

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 681.5.01:658.512

Лубенцова Елена Валерьевна, Лубенцов Валерий Федорович**МЕТОД СИНТЕЗА НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ
С АППРОКСИМИРУЮЩИМИ ЗАКОНАМИ УПРАВЛЕНИЯ**

В работе рассмотрены особенности синтеза нелинейных систем, в которых управления формируются на основе аппроксимирующих функций состояния. Проанализировано современное состояние теории и приложений метода аппроксимирующего управления объектами энергетики и технологическими объектами. Отмечено, что использование кусочно-линейных функций для аппроксимации нелинейностей имеет ряд недостатков. Главный заключается в том, что заранее неизвестно сочетание линейных участков, соответствующее заданному входному сигналу (напряжению, току и др.). Другим недостатком кусочно-линейной аппроксимации является то, что производные на границах участков имеют разрывы, что нежелательно при управлении электромеханическими системами. Показано, что широкие возможности, которые появляются в системах с аппроксимирующими управлениями на основе сигмоидных функций, обусловлены отсутствием разрывных функций и скользящих режимов. Синтез систем управления на основе аппроксимации нелинейных звеньев сигмоидными функциями исключает работу систем с предельными значениями управляющих воздействий, снижает нагрузки на исполнительные устройства системы и обеспечивает плавную их работу. В подтверждение этому приводятся результаты сравнительного анализа работы систем с релейным и аппроксимирующим управлениями.

Ключевые слова: нелинейная система, аппроксимирующая функция управления, релейное управление, аппроксимация нелинейных звеньев.

**Elena Lubentsova, Valery Lubentsov
METHOD OF SYNTHESIS OF NONLINEAR SYSTEMS
WITH THE APPROXIMATED CONTROL LAWS**

The article describes the features of synthesis of nonlinear systems in which controls are formed on the basis of approximating functions of state. The current state of the theory and applications of the method of approximating the control by energy facilities and technological objects. It is noted that the use of piecewise linear functions to approximate the nonlinearities has several disadvantages. The main is that unknown combination of linear sections corresponding to the given input signal (voltage, current, etc.). Another disadvantage of the piecewise linear approximation is that the derivatives on the boundaries of parcels have discontinuities, which is undesirable for control of electromechanical systems. It is shown that the wide possibilities that arise in systems with control based on approximating the sigmoid function, due to the lack of discontinuous functions and sliding modes. The synthesis of control systems based on approximation of nonlinear functions by sigmoid function excludes systems with extreme values of control actions, reduces the load on the actuators system and ensures smooth their job. In support of this the results of comparative analysis of the systems with relay and approximating controls.

Key words: nonlinear system, approximating function control, relay control, approximation of nonlinear functions.

В настоящее время одним из важных направлений в технике и технологии является поиск путей, позволяющих с необходимой точностью описывать и учитывать при моделировании и в управляющих алгоритмах процессы, вызванные наличием нелинейных элементов. Ввиду отсутствия простого и эффективного метода синтеза систем с нелинейными характеристиками без существенных потерь информации, актуальным является создание теоретической и математической базы для описания и анализа энергетических процессов электромеханических систем, которая позволит получить необходимую

точность оценки особенностей физических процессов в нелинейных цепях. Необходимость получения достоверных данных о нелинейностях вызвана, во-первых, тем, что нелинейности характерны для конструктивных частей электрических машин, звеньев преобразования энергии, кинематических цепей и т. д., во-вторых, в ходе преобразования энергии нелинейности являются причиной нелинейных искажений параметров, которые определяют долговечность и работоспособность электромеханического и механического оборудования (напряжения и тока в сети, момента двигателя, и т. п.) [1].

