

УДК 62-526

В. Ф. Кудин, д-р техн. наук,
А. В. Торопов, канд. техн. наук,
Н. В. Маснык

КВАЗИОПТИМАЛЬНОЕ НЕЛИНЕЙНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ «ЗАПАЙЩИКА» УПАКОВОЧНОЙ УСТАНОВКИ

Аннотация. Реализована процедура синтеза квазиоптимального регулятора, в значительной степени компенсирующего вредное влияние люфта червячного редуктора электропривода «запайщика». Для нахождения алгоритма управления использован метод динамического программирования с применением концепции процедуры «инвариантного погружения». Произведен анализ переходных процессов в контуре регулирования перемещения с синтезированным алгоритмом и классическим ПИ–регулятором положения.

Ключевые слова: упаковочный механизм, позиционный электропривод, аналитическое конструирование, статическая линеаризация, люфт, нелинейное управление, инвариантное погружение, математическое моделирование, критерий оптимальности

V. F. Kudin, ScD.,
A. V. Toropov, PhD.,
M. V. Masnyk

NONLINEAR QUASIOPTIMAL CONTROL OF PACKAGING SYSTEM “SEALER” DRIVE

Abstract. Synthesis procedure of the quasi- regulator, which largely offsets harmful effects of worm gear “sealer” motor backlash is implemented. Dynamic programming method using the concept of procedure “invariant imbedding” is used to find the control algorithm. The analysis of transients in the control loop of movement with the synthesized algorithm and classical PI–position controller was made.

Keywords: packaging machinery, electric position, analytical design, static linearization, backlash, nonlinear control, invariant immersion, mathematical modelling, optimality

В. Ф. Кудін, д-р техн. наук,
А. В. Торопов, канд. техн. наук,
М. В. Масник

КВАЗИОПТИМАЛЬНЕ НЕЛІНІЙНЕ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ «ЗВАРЮВАЧА» ПАКУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Анотація. Реалізовано процедуру синтезу квазиоптимального регулятора, що значною мірою компенсує шкідливий вплив люфту червячного редуктора електроприводу «зварювача». Для знаходження алгоритму управління використано метод динамічного програмування з застосуванням концепції процедури «інваріантного занурення». Зроблено аналіз перехідних процесів в контурі регулювання переміщення з синтезованим алгоритмом і класичним ПІ–регулятором положення.

Ключові слова: пакувальний механізм, позиційний електропривод, аналітичне конструювання, статична лінеаризація, люфт, нелінійне керування, інваріантне занурення, математичне моделювання, критерій оптимальності

Введение. В пищевой промышленности увеличение выпуска готовой продукции часто обеспечивается за счет повышения производительности упаковочных механизмов. В значительной степени это достигается путем оптимизации работы электропривода перемещения паяльного элемента, обеспечивающего надежную и плотную упаковку готовой продукции для конечного потребителя.

Большинством производителей задача улучшения работы «запайщика» решается за счет применения быстродействующих сервоприводов с синхронными двигателями, использования дорогостоящих планетарных редукторов и перевода электроприводов «запайщика» от кривошипно-шатунных механизмов вращательного движения на механизмы возвратно-поступательного движения [1]. При этом электропривод работает в режиме частых реверсов, что приводит к необходимости увеличения мощности преобразо-

© Кудин В.Ф., Торопов А.В.,
Маснык Н.В., 2013

вателя частоты и повышению стоимости упаковочной установки в целом [2].

Отечественным производителям упаковочного оборудования с целью обеспечения конкурентоспособности своей продукции приходится использовать более дешевые комплектующие для систем электропривода. Так, для привода механизма «запайщика» вместо сервопреобразователей чаще всего приходится использовать систему на базе преобразователя частоты (ПЧ), асинхронного двигателя и высоколюфтового червячного редуктора. Это, в свою очередь, ведет к ухудшению точности отработки положения «запайщика» и снижению производительности установки в целом [3].

