

УДК 62-50

UDC 62-50

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА САУ С НЕЛИНЕЙНЫМ АППРОКСИМИРУЮЩИМ ЗАКОНОМ УПРАВЛЕНИЯ**ANALYSIS OF QUALITY INDICATORS OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS WITH NONLINEAR APPROXIMATION CONTROL LAW**

Лубенцова Елена Валерьевна
к.т.н., доцент кафедры автоматизации
производственных процессов

Lubentsova Elena Valeryevna
Cand.Tech.Sci., associate Professor of the
Department of «Automation of production processes»

Пиотровский Дмитрий Леонидович
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой
автоматизации производственных процессов
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
технологический университет», Краснодар, Россия

Piotrovsky Dmitry Leonidovich
Dr.Sci.Tech., Professor, Head of the Department of
«Automation of production processes»
Kuban State Technological University, Krasnodar,
Russia

Масютина Галина Владимировна
к.т.н., доцент кафедры физики, электротехники и
электроэнергетики Института сервиса, туризма и
дизайна (филиал) СКФУ в г. Пятигорске
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный
университет»,
Пятигорск, Россия

Masyutina Galina Vladimirovna
Cand.Tech.Sci., associate Professor of physics,
electrical engineering and electric power industry of
Institute of service, tourism and design (branch) of
NCFU in Pyatigorsk
North-Caucasian Federal University,
Pyatigorsk, Russia

Лубенцов Валерий Федорович
д.т.н., профессор кафедры автоматизации
производственных процессов
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
технологический университет», Краснодар, Россия

Lubentsov Valeriy Fedorovich
Dr.Sci.Tech., Professor of the Department of
«Automation of production processes»
Kuban State Technological University, Krasnodar,
Russia

Предметом исследований данной работы являлось исследование качества процессов регулирования в нелинейной САУ с аппроксимирующим законом управления. В известных опубликованных работах отсутствуют результаты подобных исследований, что затрудняет синтез нелинейной системы управления многорежимными объектами в прикладной биотехнологии, в том числе технологическими объектами АПК. Проведен сравнительный анализ показателей качества регулирования в переходном и установившемся режимах. Показано, что используемый метод аппроксимации для синтеза нелинейного закона управления обеспечивает линейные зависимости в установившихся и близких к ним режимах в сочетании с релейными в переходных режимах, что является положительным фактором улучшения качества регулирования в многорежимных системах управления. При этом не требуется определения моментов переключения зависимостей в законе управления при смене режимов

The subject of research of this work was the study of the quality of control processes in a nonlinear automatic control system with an approximating the control law. In the known published works there are no results of such studies, which makes it difficult to synthesis a nonlinear control system for multimode objects in applied biotechnology, including technological objects of the agro-industrial complex. A comparative analysis of the quality of regulation in the transient and steady-state regimes is carried out. It is shown that the approximation method used for the synthesis of the nonlinear control law provides a linear dependencies in steady-state and close to them modes in combination with relay modes in transient regimes, which is a positive factor for improving the quality of regulation in multimode control systems. It does not necessary to determine the moments of switching the dependencies in the control law when changing modes

Ключевые слова: АППРОКСИМАЦИЯ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ, ЗАКОН УПРАВЛЕНИЯ, ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА, ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ, ПРОЦЕСС ФЕРМЕНТАЦИИ

Keywords: APPROXIMATION OF NONLINEARITIES, CONTROL LAW, QUALITY INDICATORS, OBJECT OF CONTROL, PROCESS OF FERMENTATION

Doi: 10.21515/1990-4665-129-087

Анализ показателей качества САУ с нелинейным аппроксимирующим законом управления

Повышение эффективности управления объектами в переходных и установившихся режимах является актуальной проблемой, стоящей перед проектировщиками систем автоматического управления (САУ) в различных областях техники и технологии. Это в полной мере относится к таким областям, как биотехнология и АПК, где производства получаемой биологической продукции, удобрений и других химических препаратов выдвигают необходимость разработки новой методологии применения нелинейного управления технологическими объектами в условиях многорежимности их функционирования.