Требования повысить быстродействие систем управления в переходных режимах и качество (точность, помехозащищенность, инвариантность к возмущениям) в установившихся режимах приводят, как правило, к увеличению коэффициентов обратных связей. Однако из-за существующих в реальных системах ограничений управляющие воздействия при этом принимают предельные значения. Наличие инерционности, запаздывания, зоны нечувствительности и других нелинейностей приводят при этом к возникновению недопустимых колебаний в системе. Одним из альтернативных методов построения нелинейных систем с предельными (разрывными) управлениями объектами является использование метода аппроксимирующего управления [2]. Проанализируем современное состояние теории и приложений метода аппроксимирующего управления объектами энергетики и технологическими объектами. В [3] предлагается аппроксимирующее управление ступенчатого вида, построенное из условия ограниченности природных ресурсов. Опираясь на свойства системы при постоянных управлениях, строится аппроксимирующее решение и сравнивается со стабилизированными траекториями, построенными по алгоритму, описанному в работе [4]. В [5] для линейных систем с ограниченным управлением предложено построение аппроксимирующей конструкции для вычисления и реализации оптимального по быстродействию управления в реальном времени, основанного на разделении вычислительных затрат на предварительные и затраты в процессе управления.

Существует ряд типовых нелинейностей, наиболее часто встречающихся в системах автоматизированного управления объектами энергетики и технологии, например, таких как зона нечувствительности, релейная с зоной нечувствительности и ограничением и т. д. Описание комбинации таких нелинейностей имеет ряд сложностей. Во-первых, эти нелинейности часто представлены в виде кусочно-линейных функций, для описания которых используют линейную аппроксимацию. Этот подход заключается в том, что при линейной аппроксимации исходная характеристика нелинейного элемента заменяется ломаной линией с конечным числом прямолинейных отрезков и для каждого участка ломаной определяются эквивалентные линейные параметры нелинейного элемента, что, в свою очередь, ведет к потере информации об объекте и не позволяет выполнить целостный анализ особенностей нелинейности. Во-вторых, при наличии в цепи переменного источника энергии рабочая (изображающая) точка будет постоянно скользить по аппроксимирующей характеристике, переходя через точки излома. Переход через такие точки соответствует мгновенному изменению схемы замещения, поэтому задача определения искомой переменной сводится не только к расчету схем замещения, но и к определению моментов переключения между ними, т. е. нахождению граничных условий по времени. Анализ существенно усложняется, если в цепи имеется несколько нелинейных элементов. Главная трудность в этом случае связана с тем, что заранее не известно сочетание линейных участков, соответствующее заданному входному напряжению (току). Еще одним недостатком кусочно-линейной аппроксимации является то, что производные на границах участков имеют разрывы, что недопустимо при численных решениях. Предлагаемый в данной статье метод аппроксимации таких нелинейностей с применением в качестве аппроксимирующих сигмоидных функций исключает указанные недостатки и позволяет обеспечить непрерывность на границах участков исследуемой функции.

При использовании кусочно-линейной аппроксимации САУ в [6] рассматриваются как линейные модели с предысторией, и для получения надежных результатов применяется теория обобщенных функций [7]. Следует отметить нецелесообразность кусочно-линейной аппроксимации, поскольку точный учет характеристик нелинейных звеньев существенно усложняет расчеты и вместе с тем не

приводит к возрастанию точности получаемых результатов. Это обусловлено тем, что применяемый для решения задачи синтеза подход является приближенным. Кроме того, реализовать процедуры определения моментов переключения линейных участков аппроксимируемой нелинейности не всегда возможно с высокой точностью.

В тех случаях, когда рассматривается нелинейная САУ с характеристикой нелинейного элемента, отличной от типовой, в [8] отмечены следующие пути решения задачи синтеза: получение рекуррентных аналитических выражений, определяющих интегралы Галеркина для рассматриваемой характеристики нелинейного элемента или для характеристики произвольного вида, представленной набором произвольного (в общем случае n) числа отрезков прямых на плоскости; применение эквивалентного представления характеристик нелинейных звеньев набором типовых, для которых соответствующие соотношения известны [9].

По вопросу аппроксимации характеристик нелинейных элементов А. А. Фельдбаум [10] делает следующий основной вывод: «универсальной аппроксимации не существует» и вместе с тем к определяющим критериям удачной аппроксимации относят [8]: пригодность во всей исследуемой области изменения переменных; возможность простого исследования уравнения движения системы; относительно простой и пригодный для исследования вид решения.