Наличие в червячном редукторе существенного «люфта» при больших скоростях запайки приводит к возникновению автоколебаний в механической части привода, вибрациям паяльного механизма в процессе пайки и снижению качества готовой продукции. Помимо этого, на качество регулирования процесса перемещения паяльного элемента значительное влияние оказывает наличие ограничения на управление. В большинстве случаев управляющее воздействие на ПЧ формируется с помощью программируемого логического контроллера (ПЛК), решающего также задачу обработки сигналов дополнительных датчиков упаковочной установки. В системах с сервоприводами такая проблема практически отсутствует, так как контур регулирования положения реализуется в самом электроприводе и внешний контроллер лишь подает дискретную команду на отработку профиля.

Целью работы является создание квазиоптимального регулятора, позволяющего скомпенсировать вредное влияние «люфта» и «ограничения» на управляющее воздействие при использовании асинхронного электропривода с червячным редуктором.

Материалы исследования. Для осуществления процедуры синтеза используем математическую модель электропривода «запайщика», представленную на рис. 1. На нём представлены следующие обозначения: ЗПП – задатчик профиля перемещения; РП – регулятор положения; ПЛК – программируемый логический контроллер; ЭПЗ – электро-

привод «запайщика», работающий в режиме регулирования скорости; $\varphi_{i\epsilon}, \varphi_i$ – заданное и текущее значение угла поворота выходного вала исполнительного механизма, соответственно; φ, ω – угол поворота и скорость вращения вала электродвигателя; K_c – коэффициент обратной связи по скорости; T_μ – постоянная времени контура регулирования скорости; $u_{\delta i}$ – управляющий сигнал на выходе регулятора положения; $u_{i\bar{\omega}}$ – управляющий сигнал с учетом ограничения, передаваемый на вход ПЧ.

При переходе от структурной схемы к системе дифференциальных уравнений математическая модель позиционного электропривода переписывается в виде

$$\begin{aligned} \varphi_M &= f_2(\varphi); \\ \dot{\varphi} &= \omega; \\ \dot{\omega} &= \varepsilon; \\ \dot{\varepsilon} &= -T_\mu^{-2}\omega - 2\xi T_\mu^{-1}\varepsilon + K_c^{-1}T_\mu^{-2}u_{i\bar{\omega}}; \\ u_{i\bar{\omega}} &= f_1(u_{\delta i}), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\varepsilon = \dot{\omega}$ – угловое ускорение механической части электропривода; $u_{\delta i}$ – управляющее воздействие.

Представленная математическая модель содержит нелинейности «люфт» и «ограничение», что существенно затрудняет процедуру выбора структуры и параметров регулятора положения классическими частотными методами либо методом последовательной коррекции.

Перспективным направлением в развитии систем управления электроприводами является использование метода Беллмана – Ляпунова для решения задачи аналитического конструирования регуляторов [4]. Он обладает высокой вычислительной эффективностью и позволяет осуществлять процедуру синтеза для линейных систем высокого порядка. В случае наличия нелинейностей метод существенно усложняется с вычислительной точки зрения и может быть использован для нахождения закона управления лишь с применением методов декомпозиции и «инвариантного погружения», однако лишь для схем с однозначными нелинейностями [5–7]. Поэтому для осуществления

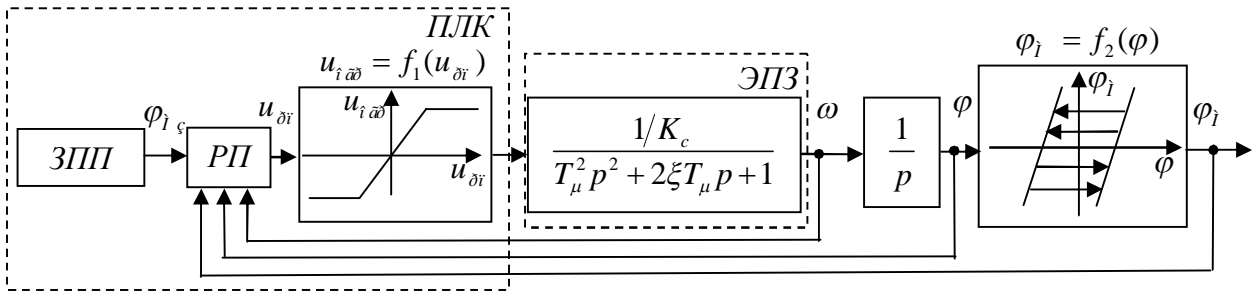


Рис. 1. Структурная схема электропривода «запайщика»

процедуры синтеза регулятора, обеспечивающего оптимальное поведение электропривода, необходимо перейти от неоднозначной нелинейности к модели в виде нелинейного дифференциального уравнения [8].

$$\dot{\varphi}_M = \text{sign}^{-1}(i^{-1}\varphi - \varphi_M). \quad (2)$$

где i – передаточное число редуктора.