В работе [2], отмечено, что «... с некоторого уровня сложности задачи «хороший» регулятор обязательно будет нелинейным». Однако, используемые в ряде работ на практике нелинейные законы управления являются разрывными, т.е. находятся на ограничениях. В связи с этим замкнутые системы являются неустойчивыми в малом. Кроме того, физические величины и исполнительные устройства не могут изменяться с бесконечной скоростью при управлении биотехнологическими объектами (БТО).

Одним из альтернативных методов построения нелинейных систем с релейными (разрывными) управлениями объектами является использование метода аппроксимирующего управления [3, 4, 5]. Существуют различные способы аппроксимации [1, 6], а также известны результаты использования аппроксимации релейных функций на основе гиперболического и сигмоидального тангенса, применяемого в нейронных сетях [7], или нелинейной дробно-радикальной функции, предложенной профессором Р.А. Нейдорфом [8]. Однако аппроксимация релейных управлений, например, функциями гиперболического тангенса, как <http://ej.kubagro.ru/2017/05/pdf/87.pdf>

предложено в работе [7], дает значительную колебательность замкнутой системы в области малых отклонений. Подобные варианты аппроксимаций не рассматривались в целях применения их в задачах управления многорежимными объектами. При решении задачи синтеза нелинейных САУ, не всегда целесообразно использовать кусочно-линейную аппроксимацию [9]. Окончательный выбор аппроксимирующей функции зависит от решаемой задачи и может быть осуществлен на основе анализа показателей качества переходных процессов в системе управления объектом.

Показатели качества переходных процессов, с одной стороны, зависят от параметров принятой аппроксимирующей функции, а с другой стороны, сложность синтеза системы с использованием аппроксимирующей функции непосредственно зависит от вида аналитической функции, аппроксимирующей характеристику одного либо нескольких нелинейных элементов закона управления. Решение задачи синтеза САУ, содержащих различного типа нелинейные элементы, на основе метода аппроксимирующих преобразований является универсальным в том смысле, что не ограничивает семейство нелинейных характеристик лишь сигмоидными или теми характеристиками нелинейных элементов, которые допускают аппроксимацию двойной логистической (сигмоидальной) кривой, имеющих гладкие нелинейные характеристики. Это безусловно является весьма ценным, поскольку универсального способа аппроксимации нелинейных характеристик реальных элементов систем управления не существует.

В данной работе проводится анализ параметров нелинейного закона управления, полученного аппроксимацией релейного элемента с зоной нечувствительности (ЗН) и с ограничением непрерывной нелинейной сигмоидной функцией следующего вида [10]:

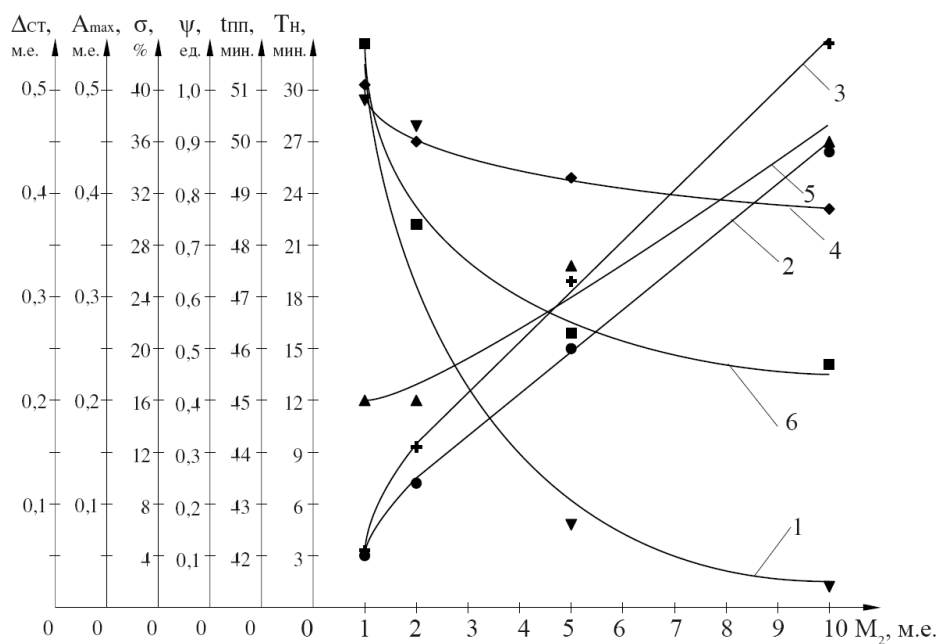
$$U(\varepsilon) = \left[\frac{M_1}{1 + \exp(-\lambda \cdot \varepsilon)} - \frac{M_1}{1 + \exp(\lambda \cdot \varepsilon)} \right] + \left[\frac{M_2}{1 + \exp[-\lambda \cdot (\varepsilon - a)]} - \frac{M_2}{1 + \exp[\lambda \cdot (\varepsilon + a)]} \right], \quad (1)$$

