

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 62-526

Кудин В. Ф.¹, Торопов А. В.²

¹ Д-р техн. наук, профессор, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина

² Канд. техн. наук, старший преподаватель, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина, E-mail: askpify@ukr.net

СУБОПТИМАЛЬНОЕ НЕЛИНЕЙНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ УПАКОВОЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ

В статье рассматривается задача синтеза нелинейного регулятора положения электропривода «питателя» упаковочного механизма. Для нахождения субоптимального закона управления, использован метод динамического программирования с использованием концепции метода инвариантного «погружения». Осуществлено моделирование и произведен сравнительный анализ электропривода со стандартными линейными регуляторами положения, а также с синтезированным нелинейным регулятором.

Ключевые слова: электропривод «питателя», субоптимальное нелинейное управление, контур регулирования положения, метод инвариантного «погружения», метод динамического программирования, упаковочный механизм.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время существенно повысились требования к производительности и качеству работы электро-механических систем упаковочного оборудования. При этом качество упаковывания продукции в пакеты определяется согласованной работой электропривода подачи, работающего в повторно-кратковременном режиме с частыми пусками, и электропривода «вращателя», обеспечивающего подвод теплонагревателей механизма запайки в заданную точку [1–3].

Для пакетов, в которых длина значительно превышает диаметр в месте пайки, в значительной степени производительность определяется быстродействием механизма подачи, или так называемого «питателя», обеспечивающего заданную точность позиционирования при максимальном количестве циклов в минуту. При этом цикл включает разгон, перемещение с заданной скоростью и торможение в точке, определяемой программно или дискретным датчиком «маркером», срабатывающим по метке, нанесенной на упаковочной пленке. При

использовании электроприводов переменного тока с асинхронными двигателями и датчиками обратной связи по скорости достигается производительность до 70 циклов в минуту. В случае применения электроприводов с синхронными двигателями и обратной связью по положению производительность механизма подачи может достигать 140 циклов в минуту. При этом система управления такими электроприводами строится по принципу подчиненного регулирования со стандартными линейными законами управления во внутреннем и внешнем контуре регулирования [4].

Дальнейшее увеличение производительности при необходимом качестве регулирования положения вала привода «питателя» ограничено влиянием таких факторов, как наличие нелинейностей системы управления, нестационарность параметров привода и т. д. Для исключения этого влияния целесообразно применение нелинейных оптимальных и субоптимальных регуляторов, обеспечивающих минимальную длительность переходных процессов в системе при наличии ограниче-

ния на управляющее воздействие. Одним из наиболее перспективных направлений остается синтез систем управления методом Беллмана-Ляпунова для нелинейных объектов с использованием инвариантного вложения [5, 6].

Целью статьи является разработка субоптимального нелинейного управления электроприводом «питателя», обеспечивающего повышение производительности упаковочных механизмов.

СИНТЕЗ НЕЛИНЕЙНОГО РЕГУЛЯТОРА ПОЛОЖЕНИЯ

Структурная схема электропривода механизма подачи упаковочного оборудования имеет вид, изображенный на рис. 1.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: φ – угол положения вала двигателя, ω – угловая скорость вала двигателя, K_c – коэффициент обратной связи по скорости, T_v – постоянная времени контура регулирования скорости, u – напряжение на выходе регулятора положения, u_{max} – максимальное напряжение на выходе регулятора положения, $\sigma = f(\varphi)$ – функция, описывающая выходной сигнал регулятора без учета ограничения на управление, σ_0 – значение выходного сигнала регулятора на входе в зону ограничения, φ_3 – задание угла по положению, ПЛК – программируемый логический контроллер, КРС – контур регулирования скорости, реализованный на основе сервопривода с синхронным двигателем.

Система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих динамику позиционного электропривода, имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= x_3, \\ \dot{x}_3 &= -a_1x_2 - a_2x_3 + bsat(\sigma), \end{aligned} \tag{1}$$

где $x_1 = \varphi$, $x_2 = \omega$, $x_3 = \dot{\omega} = \varepsilon$, ε – ускорение электропривода.

Наличие нелинейности в математической модели управляемого объекта делает процедуру синтеза достаточно сложной с вычислительной точки зрения для системы третьего порядка. В этом случае целесообразно использовать метод Беллмана-Ляпунова с использованием концепции метода инвариантного погружения, при

котором исходная нелинейная задача распадается на семейство линейных задач аналитического конструирования регуляторов.

Для получения системы линейных дифференциальных уравнений осуществим процедуру «мгновенной» линеаризации нелинейности типа «насыщение»

$$sat(\sigma) = q(\sigma)\sigma, \tag{2}$$

где $q(\sigma)$ – коэффициент «мгновенной» линеаризации, меняющийся для различных областей фазового пространства.

