

УДК 004.942: 681.527.8

СИНТЕЗ ЭМПИРИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАТУРНО-МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Гречихин В.В., Краевский И.С., Лозин О.И., Шайхутдинов Д.В., Январёв С.Г.
*ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова», Новочеркасск, e-mail: vgrech@mail.ru*

Статья посвящена исследованию вопросов управления одного из видов исполнительных систем – электроприводов с применением активных элементов обладающих эффектом памяти формы. Разработаны математические модели, учитывающие особенности таких приводов. Однако их использование в системах управления сдерживается сложностью определения характеристик активных элементов. Для решения указанной проблемы предлагается методика синтеза эмпирических законов управления приводами по результатам натурно-модельных испытаний. В процессе испытаний выполняется итерационный процесс корректировки математической модели привода по экспериментальным данным. Для исследования методики разработан программный модуль в среде графического программирования LabVIEW. Полученные результаты показывают, что применение натурно-модельного подхода позволяет повысить точность управления приводами на основе ферромагнитных материалов с памятью формы.

Ключевые слова: натурно-модельные испытания, ферромагнитные материалы с памятью формы, электропривод, законы управления, графическое программирование

SYNTHESIS OF EMPIRICAL LAWS OF CONTROL OF ELECTRIC DRIVES ON THE BASIS OF MATERIALS WITH SHAPE MEMORY BY RESULTS OF NATURAL AND MODEL TESTS

Grechikhin V.V., Kraevskiy I.S., Lozin O.I., Shaykhutdinov D.V., Yanvarev S.G.
*Federal State Budget Educational Institution of Higher Professional University «Platov South-Russian
State Polytechnic University (NPI)», Novocherkassk, e-mail: vgrech@mail.ru*

Article is devoted to research of questions of management of one of types of executive systems – electric drives with application of the active elements having effect of shape memory. The mathematical models considering features of such drives are developed. However their use in control systems restrains complexity of definition of characteristics of active elements. For the solution of the specified problem the technique of synthesis of empirical laws of control of drives by results of natural and model tests is offered. In the course of tests iterative process of correction of mathematical model of the drive on experimental data is carried out. The program module in the environment of graphic programming of LabVIEW is developed for research of a technique. The received results show that application of natural and model approach allows increasing the accuracy of control of drives on the basis of magnetic shape memory alloy.

Keywords: natural and model tests, magnetic shape memory alloy, electric drive, control laws, graphical programming

Ферромагнитные материалы с памятью формы (ФМПФ) могут контролируемым образом преобразовывать один вид энергии в другой [1]. Это дает возможность использовать эти материалы для выполнения исполнительных и измерительных функций, повысить точность преобразования, упростить конструкцию устройств. В последнее время ведутся исследования и разработки исполнительных и измерительных систем с активными элементами (АЭ) из ФМПФ [6–8]. На использование таких систем, в том числе короткоходных линейных электроприводов, в промышленных системах управления технологическими процессами накладываются повышенные требования к точности определения параметров и надежности. Для проведения функциональной диагностики электропривода, построенного на основе ФМПФ [7], предло-

жены математическая модель привода [2, 3] и методика метрологической оценки результатов испытаний [4], позволяющие прогнозировать параметры системы управления приводом. Однако определение эксплуатационных характеристик АЭ затруднено. Физические свойства АЭ имеют нелинейный характер. Как правило, они являются элементами сложной системы и проявляют свои свойства в полной мере лишь в собранной системе. Одним из путей решения указанной проблемы является синтез эмпирических законов управления электроприводами на основе ФМПФ по результатам натурно-модельных испытаний.

Принцип работы электропривода [7] основан на изменении линейного размера (деформации) АЭ из ФМПФ под воздействием напряженности магнитного поля, вектор которой направлен перпендикулярно

плоскости изменения размера. Для обеспечения больших деформаций АЭ создается импульсное магнитное поле с напряженностью до 350 кА/м. Используется магнитная система электропривода, учитывающая эти особенности [5].

Сформулируем следующую задачу управления. Необходимо выполнить деформацию АЭ электропривода на заданную величину при допустимой ошибке управления $\varepsilon \leq 0,5$ мкм. Задача сводится к обеспечению приращения длины АЭ из ФМПФ на заданную величину от результирующего воздействия – импульса магнитного поля (или серии импульсов) с определенной амплитудой и длительностью.