где $U(\varepsilon)$ – регулирующее воздействие; M_1, M_2 – величина регулирующего воздействия в ЗН и за ее пределами соответственно; ε – ошибка регулирования; λ – параметр наклона аппроксимирующей функции; $2a$ – величина ЗН.

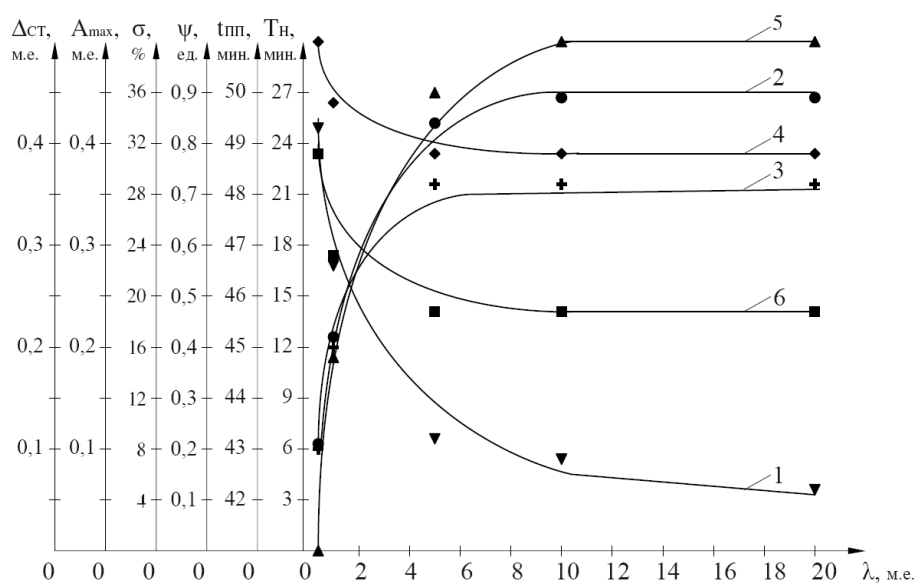
Можно отметить, что преимущество данного способа аппроксимации нелинейностей для САУ многорежимными объектами исключает необходимость определения точек переключения нелинейных характеристик при работе алгоритма управления с несколькими участками аппроксимации нелинейностей.