Тогда система дифференциальных уравнений, получаемая из (1), запишется в виде

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= x_3, \\ \dot{x}_3 &= -a_1x_2 - a_2x_3 + bq(\sigma)\sigma. \end{aligned} \tag{3}$$

Функционал качества, определяющий максимальное быстродействие системы, имеет вид [7]

$$\min_{\sigma} J = \int_0^{\infty} 1 dt. \tag{4}$$

Введем в функционал качества (4) дополнительную составляющую, определяющую ограничение на управление с целью минимизации используемых энергетических ресурсов. Тогда функционал (4) преобразуется к виду

$$\min_{\sigma} J = \int_0^{\infty} (1 + c\sigma^2) dt, \tag{5}$$

где c – коэффициент, определяющий ограничение на управляющее воздействие.

Представим подынтегральное выражение функционала качества $W(x) = 1$ в виде квадратичной функции $W(x) = \alpha(x_1)x_1^2$, где $\alpha(x_1) = x_1^{-2}$ – весовой коэффициент, определяющие ограничение на динамическую составляющую [8].

Тогда функционал качества, определяющий максимальное быстродействие системы, при условии мини-

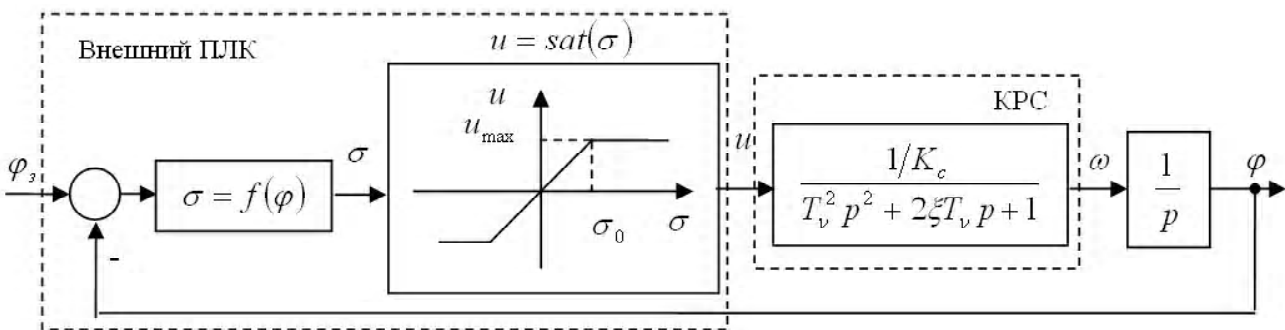


Рис. 1. Структурная схема позиционного электропривода механизма подачи

мизации энергетических затрат на обработку начальных условий принимает вид

$$\min_{\sigma} J = \int_0^{\infty} (\alpha(x_1)x_1^2 + c\sigma^2) dt. \quad (6)$$

Таким образом, задача отыскания минимума функционала качества сводится к классической задаче решения задачи Летова-Каллмана о нахождении минимума квадратичного функционала качества [9].

Функциональное уравнение Беллмана принимает вид

$$\alpha(x_1)x_1^2 + c\sigma^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1}x_2 + \frac{\partial V}{\partial x_2}x_3 + \frac{\partial V}{\partial x_3}(-a_1x_2 - a_2x_3 + bq(\sigma)\sigma) = 0. \quad (7)$$

После осуществления процедуры нахождения экстремума, получаем закон управления в явном виде

$$\sigma = -\frac{bq(\sigma)}{2c} \frac{\partial V}{\partial x_3}. \quad (8)$$

Тогда уравнение Гамильтона-Якоби-Беллмана для замкнутой системы имеет вид

$$\alpha(x_1)x_1^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1}x_2 + \frac{\partial V}{\partial x_2}x_3 + \frac{\partial V}{\partial x_3} \times (-a_1x_2 - a_2x_3) = \frac{b^2q^2(\sigma)}{4c} \left(\frac{\partial V}{\partial x_3} \right)^2. \quad (9)$$

В соответствии с методикой, изложенной в [4, 5], процедуру синтеза с использованием метода инвариантного вложения проведем в виде следующей последовательности этапов.