Следует учитывать, что при эксплуатации электроприводов предъявляют дополнительное условие к управлению – исключение возможности перерегулирования. Конкретизируем это условие применительно к электроприводам на основе ФМПФ: фактическая длина $L_{\text{кф}}$ АЭ после управляющего воздействия должна быть строго меньше заданного значения конечной длины $L_{\text{кз}}$ на величину допустимой ошибки управления $\Delta L_{\text{оу}}$ (ошибки позиционирования) (рис. 1).

Алгоритм управления электроприводом на основе ФМПФ включает выполнение следующих этапов: генерацию управляющего импульса для перемещения АЭ; измерение фактической длины $L_{\text{кф}}$ АЭ; вычисление ошибки управления $\Delta L_{\text{оу}}$; анализ полученного результата; определение параметров корректирующего управляющего импульса. Блок-схема алгоритма показана на рис. 2. Его реализация предполагает предварительную разработку эмпирических законов управления. Они представляют собой экспериментально полученные зависимости перемещений АЭ от различных управляющих воздействий при варьируемых начальных условиях, обусловленных наличием начальной деформации АЭ. Различные начальные деформации АЭ воспроизводят результат действия управляющих импульсов на предыдущих итерациях алгоритма управления.

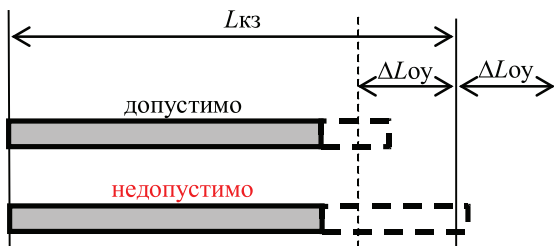


Рис. 1. Иллюстрация дополнительного условия к управлению электроприводом

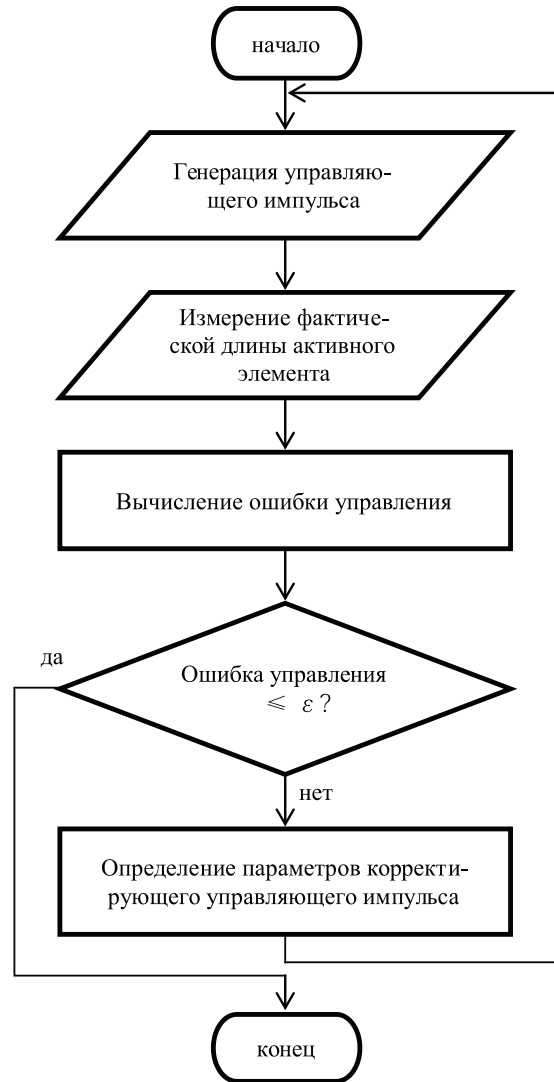


Рис. 2. Блок-схема алгоритма управления электроприводом

Задача разработки эмпирического закона управления формулируется следующим образом. Заданному значению деформации АЭ (заданному значению его конечной длины $L_{\text{кз}}$) поставить в соответствие значение амплитуды первичного управляющего импульса $U_m^{(1)}$, а также таблицу значений амплитуды вторичного управляющего импульса $U_m^{(2)}$ как функции от фактической длины активного элемента $L_{\text{кф}}$ после первичного воздействия:

$$L_{\text{кз}} = F(U_m^{(1)}, U_m^{(2)} = f(L_{\text{кф}}^{(1)})) \quad (*)$$

Выражение (*), по сути, представляет собой аналитическую запись эмпирического закона управления электроприводом с одним корректирующим воздействием.