Достаточно часто качество аппроксимации оценивается по точности воспроизведения реальной от аппроксимируемой характеристики. Однако, как отмечается в [8], при выборе способа аппроксимации характеристики управления соображения точности воспроизведения реальной нелинейной характеристики не являются определяющими. Часто требуется правильное воспроизведение основных физических закономерностей, типично нелинейных свойств элементов. Нелинейные явления сами по себе в достаточной степени сложны и усложнение аппроксимирующих выражений может создать значительные затруднения при исследовании. Поэтому основным критерием достоинства аппроксимации при решении той или иной задачи является достижение достаточно простого по форме и доступного простой реализации результата.

Как известно, с учетом требования максимального быстродействия САУ релейный закон управления в виде [11] $U(t) = U_{\max} \text{sign}[\varepsilon(t)]$ (где $U_{\max}$ – максимальная амплитуда управляющего воздействия, $\varepsilon(t)$ – сигнал рассогласования) следует считать наилучшим. Однако в связи с невысокой помехоустойчивостью этого закона управления использование его не всегда целесообразно. Кроме того, с помощью чисто релейного управления в САУ невозможно устранить известное противоречие между быстродействием и колебательностью, обеспечить возможность независимого выполнения требований по каждому из этих показателей.

Нелинейные элементы образуют в математическом описании системы «разрывы», а предельные релейные воздействия в каналах управления обуславливают динамические нагрузки на элементы системы. При использовании релейного управления могут возникать нежелательные автоколебания. Чтобы избежать этого, функция переключения по возможности должна содержать как можно меньше разрывов, а в лучшем случае вообще должна быть гладкой. Добиться гладкой формы функции переключения классическими методами довольно сложно. Известны результаты использования аппроксимации релейных функций на основе гиперболического и сигмоидального тангенса, применяемого в нейронных сетях [12], или нелинейной дробно-радикальной функции, предложенной Р. А. Нейдорфом [13]. Однако аппроксимация релейных управлений, например, функциями гиперболического тангенса, как предложено в работе [14] дает значительную колебательность замкнутой системы в области малых отклонений.

Автоколебания можно уменьшить (либо вовсе исключить), не снижая быстродействия системы, если обеспечить уменьшение воздействия при малых отклонениях регулируемой величины, т. е. при приближении к состоянию равновесия ($\varepsilon = 0$). Для получения такой характеристики управляющего воздействия воспользуемся методом аппроксимации разрывной функции непрерывной дифференцируемой функцией [15]. Пусть управляющее воздействие выбрано разрывным в виде

$$U = -M \operatorname{sign} \varepsilon, \quad (1)$$

где $M > 0$ – const, максимальная величина управления; $\operatorname{sign} \varepsilon$ – сигнум-функция (функция знака); ε – сигнал рассогласования ($\varepsilon = g - x$) между регулируемой величиной x и заданным воздействием g .

Известно, что сигнум-функцию можно аппроксимировать функцией $f(\varepsilon) = \operatorname{sign} \varepsilon = \varepsilon / |\varepsilon|$, которая определена и непрерывна при всех значениях ε , кроме $\varepsilon = 0$ [16]. Функция $f(\varepsilon)$ позволяет записать разрывное управление (1) в виде $U = -M \varepsilon / |\varepsilon|$. Аппроксимируем разрывную функцию $f(\varepsilon) = \varepsilon / |\varepsilon|$ непрерывной дифференцируемой функцией $f^*(\varepsilon, \delta) = \varepsilon / |\varepsilon + \delta|$ такой, что приращение функции $\Delta f(\varepsilon, \delta) = f^*(\varepsilon, \delta) - f(\varepsilon)$ при $\delta \rightarrow 0$ равно нулю. Нетрудно убедиться, что предел данного выражения существует, т. е.

