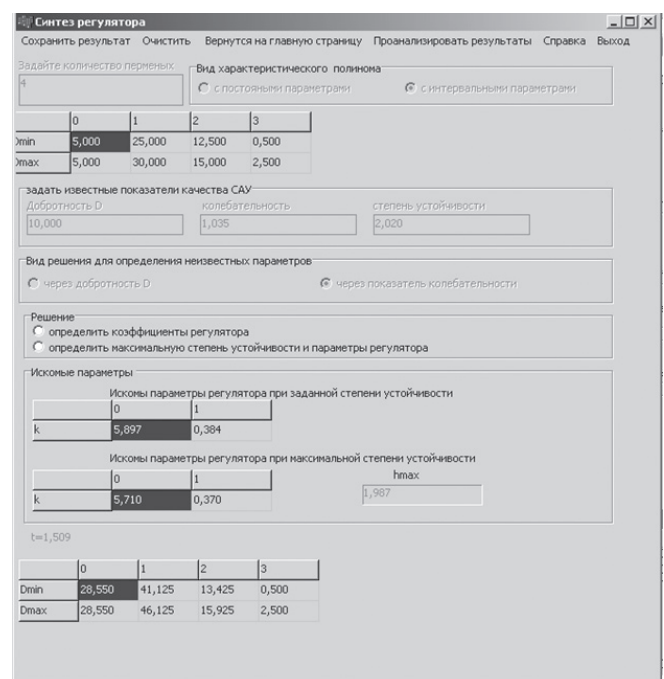


Рис. 5. Синтез регулятора в ПК RASILS

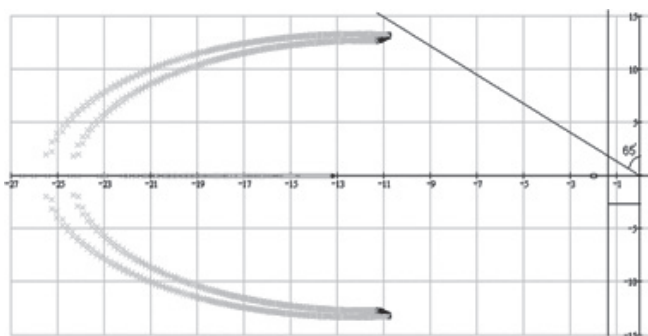
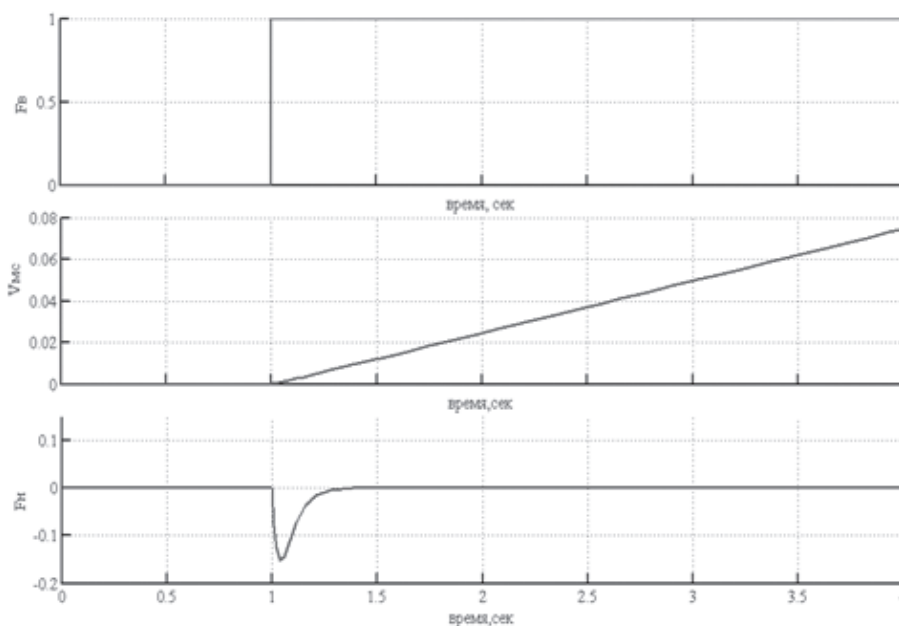