В общем случае необходимо несколько корректирующих воздействий. При этом

аналитическая запись эмпирического закона управления с несколькими корректирующими воздействиями примет вид

$$L_{кз} = F(U_m^{(1)}, U_m^{(2)} = f_1(L_{\Phi}^{(1)}), U_m^{(3)} = f_2(L_{\Phi}^{(2)}), \dots).$$

Рассмотрим методику синтеза эмпирических законов управления электроприводом на основе ФМПФ, состоящую из следующих этапов.

Первый этап включает теоретическое определение амплитуды первичного управляющего импульса. При этом на основе математической модели определяется необходимая амплитуда управляющего импульса для достижения заданной конечной длины $L_{кз}$ АЭ.

На втором этапе экспериментально определяется разброс результатов первичного управляющего воздействия σ_y . Для этого производится серия экспериментов и определяется разброс значений фактической деформации активного элемента σ_y (рис. 3).

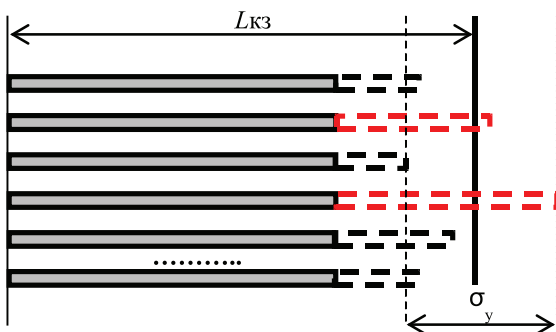


Рис. 3. Разброс значений фактической деформации АЭ

Третий этап предназначен для корректировки амплитуды первичного управляющего импульса с целью исключения ситуаций перегулирования. При этом амплитуда первичного управляющего импульса с учетом значения σ_y корректируется (уменьшается) таким образом, чтобы в серии экспериментов максимальная деформация АЭ не привела бы к превышению заданного значения конечной длины активного элемента $L_{кз}$.

На четвертом этапе выполняется проверка условия завершения процесса разработки эмпирического закона управления. Проверяется, обеспечивается ли заданная точность управления в результате предыдущих управляющих воздействий и, соответственно, завершено ли формирование закона управления (рис. 4).

На последующих итерациях повторяются действия предыдущих этапов, но уже проводится не одна, а несколько серий экспериментов с условием определенного значения начальной деформации активного элемента для каждой серии. Эти величины начальных

деформаций определяются множеством значений фактической конечной длины активного элемента, выявленных в серии экспериментов на первой итерации (после подачи первичного управляющего импульса). При этом все множество упомянутых значений может быть «прорежено» с точностью до допустимой ошибки управления $\Delta L_{\text{доп}}$.

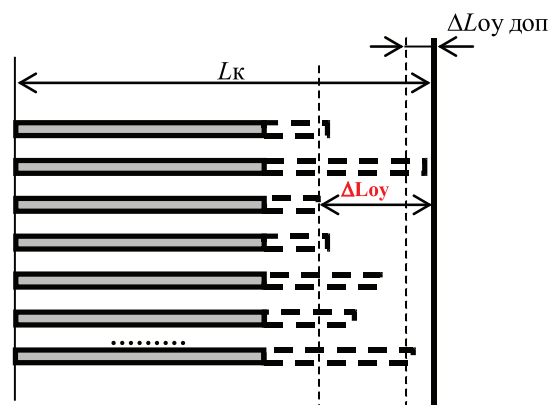


Рис. 4. Условие завершения процесса разработки закона управления электроприводом

Таким образом, на каждой последующей итерации подбираются параметры корректирующих управляющих импульсов, исходя из фактического приращения АЭ на предыдущей итерации.

Вычислительный эксперимент

С целью исследования методики синтеза эмпирических законов управления проводился вычислительный эксперимент. Для его реализации разработан программный модуль в среде графического программирования LabVIEW.

Для ввода данных в программу используется кластерный элемент управления. Задаются значения следующих параметров: количество значений аргумента (амплитуда управляющего сигнала), по которым будет рассчитываться функциональные зависимости; минимальная и максимальная амплитуды управляющего сигнала; теоретически минимальные и максимальные возможные приращения длины АЭ; параметр экспоненты в функциональной зависимости приращения АЭ от амплитуды управляющего сигнала; заданная величина приращения длины АЭ; количество экспериментов, проведенных при одном определенном значении амплитуды управляющего сигнала, определенной на основе теоретической модели для достижения заданной величины приращения длины АЭ; максимально допустимая реальная величина приращения длины АЭ.