$$f^*(\varepsilon, \delta) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \Delta f(\varepsilon, \delta) = \lim_{\delta \rightarrow 0} [f^*(\varepsilon, \delta) - f(\varepsilon)] = \lim_{\delta \rightarrow 0} [\varepsilon / |\varepsilon + \delta| - \varepsilon / |\varepsilon|] = 0,$$

где $\delta > 0$ – параметр приближения такой, что

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \varepsilon / |\varepsilon + \delta| = \varepsilon / |\varepsilon| = \operatorname{sign} \varepsilon.$$

При этом непрерывность и дифференцируемость функции $f^*(\varepsilon, \delta)$ обеспечивается введением в выражение вещественного числа δ . Количественная оценка степени ее приближения к аппроксимируемой функции определяется величиной этого же числа. Воспользовавшись аппроксимирующей функцией $f^*(\varepsilon, \delta)$, рассмотрим управление в виде

$$U = -M \varepsilon / |\varepsilon + \delta| = -M \varepsilon / \sqrt{(\varepsilon + \delta)^2} = -M \varepsilon / \sqrt{\varepsilon^2 + 2\varepsilon\delta + \delta^2}. \quad (2)$$

При таком варианте управление остается квазирелейным и при больших рассогласованиях $\varepsilon > \delta$ скорость исполнительного устройства будет максимальна, что обеспечивает быстродействие системы. При малых рассогласованиях ($\varepsilon \rightarrow 0$) максимальное воздействие управления $U_{\max} = M$ оказывается в $\varepsilon / \sqrt{\varepsilon^2 + 2\varepsilon\delta + \delta^2}$ раз меньше M . При этом скорость перемещения регулирующего органа уменьшается, что способствует устранению автоколебаний в системе. В обоих случаях управляющий сигнал, как и обычный релейный сигнал, меняет свой знак с изменением входного сигнала ε . При малых значениях сигнала рассогласования $\varepsilon < |\delta|$ ошибкой $\varepsilon = 2\varepsilon\delta$ в выражении (2) можно пренебречь и использовать для аппроксимации модуля $|\varepsilon|$ непрерывную функцию

$$f^{**}(\varepsilon, \delta) = \sqrt{\varepsilon^2 + \delta^2},$$

рассмотренную в работе [17]. В этом случае возможно аппроксимировать разрывное управление (1) выражением вида

$$U = -M \varepsilon / \sqrt{\varepsilon^2 + \delta^2}. \quad (3)$$

При этом максимальная ошибка приближения соответствует $\varepsilon = 0$ и равна δ для модуля как в (2), так и в (3). Незначительно снизив быстродействие системы вследствие реализации аналитической функции, аппроксимирующей операцию взятия модуля, в [17] решена задача квазиоптимального по быстродействию управления.

С учетом многообразия нелинейных элементов, реализуемых в составе САУ, нами предложены варианты аппроксимации наиболее распространенных нелинейных элементов и их соединений сигмоидными функциями. Такая аппроксимация является наиболее простой для задач управления по сравнению с известными аппроксимациями и обладает наибольшей степенью универсальности. Приведенные ниже примеры подтверждают, что предлагаемый метод аппроксимирующих преобразований на основе сигмоидных функций позволяет, в отличие от традиционных способов, описывать характеристики известных нелинейных элементов и их комбинаций, часто используемых в линейных САУ: релейные с зоной и без зоны нечувствительности, позиционные и многопозиционные, с насыщением и без насыщения, используемые на практике с учетом особенностей решаемой задачи регулирования и управления.

Рассмотрим пример построения системы с аппроксимирующим управлением вида:

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

где M_1, M_2 – величина регулирующего воздействия в зоне нечувствительности (ЗН) и за ее пределами соответственно; ε – ошибка регулирования; λ – параметр настройки; $2a$ – величина зоны ЗН.