Рис. 6. Области локализации корней

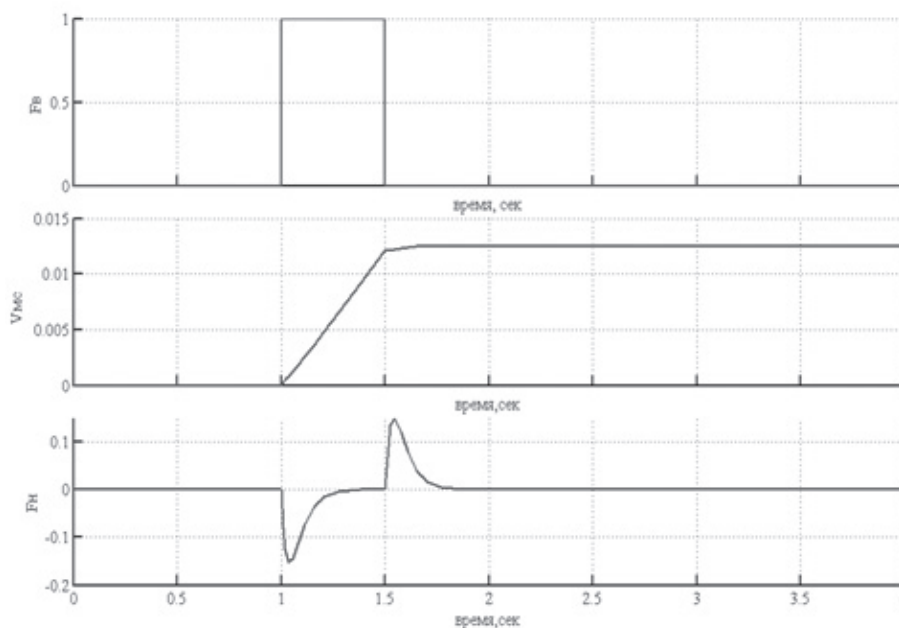
первая координата соответствует массе звена, а вторая — длине троса.

Моделирование в вершине V проведено для двух характерных режимов работы ССНТ, соответствующих ступенчатому и импульсному внешним воздействиям F_B (рис. 7).

Из анализа рис. 7 можно сделать следующие выводы. При подаче ступенчатого воздействия F_B звено КА начинает двигаться равноускоренно. При этом из-за наличия в ССНТ астатизма установившееся значение F_H равно нулю. При импульсном воздействии F_B звено КА движется с постоянной



а)



б)

Рис. 7. Переходные процессы в ССНТ при ступенчатом F_B (а) и импульсном F_B (б)

линейной скоростью. Установившееся значение F_n при этом также равно нулю. Указанный характер движения звена КА в обоих режимах полностью соответствует условию невесомости.

Выводы

Разработана структура робастной системы стабилизации натяжения троса, позволяющая создавать условия невесомости при испытаниях космического аппарата на специальном стенде. Для расчета параметров используемого в системе ПИ-регулятора применены коэффициентный метод и критерий максимального быстродействия. Эффективность работы спроектированной системы подтверждена графиками переходных процессов в различных режимах функционирования.

Проведенные исследования выявили ряд новых задач, решение которых позволит улучшить качество работы робастной системы стабилизации натяжения троса для стенда имитации невесомости. В частности, представляется целесообразным учитывать при проектировании системы различные сопутствующие нелинейности (сухое трение в блоках трособлочной системы, люфты в электроприводах).