Учитывая неоднозначность влияния настроечных коэффициентов аппроксимирующей нелинейной функции АНФ-регулятора на показатели качества переходных процессов в САУ, в данной работе исследовано влияние параметров закона управления (1) на показатели качества переходных процессов в системе управления многорежимными промышленными биотехнологическими объектами (БТО). Поскольку характер переходного процесса в условиях неопределенности и нестационарности параметров БТО может меняться от апериодического до колебательного, проведена оценка показателей качества переходных процессов при различных значениях M_1, M_2 и λ , полученных в системе регулирования температуры в ферментаторе периодического действия на участке режима охлаждения среды в ферментаторе с моделью объекта, характеризующегося отсутствием самовыравнивания, в виде уравнения $4d^2y(t)/dt^2 + dy(t)/dt = 0,05U(t-6)$ (кривая $X_1(t)$) и для режима с тепловыделением с моделью объекта в виде уравнения $73,08 d^2x(t)/dt^2 + 14,35 dx(t)/dt + x(t) = 0,383U(t-6)$ (кривая $X_2(t)$). На основе

полученных переходных процессов получены зависимости для показателей качества, представленные на рисунке 1.



а)



б)

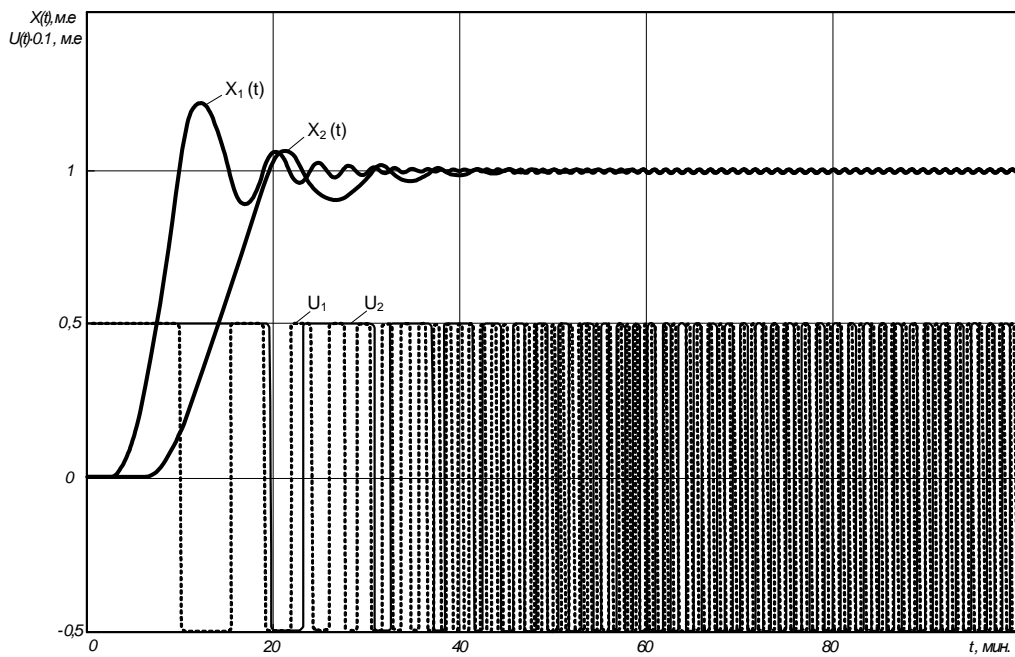
Рисунок 1 – Зависимости показателей качества переходных процессов в системе с АНФ регулятором при $\lambda = 50$ и различных значениях M_1 и M_2 (а) и при $M_1 = 5, M_2 := 10$ и различных значениях λ (б):

1 – время нарастания (T_n); 2 – максимальное динамическое отклонение (A_{max}); 3 – перерегулирование (σ); 4 – степень затухания (ψ); 5 – время переходного процесса ($t_{пп}$); 6 – статическая ошибка (Δ)