Первый этап. Осуществляется решение задачи АК для линеаризованной системы (3) и квадратичного функционала «в малом», то есть при $q(\sigma) = q_1$, $\alpha(x_1) = \alpha_1$. При этом приходим к решению уравнения Риккати вида

$$\alpha_1x_1^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1}x_2 + \frac{\partial V}{\partial x_2}x_3 + \frac{\partial V}{\partial x_3}(-a_1x_2 - a_2x_3) = \frac{b^2q_1^2}{4c} \left(\frac{\partial V}{\partial x_3} \right)^2. \quad (10)$$

При q_1 и α_1 находим коэффициенты функции Беллмана. Тогда уравнение регулятора при решении задачи «в малом» запишется так: $U_M = -k_1x_1 - k_2x_2 - k_3x_3$.

Второй этап. Осуществляется решение задачи АК для линеаризованной системы (3) и квадратичного функци-

онала «в большом», то есть при $q(\sigma) = q_2$, $\alpha(x_1) = \alpha_2$. При этом приходим к решению уравнения Риккати вида

$$\alpha_2x_1^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1}x_2 + \frac{\partial V}{\partial x_2}x_3 + \frac{\partial V}{\partial x_3}(-a_1x_2 - a_2x_3) = \frac{b^2q_2^2}{4c} \left(\frac{\partial V}{\partial x_3} \right)^2. \quad (11)$$

При q_2 и α_2 находим коэффициенты функции Беллмана. Тогда уравнение регулятора при решении задачи «в большом» запишется так: $U_B = -k'_1x_1 - k'_2x_2 - k'_3x_3$.

Третий этап. Определяются новые допустимые управления и осуществляется сшивание «мгновенных значений» управляющих воздействий u_M и u_B , справедливых для различных областей фазового пространства. Коэффициенты регулятора k_1, k_2, k_3 являются функциями переменных состояния и весовой константы функционала качества, поэтому управляющими воздействиями полагаем вариации параметров $\Delta k_1, \Delta k_2, \Delta k_3$ [5, 6]. Тогда управление «в большом» принимает вид

$$u_B = -\left(\sum_{i=1}^3 k_i x_i + \sum_{j=1}^3 \Delta k_j x_j \right) = -(u_M + \sum_{j=1}^3 \Delta k_j x_j). \quad (12)$$

Минимизируемый неклассический функционал (критерий обобщенной работы Красовского А. А.) [10], отвечающий требованиям динамической точности и минимума затрат на управление, имеет вид

$$\min_{\Delta k_1, \Delta k_2, \Delta k_3} J_3 = \int_0^{\infty} \left[\alpha_2 x_1^2 + \sum_{j=1}^5 c_j \Delta k_j^2 + \sum_{j=1}^5 \frac{x_j^2}{4c_j} \cdot \left(bq_2 \frac{\partial V}{\partial x_3} \right)^2 \right] dt. \quad (13)$$

Подставляя (3) в (2), получим

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= x_3, \\ \dot{x}_3 &= -a_1x_2 - a_2x_3 - \\ &- b \cdot q_2 \cdot \left(\sum_{i=1}^5 k_i x_i + \sum_{j=1}^5 \Delta k_j x_j \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Для системы уравнений (14) и минимизируемого функционала (13) составим функциональное уравнение Беллмана

$$\begin{aligned} & \min_{\Delta k_1, \Delta k_2, \Delta k_3} \left[\alpha_2 x_1^2 + \sum_{j=1}^3 c_j \Delta k_j^2 + \right. \\ & + \sum_{j=1}^3 \frac{x_j^2}{4c_j} \cdot \left(bq_2 \frac{\partial V}{\partial x_3} \right)^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1} \cdot x_2 + \\ & + \frac{\partial V}{\partial x_2} \cdot x_3 + \frac{\partial V}{\partial x_3} \cdot (-a_1 x_2 - a_2 x_3 - \\ & \left. - bq_2 \cdot \sum_{i=1}^5 k_i x_i - bq_2 \cdot \sum_{j=1}^3 \Delta k_j x_j \right) = 0. \end{aligned} \tag{15}$$

Реализуя процедуру минимизации, получаем

$$\Delta k_i = \frac{bq_2}{2c_i} \cdot \frac{\partial V}{\partial x_3} \cdot x_i, \quad i = \overline{1,3}. \tag{16}$$

Подставляем уравнения (16) в (15) и получаем модификацию уравнения Гамильтона-Якоби-Беллмана в замкнутой форме

$$\begin{aligned} & \alpha_2 x_1^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1} \cdot x_2 + \frac{\partial V}{\partial x_2} \cdot x_3 + \frac{\partial V}{\partial x_3} \times \\ & \times (-a_1 x_2 - a_2 x_3 - bq_2 \cdot \sum_{i=1}^3 k_i x_i) = 0. \end{aligned} \tag{17}$$

