УДК 681.5.01:658.5

Мещанов А.С., Каратаева М.В., Самышева Е.Ю.

СТРУКТУРНОЕ УМЕНЬШЕНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ И РЕГУЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ УПРАВЛЕНИЯ НА СКОЛЬЗЯЩИХ РЕЖИМАХ. I

Предлагаются структурно-параметрические преобразования в уменьшении и минимизации энергетических затрат и в регулировании параметров установившихся колебаний управления на скользящих режимах при номинальных и неопределенных ограниченных возмущениях.

Введение

В оценочных исследованиях энергетических затрат на управление предлагается применить интеграл за время переходного процесса $T_{nn} = t_{nn} - t_0$ от нормы вектора управления $\|u\| = \sum_j |k_j u_j|$:

$$J = \int_{t_0}^{t_{nn}} \|u\| dt = \int_{t_0}^{t_{nn}} \left(\sum_{j=1}^{m} |k_j u_j| \right) dt, \quad j = \overline{1, m}, \tag{1}$$

где k_j – размерные коэффициенты.

Для малых энергетических затрат на управление и возможности регулирования установившихся колебаний управления выдвигаются и математически обосновываются три предложения. Первое из предложений обосновывается и дополнительно - в результате численного моделирования в системе программирования Matlab системы стабилизации напряжения генератора электромеханической системы в составе авиационно-космического объекта.

Предложение 1. Значения модулей $|u_i|$ разрывных управлений в скользящем режиме при соответствующем задании их параметров принимают минимальные (нулевые) значения в результате обращения в ноль непрерывных составляющих управления в случае совпадения многообразия скольжения с подходящим по качеству процессов управления подпространством, образованном собственными векторами матрицы линейного стационарного объекта управления.

Предложение 2. Для существенного уменьшения энергетических затрат на управление объектом предлагается использовать его подходящую динамику без действия на него стабилизирующего управления на определенных промежутках времени, по каким либо показателям характеризующим преимущество свободного (без управления) движения объекта в условиях допускающих действие всех традиционных внешних и параметрических номинальных и неопределенных ограниченных возмущений.

Предложение 3. Для регулирования установившихся колебаний самого управления на скользящих режимах во избежание их возможного негативного воздействия на исполнительные механизмы и на другие звенья системы управления следует в малой окрестности многообразия скольжения переходить (переключаться) на новые управления, не вызывающие «прошивание» фазовыми траекториями поверхностей переключений структур, но обеспечивающие асимптотическое и в основном без переключений структур попадание изображающей точки (и.т.) системы на данное многообразие скольжения, либо амплитуда установившихся колебаний управления в малой окрестности многообразия скольжения, вызываемых самим управлением, скользящим режимом и возмущениями, уменьшается до заданных значений достаточно близких к нулевым.

Вне малой окрестности предпочтительно действие ранее полученных простых в реализации управлений [1,2], приводящих достаточно быстро и без больших значений и энергетических затрат системы в скользящие режимы традиционного типа. Такое переключаемое в малой окрестности многообразия скольжения управление является гибридным.

Постановка задачи

Рассматривается линейный стационарный в номинальной части объект

$$\dot{x} = A_0 x + B_0 u + D_0 F_0(t) + h(t), \qquad (2)$$

где $h(t) = \Delta A(t)\,x + \Delta B(t)\,u + D_0\,\Delta F(t) + \Delta D(t)\,F_0(t) + \Delta D(t)\,\Delta F(t)$ – приведенный вектор неопределенных ограниченных возмущений, $A(t) = A_0 + \Delta A(t)$, $B(t) = B_0 + \Delta B(t)$, $D(t) = D_0 + \Delta D(t)$, $F(t) = F_0(t) + \Delta F(t)$, $F(t) = (F_1(t),...,F_l(t))^T$, $u = (u_1,...,u_m)^T$ – векторное управление, приводящее систему (2) в скользящий режим на многообразии скольжения $S(s = Cx = 0)$. Предполагаются выполненными известные условия инвариантности скользящего режима к вектору неопределенных ограниченных возмущений (линейной зависимости столбцов матрицы D_0 и столбца $h(t)$ со столбцами матрицы B_0 входа управления) [3, 4]: $D_0 = B_0 \Lambda_{D_0}$, $h = B_0 \Lambda_h$.