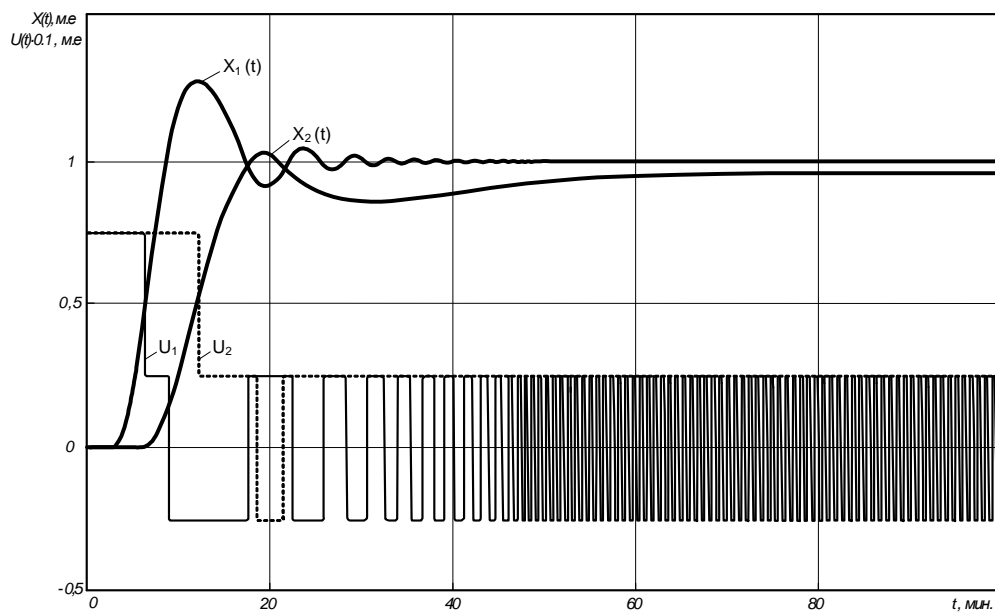
Из полученных результатов следует, что установить однозначную зависимость между настроечными параметрами λ , M_1 и M_2 и показателями качества переходных процессов затруднительно. В то же время при попарном сравнении показателей качества можно указать рациональные значения λ , M_1 и M_2 , обеспечивающие одновременное улучшение показателей качества переходных процессов. Так, например, при $\lambda = 1,0$ время нарастания переходного процесса равно 17,2 мин, что незначительно, всего в 1,2 раза превышает минимальное, а перерегулирование равно 16 %, что в 1,8 раза меньше полученного максимального и не превышает 18-25 %-ного перерегулирования, часто рекомендуемого для промышленных систем.

Если же не ограничиваться только апериодическими переходными процессами, а считать приемлемыми и колебательные переходные процессы, протекающие в некоторой области, ограниченной допустимыми показателями качества, то в этом случае имеется некоторый рациональный диапазон возможных значений M_1 и M_2 . В частности, анализ показателей качества переходных процессов, полученных при постоянном значении λ и вариации значений M_1 и M_2 , показал, что снизить автоколебания в установившемся режиме при квазирелейном управлении и при аппроксимирующем управлении можно за счет уменьшения M_1 . Переходные процессы в системе управления с двумя релейными элементами при равных значениях $M_1 = M_2 = M$ представлены на рисунке 2. Для уменьшения амплитуды автоколебаний в установившемся режиме значение M_1 уменьшено в 2 раза. Переходные процессы в системе управления с двумя релейными характеристиками представлены на рисунке 2,б. Как видно из полученных кривых переходного процесса, автоколебания для астатической системы сохраняются, а в статической системе имеет место остаточное отклонение. При этом сохраняется

разрывной характер управляющего воздействия на объект для обеих систем.



а)