Переходные процессы в системе регулирования были получены для статического объекта с моделью в виде уравнения $73,08d^2x(t)/dt^2 + 14,35dx(t)/dt + x(t) = 0,383U(t-6)$ и с моделью астатического объекта с уравнением вида $4d^2y(t)/dt^2 + dy(t)/dt = 0,05U(t-6)$. Предварительно были получены переходные процессы в системе с предельными управлениями с двумя релейными элементами при равных значениях $M_1 = M_2 = M$, представленные на рис. 1.

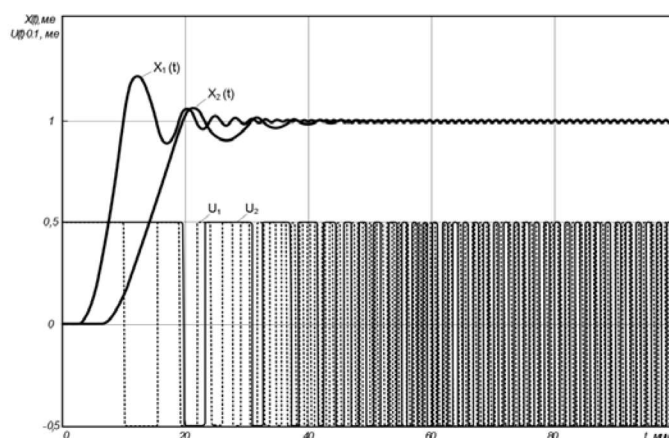


Рис. 1. Переходные процессы в астатической ($X_1(t)$) и статической ($X_2(t)$) системе с релейным управлением при значении $M_1 = M_2 = M = 5,0$

Для уменьшения амплитуды автоколебаний в установившемся режиме значение M_1 уменьшено в 2 раза. Переходные процессы в этой системе управления с двумя релейными характеристиками представлены на рис. 2.

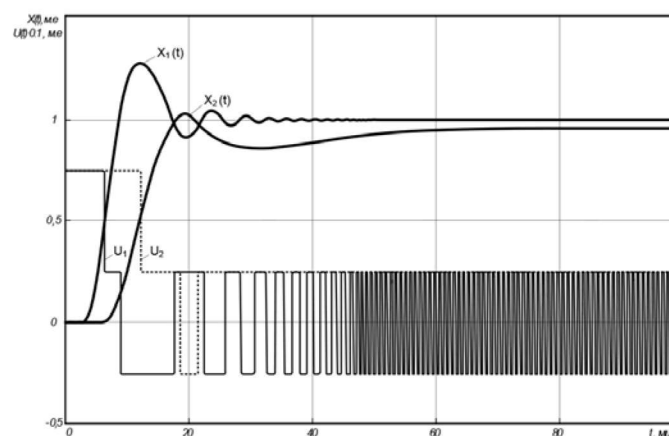


Рис. 2. Переходные процессы в астатической ($X_1(t)$) и статической ($X_2(t)$) системе с релейным управлением при значениях $M_1 = 2,5; M_2 = 5,0$

Как видно из полученных кривых переходного процесса, автоколебания для астатической системы сохраняются, а в статической системе появляется остаточное отклонение. При этом разрывной характер управляющего воздействия на объект для обеих систем сохраняется. На рис. 3 приведены переходные процессы в нелинейной системе при значениях параметров $M1 = 2,5$; $M2 = 5,0$. Как видно, колебательность в переходном процессе $X1(t)$ уменьшилась, переходный процесс $X2(t)$ приближен к апериодическому, характер управляющего воздействия – плавный и характеризуется колебательностью с сохранением статической ошибки.