Исходную математическую модель электропривода (1) в нормальной форме Коши перепишем следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \text{sign}^{-1}(a_1 x_2 - x_1); \\ \dot{x}_2 &= x_3; \\ \dot{x}_3 &= x_4; \\ \dot{x}_4 &= -a_2 x_3 - a_3 x_4 + \text{bsat}(u), \end{aligned} \quad (3)$$

где $x_1 = \varphi_M$; $x_2 = \varphi$; $x_3 = \omega$; $x_4 = \varepsilon$; $a_1 = i^{-1}$, $a_2 = T_\mu^{-2}$; $a_3 = 2\xi T_\mu^{-1}$; $b = K_c^{-1} T_\mu^{-2}$; $u = u_{\delta i}$; sat – функция «насыщения».

В результате получена система уравнений с однозначными нелинейностями, к которой может быть применен метод Беллмана-Ляпунова с использованием концепции процедуры «инвариантного погружения». В качестве минимизируемого функционала выбираем квадратичный критерий качества, обеспечивающий минимальные динамическую ошибку и затраты на управление при отработке программного задающего воздействия [9]:

$$\min_u J = \int_0^\infty (\sum_{i=1}^4 q_i x_i^2 + r u^2) dt, \quad (4)$$

где $q_i (i = \overline{1,4})$, r – весовые коэффициенты, определяющие ограничения на переменные состояния и управление.

При решении задачи аналитического конструирования регулятора для нелинейной модели объекта и квадратичного функциона-

ла процедура синтеза сводится к следующей последовательности.

На первом этапе происходит разложение исходной нелинейной задачи синтеза на множество линейных задач аналитического конструирования. При этом методом «статической» линеаризации осуществляется замена нелинейных зависимостей математической модели линейными, где коэффициенты линеаризации являются функцией переменных состояния объекта и управляющего воздействия [10–12]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= K_1(x_1, x_2)(a_1 x_2 - x_1); \\ \dot{x}_2 &= x_3; \\ \dot{x}_3 &= x_4; \\ \dot{x}_4 &= -a_2 x_3 - a_3 x_4 + b K_2(u)u, \end{aligned} \quad (5)$$

где $K_1(x_1, x_2)$, $K_2(u)$ – коэффициенты «статической» линеаризации.

Далее необходимо получить уравнение Гамильтона-Якоби-Беллмана в замкнутой форме. Для системы линеаризованных дифференциальных уравнений (5) и квадратичного функционала (4) составляем функциональное уравнение Беллмана:

$$\begin{aligned} \min_u [q_1 x_1^2 + q_2 x_2^2 + q_3 x_3^2 + q_4 x_4^2 + \\ + r u^2 + \frac{\partial S}{\partial x_1} K_1(x_1, x_2)(a_1 x_2 - x_1) + \\ + \frac{\partial S}{\partial x_2} x_3 + \frac{\partial S}{\partial x_3} x_4 + \\ + \frac{\partial S}{\partial x_4} (-a_2 x_3 - a_3 x_4 + b K_2(u)u)] = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где $S = S(x_1, x_2, x_3, x_4)$ – функция Беллмана.