Управление предлагается формировать в виде суммы непрерывной номинальной $u_{н0}$ и разрывной u_p составляющих

$$u = u_{н0} + u_p. \qquad (3)$$

Первая из составляющих формируется в виде линейной обратной связи тем или иным известным методом [5, 6] по заданным собственным значениям и собственным векторам
номинальной системы

$$\dot{x} = A_0 x + B_0 u_{н0} \tag{4}$$

в виде

$$u_{н0} = K_0 x, \tag{5}$$

где $K_0 - m \times n -$ матрица постоянных коэффициентов.

Вторая составляющая служит для приведения исходной системы (2) в скользящий режим на $(n-m)-$мерном многообразии пересечения m гиперплоскостей скольжения

$$S(s = Cx = 0), \quad s = (s_1, ..., s_m)^T, \tag{6}$$

где $s_j = C_j x,\ j = \overline{1,m},\ C = (C_1^T, ..., C_m^T)^T = (C^1,\ \ C^2),\ C_j = (c_{j1}, ..., c_{jn}),\ C^1$ и $C^2 - m \times (n-m)$ и $m \times m -$блоки матрицы C.

Разрывное управление u_p предлагается формировать в свою очередь в виде суммы

$$u_p = u_{p0} + u_h, \tag{7}$$

где u_{p0} приводит в скольжение на многообразие S (6) номинальную систему (4) с номинальным возмущением $D_0 F_0(t)$

$$\dot{x} = A_0 x + B_0(u_{н0} + u_{p0}) + D_0 F_0(t)\ , \tag{8}$$

u_h преодолевает возможное неблагоприятное воздействие (на процесс приведения в скольжение) вектора неопределенностей $h(t)$ в исходной системе (2).

Составляющая u_{p0} представляет сумму

$$u_{p0} = u_0 + u_{F_0}, \tag{9}$$

где u_{F_0} компенсирует воздействие номинального возмущения $F_0(t)$ на процесс

приведения системы в скользящий режим на S (6), u_0 приводит в скольжение

номинальную свободную от возмущений систему

$$\dot{x} = A_0 x + B_0 u_{н0} + B_0 u_0. \tag{10}$$

Для уменьшения модулей составляющих u_i управления u будем применять идентификацию вектора $h(t)$, в частности, по методам, предложенным в работах [7, 8].

Тогда получаем номинальное (известное) возмущение $h(t)=h_0(t)$ в полной, и уже номинальной, системе (2):

$$\dot{x}=A_0\,x+B_0(u_{н0}+u_{p0})+D_0F_0(t)+h_0(t)\,, \tag{11}$$

а составляющая u_h принимается за номинальную составляющую $u_h=u_{0h}$. Вместо u_p (7) приходим к управлению:

$$u_p=u_{p0}=u_0+u_{F_0}+u_{0h}. \tag{12}$$

Отметим, что идентификация и последующая компенсация вектора $h(t)$ управлением u_{0h} становится особенно оправданной при больших предельных значениях неопределенностей, так как в этом случае управление u (7), (9) для приведения исходной системы (2) в скользящий режим, основанное на неравенствах при определении его разрывных коэффициентов, может принять сверхдостаточные значения (в то время как в большей части времени переходного процесса неопределенности могут быть и нулевыми или даже содействующими приведению в скольжение в силу своей неопределенности). Как показано в работе [9], для компенсации необходимо и достаточно, чтобы выполнялись условия инвариантности [3, 4]. Следовательно, предлагаемое управление u_{0h}, а с ним и управление u_p (12), являются реализуемыми.