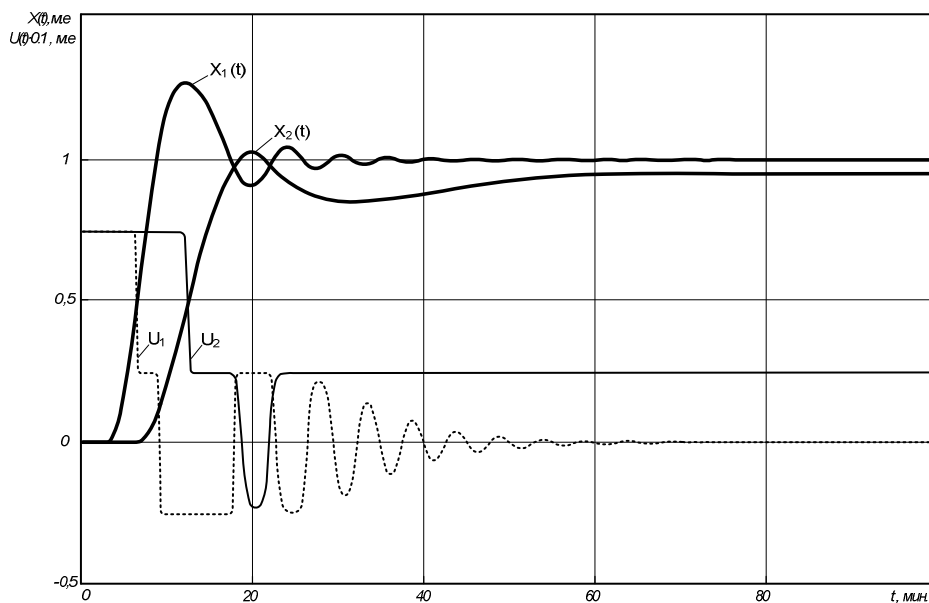


б)

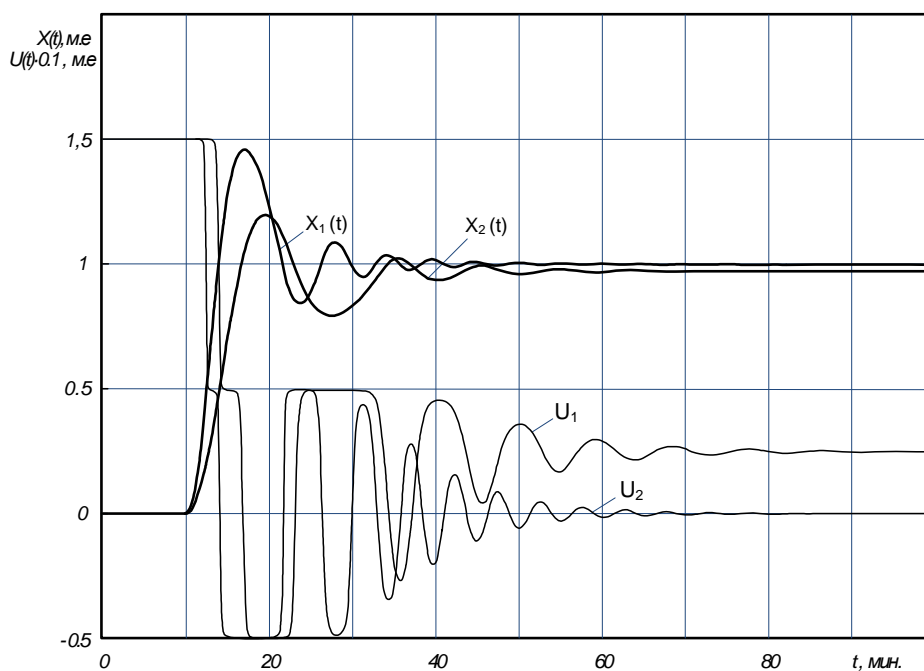
Рисунок 2 – Переходные процессы в астатической ($X_1(t)$) и статической ($X_2(t)$) системе с релейным управлением при значениях $M_1 = M_2 = 5,0$ (а) и при значениях $M_1 = 2,5; M_2 = 5,0$

Для уменьшения автоколебаний и плавного управления воспользуемся аппроксимирующей зависимостью управления (1). На рисунке 3,а приведены переходные процессы в нелинейной системе при значениях параметров $M_1 = 2,5$; $M_2 = 5,0$. Как видно, колебательность в переходном процессе $X_1(t)$ уменьшилась, переходный процесс $X_2(t)$ приближен к апериодическому, характер управляющего воздействия – плавный и характеризуется колебательностью с сохранением статической ошибки. Увеличение значения M в 2 раза, как видно из рисунка 3,б, обеспечивает незначительное уменьшение статической ошибки, увеличивая колебательность регулируемой переменной и управляющего сигнала. Переходный процесс колебательный и характеризуется выходом управляющего воздействия на предельные значения только в начале переходного процесса.