Решение уравнения (17) будем искать в виде квадратичной формы

$$V(x_1, x_2, x_3) = \sum_{ij=1}^3 k_{ij} x_i x_j. \tag{18}$$

Подставляем (18) в (17), находим коэффициенты квадратичной формы и подставляем их в уравнение регулятора, получаем

$$\begin{aligned} \sigma = & \sum_{i=1}^3 k_i x_i + \sum_{i=1}^3 \left(\frac{bq_2}{c_1} x_1^2 + \frac{bq_2}{c_2} x_2^2 + \right. \\ & \left. + \frac{bq_2}{c_3} x_3^2 \right) \sum_{j=1}^3 k_{j3} x_j. \end{aligned} \tag{19}$$

С целью исследования динамики замкнутой системы было проведено цифровое моделирование. Переходные процессы по положению вала двигателя при использовании в контуре классического ПИД-регулятора, регулятора с упреждающей связью и синтезированного нелинейного регулятора отображены на рис. 2.

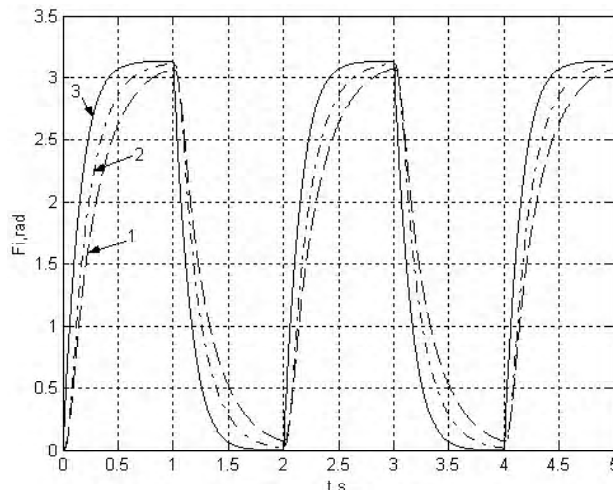


Рис. 2. Графики переходных процессов по углу поворота вала двигателя при использовании стандартного ПИД-регулятора положения (кривая 1), регулятора положения с упреждающей связью (кривая 2) и синтезированного нелинейного субоптимального регулятора (кривая 3)

ВЫВОДЫ

Анализ графиков показывает, что качество переходного процесса в системе с нелинейным регулятором существенно выше, чем с традиционным ПИД-регулятором. Использование предложенного регулятора позволяет значительно сократить время переходного процесса. Это позволяет либо увеличить производительность упаковочной установки за счет изменения сигнала задания с внешнего контроллера, либо обеспечить более качественную запайку пакета с помощью термонагревателя. Дальнейшее улучшение качества регулирования возможно за счет решения задачи аналитического конструирования при классическом функционале. Однако, это приведет к необходимости отыскания функции Беллмана в виде последовательности степенных форм, что существенно усложнит процедуру синтеза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Торопов, А. В.* Особенности построения систем позиционирования в упаковочных автоматических установках на базе серийных преобразователей частоты Lenze / А. В. Торопов, Д. А. Абдураманов // *Електромеханічні та енергозберігаючі системи*, Випуск 3/2012 (19). – С. 158–160.
2. Производство упаковочного оборудования / ООО «НПП ИНТА», Киев, 2012. – <http://inta.org.ua/> – режим доступа: свободный. – Заглавие с экрана.
3. Производство упаковочного оборудования / ООО «НПП Интермаш», Киев, 2012 – <http://www.intermash.kiev.ua/> – режим доступа: свободный. – Заглавие с экрана.
4. *Абдураманов, Д. А.* Регулируемый электропривод механизмов подачи упаковочного оборудования / Д. А. Абдураманов, А. В. Торопов // *Упаковка*. – 2008. – № 6. – С. 40–42.

5. Кудин, В. Ф. Аналитическое конструирование нелинейных регуляторов с помощью метода гармонической линеаризации / В. Ф. Кудин, А. В. Кудин // Известия высших учебных заведений. – Электромеханика. – 1989. – № 9. – С. 60–67.
6. Кудин, В. Ф. К вопросу построения нелинейного регулятора методом динамического программирования / В. Ф. Кудин // Автоматика, АН УССР. – 1968. – № 1. – С. 32–38.
7. Александров, А. Г. Оптимальные и адаптивные системы / А. Г. Александров. – М. : Высшая школа, 1989. – 263 с.
8. Kudin, V. F. Suboptimal control of crane moving mechanism considering damping of load / V. F. Kudin, M. V. Pechenik, S. P. Kolesnichenko // 16 International Conference on Soft Computing MENDEL 2010, Brno, Czech Republic, June 23–25. – P. 381–386.
9. Летов, А. М. Динамика полета и управление / А. М. Летов. – М. : Наука, 1969. – 359 с.
10. Справочник по теории автоматического управления. Под редакцией А. А. Красовского. – М. : Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 712 с.