Затем осуществляем процедуру поиска экстремума по управляющему воздействию и получаем закон оптимального управления в явном виде:

$$u = -\frac{bK_2(u)}{2r} \frac{\partial S}{\partial x_4}. \quad (8)$$

Подставляя полученное выражение для u в уравнение (7), получаем уравнение Гамильтона-Якоби-Беллмана:

$$\begin{aligned} & q_1x_1^2 + q_2x_2^2 + q_3x_3^2 + q_4x_4^2 + \\ & + \frac{\partial S}{\partial x_1} K_1(x_1, x_2)(a_1x_2 - x_1) + \frac{\partial S}{\partial x_2} x_3 + \\ & + \frac{\partial S}{\partial x_3} x_4 + \frac{\partial S}{\partial x_4} (-a_2x_3 - a_3x_4) = \quad (9) \\ & = \frac{b^2 K_2^2(u)}{4r} \left(\frac{\partial S}{\partial x_4} \right)^2. \end{aligned}$$

После этого решается задача получения оптимального закона управления для различных областей фазового пространства, в частности, «в большом» и «в малом». Решение уравнения (9) ищется в виде квадратичной формы, т.е. $S(x_1, x_2, x_3, x_4) = \sum_{ij=1}^4 k_{ij} x_i x_j$.

Вначале решение уравнения ищем для значений коэффициентов $K_1(x_1, x_2) = K_{1M}$, $K_2(u) = K_{2M}$, справедливых для области пространства «в малом». При этом управляющее воздействие «в малом» может быть записано в следующем виде:

$$u_i = -k_1x_1 - k_2x_2 - k_3x_3 - k_4x_4. \quad (10)$$

Аналогично решается уравнения Гамильтона-Якоби-Беллмана «в большом» для коэффициентов $K_1(x_1, x_2) = K_{1A}$, $K_2(u) = K_{2A}$. Управляющее воздействие «в большом»

$$u_A = -k'_1x_1 - k'_2x_2 - k'_3x_3 - k'_4x_4. \quad (11)$$

На следующем этапе определяется новый класс допустимых управлений путём исследования взаимосвязей между законами регулирования, полученными при решении линейных задач аналитического конструирования.

При движении изображающей точки в пространстве состояний из области «в большом» в область «в малом» происходит изменение закона оптимального управления с u_A на u_i . Структура регулятора при этом не

меняется, а варьируются лишь коэффициенты перед переменными состояния. Таким образом, можно рассматривать вариации параметров оптимального управления как новые управляющие воздействия. При этом закон управления «в большом» определяется так:

$$u_A = u_i - \Delta k_1x_1 - \Delta k_2x_2 - \Delta k_3x_3 - \Delta k_4x_4, \quad (12)$$

где $\Delta k_i (i = \overline{1,4})$ – новые управляющие воздействия.

На заключительном этапе синтеза осуществляется «сшивание» управлений «в большом» и «в малом» и получение нелинейного закона управления.

С учетом выражения (12) систему нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих динамику управляемого объекта для всей области фазового пространства, перепишем в виде

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= K_{1A}(a_1x_2 - x_1); \\ \dot{x}_2 &= x_3; \\ \dot{x}_3 &= x_4; \\ \dot{x}_4 &= -a_2x_3 - a_3x_4 + bK_{2A}(-k_1x_1 - \\ & - k_2x_2 - k_3x_3 - k_4x_4 - \Delta k_1x_1 - \\ & - \Delta k_2x_2 - \Delta k_3x_3 - \Delta k_4x_4). \end{aligned} \quad (13)$$

Функционал качества ищем в виде критерия обобщенной работы А.А. Красовского [13]:

$$\begin{aligned} \min_{\Delta k_1, \dots, \Delta k_4} J &= \int_0^{\infty} (q_1x_1^2 + q_2x_2^2 + \\ & + q_3x_3^2 + q_4x_4^2 + c_1\Delta k_1^2 + c_2\Delta k_2^2 + \\ & + c_3\Delta k_3^2 + c_4\Delta k_4^2 + \frac{b^2 K_{2A}^2 x_i^2}{4\bar{n}_i} \cdot \left(\frac{\partial S}{\partial x_4} \right)^2) dt, \end{aligned} \quad (14)$$