Результаты исследования зависимостей показателей качества переходных процессов от параметров λ и M АНФ-регулятора позволяют обосновать их коррекцию для разных режимов объекта. Так, например изменение угла наклона λ линейной части линии управления определяет близость к релейной характеристике, характер аппроксимации в зоне нечувствительности и влияет на помехозащищенность системы. Значение параметра M определяет скорость выхода на режим, точность и колебания в установившемся режиме. Поскольку сочетание преимуществ колебательного переходного процесса, обеспечивающего первоначальный быстрый выход в установившийся режим, с плавностью перехода к установившемуся режиму, свойственное апериодическому процессу, необходимо для качественного управления многорежимным БТО, то в качестве корректируемых параметров АНФ-регулятора следует выбирать параметры λ при M_1 и $M_2 = const$ либо M_1 и M_2 при $\lambda = const$ в зависимости от режима функционирования системы и характера внешних возмущений (помех).



а)



б)

Рисунок 3 – Переходные процессы в астатической ($X_1(t)$) и статической ($X_2(t)$) системе с АНФ-регулятором при значениях $M_1 = 0,5M$; $M_2 = M$; $M = 5$; $\lambda=50$; $a=0,5$ (а) и значениях $M_1 = 0,5M$; $M_2 = M$; $M = 10$; $\lambda=50$; $a=0,5$

Полученные в работе результаты подтверждают, что предлагаемый метод аппроксимирующих преобразований на основе комбинации сигмоидных функций, обеспечивающих гладкие нелинейные характеристики, целесообразно использовать при синтезе нелинейных

законов управления, аппроксимирующих релейные с зоной и без зоны нечувствительности, многопозиционные, с насыщением и без насыщения. Синтез параметров закона управления для нелинейных САУ при различных видах аппроксимации характеристик позволяет на практике учесть особенности решаемой задачи регулирования и управления: режимы стабилизации и переходные. Использование различных видов нелинейностей при аппроксимации обеспечивает линейные зависимости в установившихся и близких к ним режимах и в сочетании с релейными в переходных режимах является положительным фактором улучшения качества регулирования в многорежимных системах управления. Анализ показателей качества управления при вариации параметров закона управления является важным этапом при выборе аппроксимирующей функции для синтеза нелинейного управления и улучшения качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аппроксимация нелинейных характеристик. - [Электронный ресурс]. Адрес доступа:

http://studopedia.ru/13_138166_aproksimatsiya-nelineynih-harakteristik.html

2. Емельянов, С.В. Новые типы обратной связи: управление при неопределенности / С.В. Емельянов, С.К. Коровин // М.: Наука. Физматлит, 1997. – 352 с.

3. Лубенцова, Е.В. Метод аппроксимирующих преобразований в решении задач управления и моделирования биосистем / Лубенцова Е.В., А.А. Володин // Информационные системы и технологии. – 2013. – № 4 (78). – С. 26-35.

4. Лубенцова, Е.В. Синтез систем автоматического управления биотехнологическими процессами с применением методов аппроксимирующего и нейро-нечеткого управления: монография / Е.В. Лубенцова, А.А. Володин. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2014. – 160 с.

5. Лубенцова, Е.В. Метод синтеза нелинейных систем с аппроксимирующими законами управления / Е.В. Лубенцова, В.Ф. Лубенцов // Вестник СКФУ. Ставрополь: Изд-во СКФУ. – 2015. – № 6 (51). – С.14-21.

6. Медведев, М.Ю. Аналитический синтез управлений нелинейными многосвязными объектами в условиях неопределенности / М.Ю. Медведев // Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – 402 с.

