Труды Международной конференции
"Проблемы управления и приложения (техника, производство, экономика)"
Минск, 16-20 мая 2005, с. 120–123

СИНТЕЗ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СМЕСИТЕЛЯ АСФАЛЬТОБЕТОНА

А.С. Сурмак, И.Ф. Кузьмицкий*

Аннотация. Рассматривается нелинейная система электропривода смесителя асфальтобетона. Предполагается при этом, что на систему действуют сингулярные возмущения. Определяется закон управления электропривода, учитывающий быстрые и медленные составляющие процесса.

Ключевые слова: электропривод, сингулярное возмущение, управление.

Введение

При производстве теплых и горячих асфальтобетонных смесей на установках цикличного действия имеет место серьезная проблема стабильности качества готового продукта. На качество асфальтобетона влияет большое количество факторов: температура и влажность каменных материалов, гранулометрический состав смеси, кислотность минеральных материалов, температура, а также физико-химические свойства битума, точность дозирования компонентов, однородность получаемой смеси. При производстве мелкозернистых асфальтобетонов, предназначенных для укладки в верхние слои дорожного покрытия, в качестве компонентов смеси используются различные пластификаторы в виде мелкодисперсных порошков, а также пыль. Из-за плохой смачиваемости таких порошков происходит их «комкование», а следовательно, отсутствует возможность получения однородной смеси без управления процессом смешивания ее компонентов. На асфальтосмесительных установках классической конструкции отсутствуют контроль качества смешивания компонентов непосредственно в ходе технологического процесса, а также управление электроприводом смесителя ввиду возникновения затруднений при расположении датчиков внутри смесительной камеры из-за высокой абразивности смешиваемых компонентов, а также налипания битума. Как показывают экспериментальные исследования, неоднородности асфальтобетонной смеси вызывают пульсации тока приводного двигателя, а степень неоднородности влияет на скорость смешивания, по которым можно судить о качестве смешивания. Следовательно, имея информацию о токе электрического двигателя и скорости смесителя, можно формировать управление процессом смешивания компонентов асфальтобетона. При этом необходимо учитывать, что постоянные времени электромагнитной и механической частей системы электропривода существенно отличаются друг от друга.

1. Основная часть

Рассмотрим нелинейную, сингулярно возмущаемую систему с электропривода смесителя

$$\dot{\omega} = f(\omega) + G(\omega)i\,,\ \ \omega(0) = \omega_0\,, \tag{1а}$$

$$\varepsilon \dot{i} = g_1(\omega, i) + \varepsilon g_2(\omega, i) + Q(\omega)u\,,\ \ i(0) = i_0\,, \tag{1б}$$

где $\omega \in R^n$, $i \in R^m$, $u \in R^r$. Функции f, g_1, g_2, G и Q являются достаточно много раз непрерывно дифференцируемыми функциями их аргументов, $f(0) = 0$, $G(0) = 0$, $g_1(0,0) = 0$. Параметр $\varepsilon > 0$ представляет отношение скоростей быстрых и медленных составляющих процесса, т.е. элек-

* Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, 13а, Минск, Беларусь.

тромагнитных процессов электрической машины и механического смесителя соответственно. Здесь ω – скорость роторов смесителя, i – ток приводного двигателя.

На основании допущений:

1) ранг $Q(\omega)=m\le p \quad \forall\omega\in R^n$;
2) точка равновесия ω=0 для номинально невозмущаемой системы $\dot{\omega}=f(\omega)$ асимптотически устойчива и существует C^1 функция $V(\cdot)$: $R^n\to[0,\infty]$, такая, что

$$L_0(\omega)\equiv\nabla V(\omega)\cdot f(\omega)\langle 0\,,\ \forall\omega\in R^n, \tag{2}$$

где $L_0(\omega)$ обозначает скорость изменения V(ω) вдоль траекторий для системы $\dot{\omega}=f(\omega)$; для нелинейной системы (1) найдем управление вида обратной связи по состоянию $u=u(\omega,i,\varepsilon)$, которая обеспечивала бы приведение состояний системы в положение равновесия в начале ординат. Управление будет состоять из двух частей:

$$u(\omega,i,\varepsilon)=u_s(\omega,\varepsilon)+u_f(\omega,i,\varepsilon), \tag{3}$$

где $u_s(\omega,\varepsilon)$ и $u_f(\omega,i,\varepsilon)$ – медленное и быстрое управления соответственно, каждое из которых состоит из двух частей:

$$u_s=(\omega,\varepsilon)=u_0(\omega)+\varepsilon u_c(\omega)$$

и

$$u_f(\omega,i,\varepsilon)=u_f^1(\omega,i)+\varepsilon u_f^2(\omega,i),$$

где $u_0(\omega)$ и $u_c(\omega)$ — редуцированное и корректирующее управления соответственно, синтезированные на проектном многообразии. Две составляющие $u_f^1(\omega,i)$ и $u_f^2(\omega,i)$ для быстрого управления синтезируются из условия приведения состояний быстрой подсистемы к проектному многообразию.