В программе используется полученная на основе математического моделирования теоретическая функция величины приращения длины АЭ:

$$dL(I) = dL_{\min} + dL_{\max} \left(1 - e^{-\frac{I - I_{\min}}{p}} \right),$$

где dL_{\min} – минимально возможное приращение длины активного элемента после управляющего воздействия импульсом с минимальной пороговой амплитудой I_{\min} ; dL_{\max} – максимально возможное приращение длины активного элемента; I – амплитуда управляющего импульса; p – параметр показателя экспоненты.

На рис. 6 показаны графики теоретической и действительной зависимости величины приращения длины АЭ от амплитуды управляющего сигнала. На рисунке: 1 – теоретическая зависимость величины приращения длины АЭ от амплитуды

управляющего сигнала; 2 – действительная зависимость величины приращения длины АЭ от амплитуды управляющего сигнала; 3 и 4 – диапазон изменения приращения длины АЭ в зависимости от амплитуды управляющего сигнала.

Точка 5 (рис. 5) соответствует заданному значению приращения длины АЭ и, соответственно, определенному исходя из теоретических представлений, необходимой амплитуде управляющего сигнала. Точка 6 соответствует действительному значению приращения длины АЭ после управляющего воздействия импульсом с амплитудой, определенной исходя из теоретических представлений.

Действительная зависимость величины приращения длины АЭ от амплитуды управляющего сигнала и диапазон ее варьирования, отображаемые на графике на рис. 6, формируются в результате обработки данных большого комплекса экспериментов.

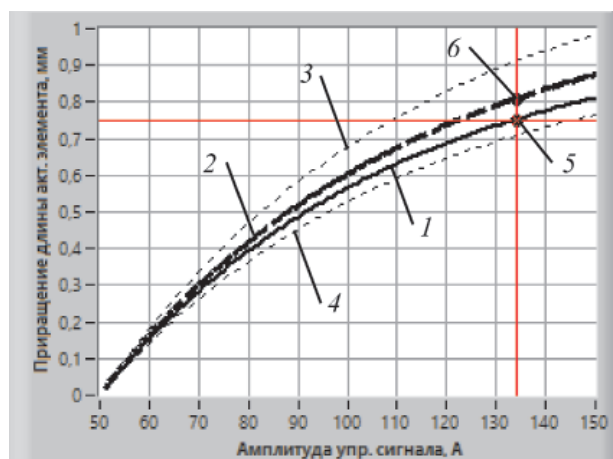


Рис. 5. Графики теоретической и действительной зависимости величины приращения длины АЭ от амплитуды управляющего сигнала

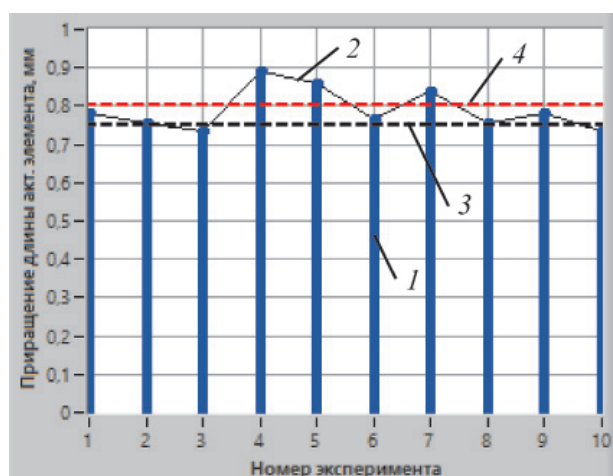


Рис. 6. График множества экспериментально полученных значений приращений длины АЭ после управляющего воздействия с определенной амплитудой

График на рис. 6 содержит следующие элементы: 1 – множество экспериментально полученных значений приращений длины АЭ после управляющего воздействия; 2 – соединительная линия для отображаемых экспериментальных значений приращений длины активного элемента; 3 – заданное значение приращения длины активного элемента после управляющего воздействия; 4 – максимально допустимое приращение длины активного элемента после управляющего воздействия.

Экспериментальный график на рис. 6 соответствует теоретическому, приведенному на рис. 3. Таким образом, разработанный программный модуль является инструментом, обеспечивающим выполнение первого, второго и третьего этапов синтеза эмпирических законов управления электроприводом на основе ФМПФ, описанных выше. Используя графический элемент, показанный на рис. 6, в соответствии с третьим этапом, необходимо скорректировать амплитуду управляющего сигнала таким образом, чтобы избежать ситуации превышения максимально допустимого приращения АЭ.

Анализ полученных результатов показывает, что применение методики синтеза эмпирических законов управления позволяет обеспечить деформацию АЭ электропривода на заданную величину с ошибкой управления $\varepsilon \leq 0,5$ мкм.