где $c_i = \Delta k_{i\max}^{-2}$, ($i = \overline{1,4}$) – весовые коэффициенты, определяющие ограничение на отклонения параметров

$$\begin{aligned} \min_{\Delta k_1, \dots, \Delta k_4} & [c_1\Delta k_1^2 + c_2\Delta k_2^2 + c_3\Delta k_3^2 + c_4\Delta k_4^2 + \\ & + \frac{\partial S}{\partial x_1} K_{1B}(a_1x_2 - x_1) + \frac{\partial S}{\partial x_2} x_3 + \frac{\partial S}{\partial x_3} x_4 + \\ & + \frac{\partial S}{\partial x_4} (-a_2x_3 - a_3x_4 + bK_{2B}(-k_1x_1 - \\ & - k_2x_2 - k_3x_3 - k_4x_4 - \Delta k_1x_1 - \Delta k_2x_2 - \\ & - \Delta k_3x_3 - \Delta k_4x_4))] = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Реализуя процедуру минимизации по Δk_i , получаем

$$\Delta k_i = \frac{bK_{2A}}{2\tilde{n}_i} \cdot \frac{\partial S}{\partial x_4}, \quad i = \overline{1,4}. \quad (16)$$

В итоге модифицированное уравнение Гамильтона-Якоби-Беллмана принимает вид

$$\begin{aligned} & q_1 x_1^2 + q_2 x_2^2 + q_3 x_3^2 + q_4 x_4^2 + \\ & + \frac{\partial S}{\partial x_1} K_{1A} (a_1 x_2 - x_1) + \frac{\partial S}{\partial x_2} x_3 + \frac{\partial S}{\partial x_3} x_4 + \\ & + \frac{\partial S}{\partial x_4} (-a_2 x_3 - a_3 x_4 + \\ & + bK_{2A} (-k_1 x_1 - k_2 x_2 - k_3 x_3 - k_4 x_4)) = 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Функцию Беллмана $S(x_1, x_2, x_3, x_4)$ ищем в виде квадратичной формы:

$$S(x_1, x_2, x_3, x_4) = \sum_{i=1}^4 s_{ij} x_i x_j. \quad (18)$$

При этом для определения коэффициентов s_{ij} необходимо решить систему линейных алгебраических уравнений.

Закон нелинейного квазиоптимального управления в общем виде примет вид

$$u_A = - \sum_{i=1}^4 k_i x_i - \sum_{i=1}^4 \frac{bK_{2A}}{c_i} x_i^2 \left(\sum_{j=1}^4 s_{j4} x_j \right). \quad (19)$$

Для анализа качества переходных процессов в системе с синтезированным регулятором использовался метод математического моделирования. В качестве образцового рассматривался график переходного процесса

по положению при использовании классического ПИ-регулятора. Результаты математического моделирования поведения системы с различными регуляторами показаны на рис. 2.

В электроприводе с классическим ПИ-регулятором положения при попытке увеличения быстродействия возникает режим автоколебаний (кривая 2). Это обусловлено, в первую очередь, наличием гистерезисной нелинейности в контуре управления. Время полного оборота выходного вала редуктора составляет 0,82 с. При использовании нелинейного алгоритма управления вредное влияние нелинейностей компенсируется, и режим автоколебаний исчезает (кривая 1). Время переходного процесса в контуре с синтезированным регулятором составляет 0,78 с.

Выводы. Очевидно, что при использовании нелинейного регулятора качество переходного процесса по положению в электроприводе «запайщика» существенно выше. Дальнейшее улучшение качества регулирования возможно за счет учета влияния «люфтов» кривошипно-шатунного механизма. Это, в свою очередь, может привести к существенному усложнению конечного алгоритма управления и потребовать применения контроллеров с большими вычислительными возможностями.