Библиографический список

1. *Вадутов О.С., Мельников Ю.С., Гайворонский С.А., Новокшионов С.В.* Синтез динамических регуляторов интервальных автоматических систем стенда имитации невесомости // Информационные системы и технологии: Материалы международной конференции. Новосибирск, 2000. С. 371-377.
2. *Петров Б.Н., Соколов Н.И., Липатов А.В.* и др. Системы автоматического управления объектами с переменными параметрами: Инженерные методы анализа и синтеза. — М.: Машиностроение, 1986. — 256 с.
3. *Гайворонский С.А., Езангина Т.А.* Настройка ПИ-регулятора для максимизации степени устойчивости интервальной системы // Автоматизация процессов управления. 2013. № 1 (31). С. 86-91.
4. *Гайворонский С.А., Езангина Т.А.* Программное обеспечение для синтеза линейных регуляторов систем с интервальными параметрами // Известия ТПУ, серия «Управление, вычислительная техника и информатика». 2012. Т. 321. № 5. С. 29-34.

THE SYNTHESIS OF THE ROBUST STABILIZATION SYSTEM OF CABLE TENSION FOR THE TEST BENCH OF WEIGHTLESSNESS SIMULATION

Gayvoronskii S.A.* , Ezangina T.A.**

*Tomsk Polytechnic University,
TPU, 30, Lenina av., Tomsk, 634050, Russia*

** e-mail: saga@tpu.ru*

*** e-mail: eza-tanya@yandex.ru*

Abstract

The issue concerning the design of the stabilization system of cable tension is being solved in the given work.

On the basis of the conducted study and review of the similar systems the structure of the stabilization system of cable tension was suggested. This system is electromechanical two mass elastic flexible system with the interval parameters. The length of the cable and the mass of the apparatus under test are considered as the interval parameters. For the given system the mathematical model was developed and the control and disturbance transfer functions were obtained.

On the basis of the application of the robust approach to the synthesis of the system under consideration the methodology of the definition of the robust regulator adjustment ensuring the tolerable quality

coefficient of the system operation at any values of its interval parameters was developed. The criterion of the maximum stability degree was used as one of the criteria of the robust regulator synthesis being the most relevant for the development of the system with unstable parameters. To apply the mentioned above criterion it is suggested to use the sufficient conditions of the specified stability degree of the interval system by the limitation on its oscillation and accuracy. The specified conditions can be represented as the inequality systems binding the interval coefficients of the characteristic polynomial and its coefficient quality indices (stability and oscillation parameters).

From the obtained interval values those parameters are only chosen which ensure the maximum stability degree and minimum oscillation. To check and test the

obtained results the areas of root locus of the interval characteristic polynomial are being constructed.

The simulation modeling of the synthesized control system of cable tension in the Simulink package is carried out to assess the operability of the developed methodology of the synthesis of the robust regulator. The obtained transient characteristics under the worst modes of operations confirm the accuracy and validity of the selected solutions.

Software was developed to put into practice the methodology of the synthesis of the robust regulator. This software allows in on-line mode to make calculations of the desired parameters of the robust regulator with maximum stability degree of the system by its oscillation degree limitation.

The results of the scientific investigation obtained in the given article can be used at aerospace industrial plants.

Keywords: stabilization system, interval parameters, the synthesis of robust controller, the maximum degree of stability, the degree of oscillation.

References

1. Vadutov O.S., Mel'nikov Yu.S., Gaivoronskii S.A., Novokshonov S.V. *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii*, Novosibirsk, 2000, pp.371-377.
2. Petrov B.N., Sokolov N.I., Lipatov A.V. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya ob"ektami s peremennymi parametrami: Inzhenernye metody analiza i sinteza* (Systems of automatic control of objects with variable parameters: Engineering methods of the analysis and synthesis), Moscow, Mashinostroenie, 1986, 256 p.
3. Gayvoronskii S.A., Ezangina T.A. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya*, 2013, no. 1 (31), pp. 86-91.
4. Gayvoronskii S.A., Ezangina T.A. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*, 2012, vol. 321, no. 5, pp.29-34.