7. Медведев, М. Ю. Управление нелинейными многосвязными объектами в условиях неопределенности: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Михаил Юрьевич Медведев. – Таганрог, 2010. – 32 с.

8. Нейдорф, Р.А. Нелинейная организация асимптотически устойчивых квазиоптимальных по быстрдействию движений / Р.А. Нейдорф // Сб.

докл. Всерос. науч. конф. 3-4 апр. 2003 г. «Управление и информационные технологии». СПб., 2003. Т.1. – С.189-194.

9. Шишляков, В. Ф. Синтез параметров закона управления для нелинейных САУ при различных видах аппроксимации характеристик / В. Ф. Шишляков, Е. В. Анисимова, А. В. Шишляков, Д. В. Шишляков // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 9. – С. 701—706.

10. Шимигон, А.С. Регулятор с зоной нечувствительности на основе аппроксимирующих функций / А.С. Шимигон, Е.В. Лубенцова // Информационные технологии, системный анализ и управление – ИТСАиУ-2012. Сб. трудов X Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Т.2. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2012. – С. 233-237.

Reference

1. Approksimacija nelinejnih karakteristik (jelektronnyj resurs)
http://studopedia.ru/13_138166_approksimatsiya-nelineynih-harakteristik.html
2. Emel'janov S.V. Novye tipy obratnoj svjazi: upravlenie pri neopredelennosti / S.V. Emel'janov, S.K. Korovin // М.: Nauka. Fizmatlit, 1997. – 352 s.
3. Lubencova E.V. Metod approksimirujushhij preobrazovanij v reshenii zadach upravlenija i modelirovanija biosistem / Lubencova E.V., A.A. Volodin // Informacionnye sistemy i tehnologii. – 2013. – № 4 (78). – S. 26-35.
4. Lubencova, E.V. Sintez sistem avtomaticheskogo upravlenija biotehnologicheskimi processami s primeneniem metodov approksimirujushhego i nejro-nechetkogo upravlenija: monografija / E.V. Lubencova, A.A. Volodin. – Stavropol': Izd-vo SKFU, 2014. – 160 s.
5. Lubencova, E.V. Metod sinteza nelinejnih sistem s approksimirujushhimi zakonami upravlenija / E.V. Lubencova, V.F. Lubencov // Vestnik SKFU. Stavropol': Izd-vo SKFU. – 2015. – № 6 (51). – S.14-21.
6. Medvedev, M.Ju. Analiticheskij sintez upravlenij nelinejnymi mnogosvjaznymi ob#ektami v uslovijah neopredelennosti / M.Ju. Medvedev // Taganrog: Izd-vo TTI JuFU, 2010. – 402 s.
7. Medvedev, M. Ju. Upravlenie nelinejnymi mnogosvjaznymi ob#ektami v uslovijah neopredelennosti: avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk / Mihail Jur'evich Medvedev. – Taganrog, 2010. – 32 s.
8. Nejdorf R.A. Nelinejnaja organizacija asimptoticheski ustojchivyh kvazioptimal'nyh po bystrodejstvu dvizhenij / R.A. Nejdorf // Sb. dokl. Vseros. nauch. konf. 3-4 apr. 2003 g. «Upravlenie i informacionnye tehnologii». SPb., 2003. Т.1. – С.189-194.
9. Shishlakov V. F. Sintez parametrov zakona upravlenija dlja nelinejnih SAU pri razlicnyh vidah approksimacii karakteristik / V. F. Shishlakov, E. V. Anisimova, A. V. Shishlakov, D. V. Shishlakov // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2015. Т. 58, № 9. – С. 701—706.
10. Shimigon, A.S. Reguljator s zonoj nechuvstvitel'nosti na osnove approksimirujushhij funkcij / A.S. Shimigon, E.V. Lubencova // Informacionnye tehnologii, sistemnyj analiz i upravlenie – ИТСАиУ-2012. Сб. трудов H Vserossijskoj nauchnoj konferencii molodyh uchenyh, aspirantov i studentov. Т.2. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2012. – С. 233-237.