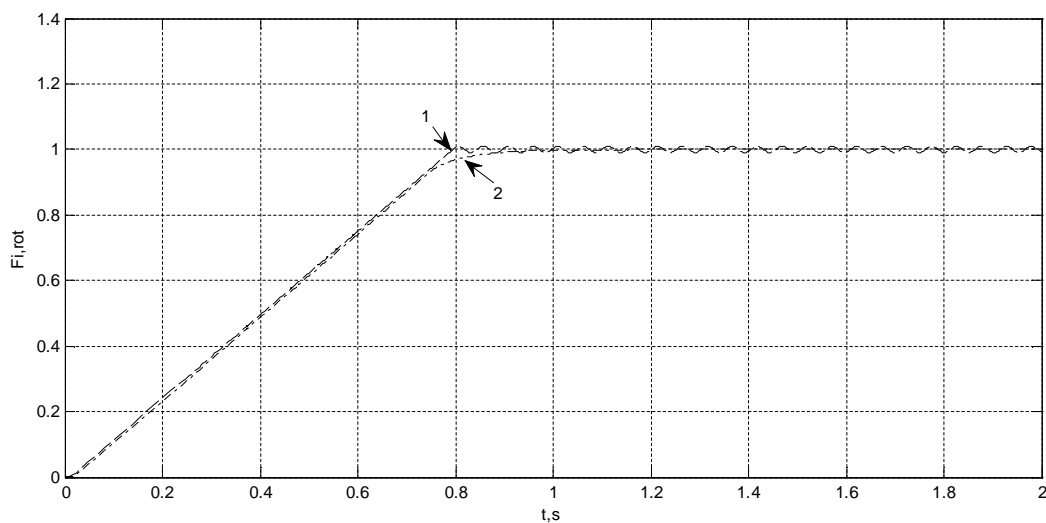


Рис. 2. Графики переходных процессов по повороту выходного вала редуктора при использовании ПИ- регулятора положения (кривая 1) и синтезированного нелинейного квазиоптимального регулятора (кривая 2)

Список использованной литературы

1. Абдураманов Д. А. Регулируемый электропривод механизмов подачи упаковочного оборудования / Д. А. Абдураманов, А. В. Торопов // Упаковка. – К. : ИАЦ "Упаковка". – 2008. – № 6. – С. 40 – 42.

2. Drive Solutions Mechatronics for production and logistics. Edited by E. Kiel. – Berlin: Springer Verlag, 2008. – 542 p.

3. 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. – К. : Вип. 3/2012 (19). – С. 158 – 160.

4. Беллман Р. Методы вычислений: Избранные главы // Автоматика и телемеханика. – М. : – 1993. – № 8. – С. 3 – 39. – № 9. – С. 3 – 51. – № 10. – С. 3 – 43.

5. Ту Ю. Современная теория управления. – М. : Машиностроение. 1971. – 472 с.

6. Кудин В. Ф. К вопросу построения нелинейного регулятора методом динамического программирования / В. Ф. Кудин // Автоматика АН УССР. – К. : 1968. – № 1. – С. 32 – 38.

7. Kudin V. F., Kolacny J. Synthesis of Suboptimal Nonlinear Regulator by Immersion Method // J. Electrical Engineering. – Bratislava, Slovakia. – 1998. – Vol. 49. – No. 1 – 2. – Pp. 11 – 15.

8. Зайцев Г. Ф. Компенсация естественных нелинейностей автоматических систем / Г. Ф. Зайцев, В. К. Стеклов. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 95 с.

9. Летов А. М. Динамика полета и управление / А. М. Летов. – М. : Наука, 1969. – 359 с.

10. Пальтов И. П. Качество процессов и синтез корректирующих устройств в нелинейных автоматических системах / И. П. Пальтов. – М. : Наука, 1973. – 584 с.

11. Кудин В. Ф. Аналитическое конструирование нелинейных регуляторов с помощью метода гармонической линеаризации / В. Ф. Кудин, А. В. Кудин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – Новочеркасск : – 1989. – № 9. – С. 60 – 69.

12. Гельднер К. Нелинейные системы управления / К. Гельднер, С. Кубик. – М. : Мир. – 1987. – 367 с.

13. Справочник по теории автоматического управления: под редакцией А. А. Краковского. – М : Наука. Гл. ред. физ.-мат. Лит. – 1987. – 712 с.

Получена 19.10.2013

References

1. Abduramanov D.A. and Toropov A.V. Reguliruemyy jelektroprivod mehanizmov podachi upakovochnogo oborudovaniya [Regulated Electric Drive Feed Mechanisms of Packaging Equipment], (2008), *IATS "Upakovka"*, Kiev, Ukraine, No. 6, pp. 40 – 42 (In Russian).