Выводы

1. Описанный в статье подход, основанный на натурно-модельном принципе управления, когда теоретически полученные математические модели управляемых объектов настраиваются по результатам экспериментальных исследований, позволяет повысить точность управления короткоходными линейными электроприводами на основе ФМПФ.

2. Синтез эмпирических законов управления электроприводами на основе ФМПФ связан с разработкой методик накопления, упорядочивания и систематизации экспериментальных данных, а также с разработкой инструментария, реализующего эти методики в виде компьютерной программы обработки данных. На выходе этой программы будут синтезироваться законы управления электроприводами на основе ФМПФ.

Результаты работы получены при поддержке гранта РФФИ № 14-08-01288 «Разработка теории натурно-модельных испытаний измерительных и исполнительных систем, построенных на основе ферромагнитных материалов с эффектом памяти формы».

Список литературы

1. Васильев А. Н., Бучельников В.Д., Такаги Т., Ховайло В.В., Эстрин Э.И. Ферромагнетики с памятью формы // Успехи физических наук. – 2003. – Т. 173. – № 6. – С. 577–608.
2. Гречихин В.В., Лозин О.И., Кудря А.В., Кудря Н.А., Шайхутдинов Д.В., Январев С.Г. Математическое моделирование деформации активного элемента исполнительной системы на основе материала с памятью формы // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11. – ч. 4. – С. 744–748.
3. Гречихин В.В., Кудря А.В., Кудря Н.А. Оценка влияния вихревых токов на быстродействие актуаторов на основе материала с памятью формы // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2014. – № 6. – С. 33–35.
4. Гречихин В.В., Январев С.Г., Лозин О.И., Шайхутдинов Д.В. Методика метрологической оценки степени достоверности результатов натурно-модельных испытаний исполнительных систем на основе материалов с памятью формы // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5.
5. Гречихин В.В., Кудря А.В., Кудря Н.А. Определение параметров магнитной системы исполнительного устройства на основе материала с памятью формы // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5.
6. Asua E., Feuchtwanger J., Garcia-Arribas A., Etxebarria V., Orue I., Barandiaran J.M. Ferromagnetic shape memory alloy actuator for micro- and nanopositioning // Sensor Letters. – 2009. – № 7. – P. 348–350.
7. Gorbatenko N.I., Grechikhin V.V., Shaikhutdinov D.V. Measuring and Actuating Devices Based on Shape Memory Ferromagnets. Metal Science and Heat Treatment. – 2015. – Vol. 56. – P. 609–613.
8. Suorsa I., Pagounis E., Ullakko K. Magnetic shape memory actuator performance // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2004. – Vol. 272. – P. 2029–2030.

References

1. Vasilev A.N., Buchelnikov V.D., Takagi T., Khovailo V.V., Estrin E.I. Shape memory ferromagnets. *PHYS-USP*, 2003, vol. 46, no. 6, pp. 559–588.
2. Grechikhin V.V., Lozin O.I., Kudrya A.V., Kudrya N.A., Shaikhutdinov D.V., Yanvarev S.G. Mathematical modeling of strain of active element magnetic shape memory actuators. *Fundamental research*, 2014, no. 11, vol. 4, pp. 744–748.
3. Grechikhin V.V., Kudrya A.V., Kudrya N.A. Assessment of influence of vortex currents on speed of actuators on the basis of material with shape memory. *University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series*, 2014, no. 6, pp. 33–35.
4. Grechikhin V.V., Lozin O.I., Shaikhutdinov D.V., Yanvarev S.G. Procedure of the metrological assessment of degree of authenticity of results of full-scale modeling tests of magnetic shape memory actuators. *Modern problems of science and education*, 2014, no. 5.
5. Grechikhin V.V., Kudrya A.V., Kudrya N.A. Determination parameters of magnetic system of the actuator basis on shape memory material. *Modern problems of science and education*, 2014, no. 5.
6. Asua E., Feuchtwanger J., Garcia-Arribas A., Etxebarria V., Orue I., Barandiaran J.M. Ferromagnetic shape memory alloy actuator for micro- and nanopositioning. *Sensor Letters*, 2009, no. 7, pp. 348–350.
7. Gorbatenko N.I., Grechikhin V.V., Shaikhutdinov D.V. Measuring and Actuating Devices Based on Shape Memory Ferromagnets. *Metal Science and Heat Treatment*, 2015, Vol. 56, pp. 609–613.
8. Suorsa I., Pagounis E., Ullakko K. Magnetic shape memory actuator performance. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2004, Vol. 272, pp. 2029–2030.