Применяя методы построения векторного разрывного управления, полученные в работах [1, 2], приходим к следующим выражениям для трех слагаемых u_0, u_{F_0}, u_{0h} управления $u_p=u_{p0}$ (12):

$$u_0=u_{экв}+u_{gsн}, \tag{13}$$

где

$$u_{экв}=-[(CB_0)^{-1}C(A_0+B_0K_0)x], \tag{14}$$

$u_{экв}-$ эквивалентное управление, получаемое при выводе уравнений скользящего режима из условия $\dot{s}=C\dot{x}=C(A_0\,x+B_0K_0x+B_0u)=0$ в системе свободного движения

$$\dot{x}=A_0\,x+B_0K_0x+B_0u \tag{15}$$

по методу В.И. Уткина [4] (управление $u_{экв}=-[(CB_0)^{-1}C(A_0+B_0K_0)x]$ примет значение равное нулю в полном управлении u (3) при соответствующем, далее предлагаемом, задании матрицы C многообразия S (6) согласно Предложению 1);

$$u_{gsн}=(CB_0)^{-1}(K_g\,g+K_s s), \tag{16}$$

$$K_g = diag(\kappa_{g1}^{\pm},...,\kappa_{gm}^{\pm}), \quad K_s = diag(\kappa_{s1}^{\pm},...,\kappa_{sm}^{\pm}), \quad g = (g_1,...,g_m), \; g_i = d_i^T x, \quad i = \overline{1,m},$$

строки d_i^T и c_i^T являются линейно -независимыми; κ_{gi} и κ_{si} – разрывные, в зависимости от знаков произведений $s_i g_i$, параметры;

$$u_{F_0} = -\ (CB_0)^{-1} CD_0 F_0(t), \qquad u_{0h} = -\ (CB_0)^{-1} Ch_0(t). \tag{17}$$

Практический интерес представляют движения и.т. по фазовым траекториям системы (2), (3) в скользящем режиме в подпространствах собственных векторов матрицы

$$A_0 + B_0 K_0 \tag{18}$$

и, в особенности, если эти собственные векторы соответствуют собственным числам матрицы (18) с подходящими отрицательными вещественными частями.

В целях дальнейшего (помимо идентификации приведенного вектора неопределенных возмущений) уменьшения модулей составляющих векторного управления u в разработке энергосберегающего управления, при одновременно высоком качестве процессов управления в скользящем режиме и в системе в целом, рассмотрим движения и.т. по фазовым траекториям на многообразии S (6), совпадающем с подпространством выбранных собственных векторов, с равным нулю слагаемым $u_{экв}$ полного векторного управления u. В случае нелинейных объектов за многообразия скольжения предлагается выбирать подходящую по качеству переходных процессов сепаратрису или другое подпространство с предварительным переходом в координаты, в которых точка устойчивого равновесия совпадает с началом выбранной системы координат.

Задача состоит в том, чтобы дать строгое математическое обоснование трем выдвинутым во введении Предложениям 1-3 на примере систем с линейным стационарным объектом. Иллюстрация их применений и задача минимизации энергетических затрат на управление в данной работе не рассматривается.

Публикация осуществлена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта № 18-41-160012.

Библиографический список

1. Мещанов А.С. О приведении в скользящий режим многомерных разрывных систем с нелинейным нестационарным объектом управления. В кн.: “Устойчивость движения”, Новосибирск: Наука, 1985. С. 230 - 234.

2. Мещанов А.С. Уравнения скольжения на подвижных многообразиях и синтез векторных управлений для нелинейных объектов при неопределенных возмущениях. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2008, № 2. С. 51-56.

3. Drazenovic B. The invariance condition in variable structure systems// Automatica. 1969. Vol. 5, № 3. P. 287–295.

4. Уткин В. И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой. - М.: Наука, 1974. 272 с.

5. Андреев Ю.Н. Управление конечномерными линейными объектами. М.: Наука, 1976. 424 с.

6. Sinswat V., Fallside F. Eigenvalue/eigenvector assignment by state-feedback, Int. J. Control, 1977, vol. 26, № 3. P.389-403.

7. Мещанов А.С. Идентификация и компенсация возмущений в управлении нелинейными объектами, применение для посадки возвращаемого космического аппарата. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2010, № 3. С.164-173.

8. Мещанов А.С., Масалимов М.Ш. Метод идентификации приведенного вектора неопределенных возмущений для управлений на многообразиях скользящих режимов. Труды Третьей российской конференции с международным участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения». Россия, Москва, Институт проблем управления, 18-20 апреля 2012 г. CD, С. 810-816.

9. Мещанов А.С. Синтез скользящих режимов при невыполнении условий инвариантности к возмущениям в системах с линейными стационарными объектами с размерностью отличной от удвоенной размерности управления. // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2014, №4. С.154-163.