Проектное многообразие получается заданием ε=0 в (1б) и решением получившегося уравнения

$$0=g_1(\omega,i)+Q(\omega)u_0(\omega)$$

для i.

Если частная производная $\left|\left(\partial/\partial i\right)g_1(\omega,i)\right|$ несингулярна для каждых (ω,i) и $u(\omega)$, удовлетворяющих (5), то, в соответствии с теоремой о существовании неявной функции, существует единственная гладкая функция $h(\bullet)$, отображающая открытую окрестность $B_\omega\subset R^n$ для ω на открытую окрестность $B_i\subset R^m$ таким образом, что

$$i=h(\omega,u_0(\omega))\equiv h_0(\omega)$$

является решением (5) и описанием проектного многообразия. Напротив, если проектное многообразие $i=h_0(\omega)$ определено для начала, то соответствующее редуцированное медленное управление $u_0(\omega)$ определяется из (5), т.е.

$$Q(\omega)u_0(\omega)=-g_1(\omega,h_0(\omega)). \tag{7}$$

Определяем ошибку

$$e(t)\equiv z(t)-h_0(\omega(t)) \tag{8}$$

как отношение быстрых составляющих от проектного многообразия. В членах ошибки e, определяемой с помощью (8) и ω как новых координат , исходную систему (1) можно записать как

$$\dot{\omega}=f(\omega)+G(\omega)h_0(\omega)+G(\omega)e\,,\ \omega(0)=\omega_0\,, \tag{9}$$
$$\varepsilon\dot{e}=g_1(\omega,e+h_0(\omega))+\varepsilon g_2(\omega,e+h_0(\omega))+Q(\omega)u\,,$$

$$-\varepsilon\left[\frac{d}{d\omega}h_0(\omega)\right]\left[f(\omega)+G(\omega)h_0(\omega)+G(\omega)e\right],\ e(0)=z_0-h_0(\omega_0). \tag{10}$$

Подсистема редуцированного порядка получается из (9) путем задания $\varepsilon=0$ в (10) и с помощью использования (5). Она описывается с помощью уравнения

$$\dot{\omega}=f(\omega)+G(\omega)h_0(\omega). \tag{11}$$

Мы знаем, что при $\varepsilon=0$ граф $i=h_0(\omega)=h(\omega,u_0(\omega))=h(\omega,u_s(\omega,0))$ определяет проектное многообразие медленных движений. Для достаточно малой $\varepsilon>0$ можно предположить граф вида

$$i=h(\omega,u_s(\omega,\varepsilon)), \tag{12}$$

который является регулярным возмущением для (6). Продифференцировав обе части (12), получаем:

$$\dot{i}=\left(\frac{dh}{d\omega}\right)\dot{\omega}=\left[\frac{\partial h}{\partial\omega}+\left(\frac{\partial h}{\partial u_s}\right)\left(\frac{\partial}{\partial\omega}u_s\right)\right]\dot{\omega}. \tag{13}$$

Умножив обе части (13) на ε и подставив в выражение для $\dot{\omega},\dot{i},i$ и u в соответствии с (1а), (1б), (12),(3) и (4), можно получить зависящее от ε уравнение в частных производных:

$$\begin{gathered}\varepsilon\left(\frac{dh}{d\omega}\right)\left[f(\omega)+G(\omega)h(\omega,u_s(\omega,\varepsilon))\right]=g_1(\omega,h(\omega,u_s(\omega,\varepsilon)))+\varepsilon g_2(\omega,h(\omega,u_s(\omega,\varepsilon)))+\\+Q(\omega)\left[u_0(\omega)+\varepsilon u_s(\omega)+u_f^1(\omega,h(\omega,u_s(\omega,\varepsilon)))+\varepsilon u_f^2(\omega,h(\omega,u_s(\omega,\varepsilon)))\right].\end{gathered} \tag{14}$$

Медленное управление определяется из условия обеспечения

$$Q(\omega)u_s(\omega)=\left[\frac{d}{d\omega}h_0(\omega)\right]\left[f(\omega)+G(\omega)h_0(\omega)\right]-g_2(\omega,h_0(\omega)). \tag{15}$$

Быстрое управление синтезируем, исходя из условия приближения величины ошибки $\|e(t)\|$ к нулю, так быстро, как это необходимо, при $t\to\infty$, другими словами, быстрые составляющие должны выводиться к точному проектному многообразию $i=h_0(\omega)$ с заранее определенной скоростью.