Стаття надійшла до редакції 02.12.2012.

Після доробки 24.01.2013.

Кудин В. Ф.¹, Торопов А. В.²

¹Д-р техн. наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна

²Канд. техн. наук, старший викладач, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна

СУБОПТИМАЛЬНЕ НЕЛІНІЙНЕ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПАКУВАЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ

У статті розглядається задача синтезу нелінійного регулятора положення електропривода «живильника» пакувального механізму. Для знаходження субоптимального закону керування використаний метод динамічного програмування з використанням концепції методу інваріантного «занурення». Здійснено моделювання та зроблений порівняльний аналіз електропривода зі стандартними лінійними регуляторами положення, а також з синтезованим нелінійним регулятором.

Ключові слова: електропривод «живильника»; субоптимальне нелінійне керування; контур регулювання положення; метод інваріантного «занурення»; метод динамічного програмування; пакувальний механізм.

Kudin V. F.¹, Toropov A. V.²

¹Doctor of Science, professor, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine

²Ph.D., Senior Lecturer, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine

SUBOPTIMAL NONLINEAR CONTROL OF PACKAGING MACHINERY DRIVE

This paper deals with the procedure of synthesis of a nonlinear position controller for the «feeder» of packaging mechanism. The mathematical model of «feeder» drive with regard to the restriction on the control output of external PLC. Linearization of nonlinear characteristic by the «secants» method is implemented and selected functional quality that defines the minimal time of transients is selected. Quality functional in the form of a quadratic functional with a variable weighting factor is presented. To find the suboptimal control law, the method of dynamic programming method using the concept of an invariant «immersion» is used. In this case, the original nonlinear problem is decomposed into several linear optimal control problems. The problem of synthesis of the position controller «in the small» and «in the large» is solved; the analytical expressions for the control actions are obtained. As a result of the synthesis of the nonlinear control law, containing linear and cubic components of the state variables is obtained. The dynamic characteristics of the «feeder» drive with the standard linear position control, as well as synthetic nonlinear control method of digital simulation are presented.

Keywords: «feeder» drive; suboptimal nonlinear control, position control loop, invariant «immersion» method, dynamic programming method, packaging machinery.

REFERENCES

1. Toropov A. V., Abduramanov D. A. Osobennosti postroeniya sistem pozicionirovaniya v upakovochnykh avtomaticheskikh ustanovkakh na baze serijnykh preobrazovatelej chastoty Lenze, *Elektromehanični ta energozberigajuchi sistemi*, Vypusk 3, 2012 (19), pp. 158–160.
2. Proizvodstvo upakovochного oborudovanija/ ООО «NPP INTA», Kiev, 2012, <http://inta.org.ua/> – rezhim dostupa: svobodnyj, Zaglavie s ekrana.
3. Proizvodstvo upakovochного oborudovanija/ ООО «NPP Intermash», Kiev, 2012, <http://www.intermash.kiev.ua/> – rezhim dostupa: svobodnyj, Zaglavie s ekrana.
4. Abduramanov D. A., Toropov A. V. Reguliruemij elektroprivod mehanizmov podachi upakovochного oborudovanija, *Upakovka*, 2008, No. 6, pp. 40–42.
5. Kudin V. F., Kudin A. V. Analiticheskoe konstruirovanie nelinejnykh reguljatorov s pomoshh'ju metoda garmonicheskoi lineiarizacii, *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij, Elektromehanička*, 1989, No. 9, pp. 60–67.
6. Kudin V. F. K voprosu postroeniya nelinejnogo reguljatora metodom dinamicheskogo programmirovaniya. *Avtomatika, AN USSR*, 1968, No. 1, pp. 32–38.
7. Aleksandrov A. G. Optimal'nye i adaptivnye sistemy. Moscow, Vysshaja shkola, 1989, 263 p.
8. Kudin V. F., Pechenik M. V., Kolesnichenko S. P. Suboptimal control of crane moving mechanism considering damping of load, *16 International Conference on Soft Computing MENDEL 2010, Brno, Czech Republic, June 23–25*, pp. 381–386.
9. Letov A. M. Dinamika poleta i upravlenie. Moscow, Nauka, 1969, 359 p.
10. Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravlenija. Pod redakciej A. A. Krasovskogo. Moscow, Nauka. Gl. red. fiz.-mat. Lit., 1987, 712 p.