2. Kiel E. Drive Solutions Mechatronics for Production and Logistics, Berlin, (2008), *SpringerVerlag*, 542 p.

3. Toropov A.V., and Abduramanov D.A. Osobennosti postroeniya sistem pozitsionirovaniya v upakovochnykh avtomaticheskikh ustanovkakh na baze se-riinykh preobrazovatelei chastoty Lenze [Features of Construction Positioning Systems in Packaging Automated Installations on the Basis of Serial Frequency Inverters Lenze], (2012), *Elektromehanichni ta Eenergozberigayuchi Sistemi Publ.*, Kiev, Ukraine, Iss. 3(19), pp. 158 – 160 (In Russian).

4. Bellman R. Metody vychisleniy: Izbrannye glavy [Computing Methods: Selected Chapters], (1993), Moscow, Russian Federation, *Avtomatika i Telemehanika Publ.*, No. 8, pp. 3 – 39, No. 9, pp. 3 – 51, No. 10, pp. 3 – 43 (In Russian).

5. Tu Y. Modern theory of control [Sovremennaya Teoriya Upravleniya], (1971), Moscow, *Mashinostroenie Publ.*, 472 p. (In Russian).

6. Kudin V.F. K voprosu postroeniya nelineynogo regul'yatora metodom dinamicheskogo programmirovaniya [The Problem of Constructing of a Nonlinear Control by Method of Dynamic Programming], (1968), *Avtomatika Zaitsev G. F. Kompensatsiya Estestvennykh Nelineinostei Avtomaticheskikh Sistem, Akademii Nauk USSR*, Kiev, Ukraine, No. 1, pp. 32 – 38 (In Russian).

7. Kudin V.F., and Kolacny J. Synthesis of Suboptimal Nonlinear Regulator by Immersion

Method, (1998), *J. Electrical Engineering Publ.*, Bratislava, Slovakia, Vol. 49, No. 1 – 2, pp. 11 – 15.

8. Zaitsev G.F., and Steklov V.K. *Kompensatsiya estestvennyh nelineynostey avtomaticheskikh system* [Compensation Natural Nonlinearities of Automatic Systems], (1982), Moscow, Russian Federation, *Energoatomizdat Publ.*, 95 p. (In Russian).

9. Letov A.M. *Flight. Dinamika poleta i upravlenie* [Dynamics and Control], (1969), Moscow, Russian Federation, *Nauka Publ.*, 359 p. (In Russian).

10. Paltov I.P. *Kachestvo protsessov i sintez korrekiruyushchih ustroystv v nelineynyh avtomaticheskikh sistemah* [Quality of Processes and Synthesis of Correction Devices at Nonlinear Automatic Systems], (1973), Moscow, Russian Federation, *Nauka Publ.*, 584 p. (In Russian).

11. Kudin V.F. *Analiticheskoe konstruirovaniye nelineynyh regulyatorov s pomoshchyu metoda garmonicheskoy linearizatsii* [Analytic Design of Nonlinear Regulators Using Method of Harmonical Linearization], (1989), Novocherkassk, Russian Federation, *Izvestiya Vysshih Uchebnyh Zavedeniy, Elektromekhanika Publ.*, No. 9, pp. 60 – 69 (In Russian).

12. Geldner K., and Kubic S. *Nelineynye sistemy upravleniya* [Nonlinear Control Systems], (1987), Moscow, Russian Federation, *Mir Publ.*, 367 p. (In Russian).

13. Krasovskii A.A. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya: pod redaktsiei A. A. Krasovskogo* [Handbook of the Theory of Automatic Control: Edited by A. A. Krasouski], (1987), Moscow, Russian Federation, *Nauka Publ.*, *Gl. red. fiz.-mat. Lit.*, 712 p. (In Russian).



Кудин
Валерий Федорович,
д-р техн. наук, профессор
кафедры АЭМС-ЭП,
НТУУ «КПИ»
тел. (044) 424-65-85



Горопов
Антон Валериевич,
канд. техн. наук, старший
преподаватель кафедры
АУЭК, НТУУ «КПИ»
тел. (066) 736-54-53



Маснык
Николай Валериевич,
аспирант кафедры
АУЭК, НТУУ «КПИ»
тел. (099) 260-64-00