Вновь рассмотрим уравнение (10).

Пусть А будет гурвицевой матрицей, а Р – положительно определенной матрицей, удовлетворяющей уравнению Ляпунова

$$A^T P+PA^T=-I. \tag{16}$$

Перепишем (10) в виде

$$\begin{gathered}\varepsilon\dot{e}=Ae+\left[g_1(\omega,i)-Ae\right]+\varepsilon g_2(\omega,i)+Q(\omega)\left[u_0(\omega)+\varepsilon u_s(\omega)+u_f^1(\omega,i)+\varepsilon u_f^2(\omega,i)\right]-\\-\varepsilon\left[\frac{d}{d\omega}h_0(\omega)\right]\left[f(\omega)+G(\omega)h_0(\omega)+G(\omega)e\right],\\e(0)=i_0-h_0(\omega),\end{gathered} \tag{17}$$

где $i=e+h_0(\omega)$. С использованием уравнений (7) и (15) уравнение (17) можно переписать в виде

$$\begin{gathered}\varepsilon\dot{e}=Ae+\left[g_1(\omega,i)-g_1(\omega,h_0(\omega))-Ae\right]+\varepsilon\left[g_2(\omega,i)-g_2(\omega,h_0(\omega))\right]+\\+Q(\omega)\left[u_f^1(\omega,i)+\varepsilon u_f^2(\omega,i)\right]-\varepsilon\left[\frac{d}{d\omega}h_0(\omega)\right]G(\omega)e,\end{gathered} \tag{18}$$

$$e(0)=i_0-h_0(\omega).$$

Если быстрое управление

$$u_f(\omega,i,\varepsilon)=u_f^1(\omega,i)+\varepsilon u_f^2(\omega,i)$$

такое, что

$$Q(\omega)u_f^1(\omega,i)=-[g_1(\omega,i)-g_1(\omega,h_0(\omega)-Ae)], \qquad (19)$$

$$Q(\omega)u_f^2(\omega,i)=-\left\{g_2(\omega,i)-g_2(\omega,h_0(\omega))-\left[\frac{d}{d\omega}h_0(\omega)\right]G(\omega)e\right\}, \qquad (20)$$

где $e(t)=i(t)-h_0(\omega(t))$. Тогда совместно с медленным управлением, описываемым с помощью (7) и (15), смешанная обратная связь вида

$$u(\omega,i,\varepsilon)=u_s(\omega,\varepsilon)+u_f(\omega,i,\varepsilon)=u_0(\omega)+\varepsilon u_c(\omega)+u_c^1(\omega,i)+\varepsilon u_f^2(\omega,i)$$

обеспечивает асимптотическую устойчивость системы (17) относительно равновесного многообразия $i=h_0(\omega)$, где

$$u_0(\omega)=-Q(\omega)^{-1}g_1(\omega,h_0(\omega)), \qquad (21)$$

$$u_c(\omega)=Q(\omega)^{-1}\left\{\left[\frac{d}{d\omega}h_0(\omega)\right][f(\omega)+G(\omega)h_0(\omega)]-g_2(\omega,h_0(\omega))\right\}, \qquad (22)$$

$$u_f^1(x,z)=-Q(x)^{-1}[g_1(x,z)-g_1(x,h_0(x_0))-Ae], \qquad (23)$$

$$u_f^2(\omega,i)=-Q(\omega)^{-1}\left[g_2(\omega,i)-g_2(\omega,h_0(\omega))-\left(\frac{d}{d\omega}h_0(\omega)\right)G(\omega)e\right]. \qquad (24)$$

Если количество быстрых состояний равно количеству входов $m=p$, по допущению 1 $Q(\omega)$ обратима для всех $\omega\in R^n$ и $e=e(\omega,i)=i-h_0(\omega)$, многообразие равновесий $e=0$ или $i=h_0(\omega)$ для быстрой подсистемы (24) асимптотически устойчиво.

Заключение

В данной работе была рассмотрена нелинейная система электропривода смесителя с сингулярными возмущениями. Получен закон управления электроприводом, учитывающий быстрые и медленные составляющие процесса смешивания. Применение такого закон позволит повысить качество асфальтобетона без снижения производительности установки.