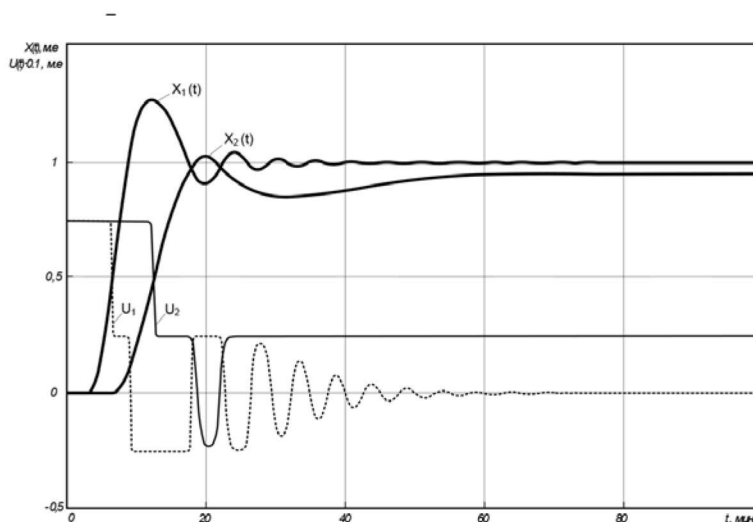


Рис. 3. Переходные процессы в астатической ($X1(t)$) и статической ($X2(t)$) системе с аппроксимирующим управлением при значениях $M1 = 0,5M$; $M2 = M$; $M = 5$; $\lambda = 50$; $a = 0,5$

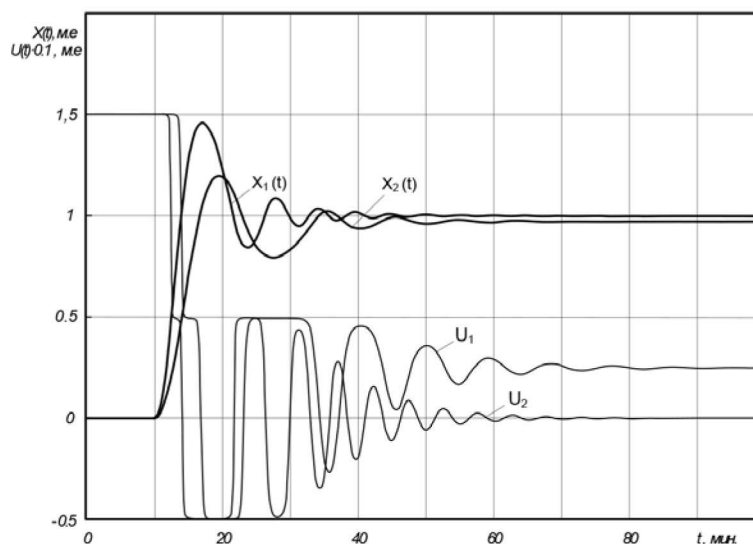


Рис. 4. Переходные процессы в астатической ($X1(t)$) и статической ($X2(t)$) системе с аппроксимирующим управлением при значениях $M1 = 0,5M$; $M2 = M$; $M = 10$; $\lambda = 50$; $a = 0,5$

Увеличение значения M в 2 раза, как видно из рис. 4, 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. При необходимости устранить статическую ошибку, не выходя на предельные значения управляющего воздействия, можно воспользоваться комбинацией аппроксимирующего управления с линейным интегральным законом.

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 объектом, то при необходимости в качестве корректируемых параметров регулятора следует выбирать параметры λ , $M1$ и $M2$ в зависимости от режима функционирования системы и характера внешних возмущений (помех).

Таким образом, используемые на практике нелинейные законы управления в ряде работ являются разрывными, т. е. находятся на ограничениях. В связи с этим замкнутые системы являются неустойчивыми в малом, а физические величины и исполнительные устройства не могут изменяться с бесконечной скоростью при управлении как объектами энергетики, так и технологическими объектами. Указанные факторы приводят к целесообразности аппроксимации характеристики нелинейных элементов в задаче описания и управления непрерывными, основанными на использовании сигмоидных функций и их комбинаций.

Предложенный в статье подход является универсальным и позволяет аппроксимировать нелинейности любого типа независимо от физической природы объекта. Кроме того, для любой заданной функции нелинейности может быть получено аналитическое выражение, удобное для дальнейшего использования, например при синтезе аппроксимирующего управления. Так, для целей автоматизации технологических процессов в энергетике предлагаемый метод синтеза нелинейных систем с аппроксимирующими законами управления может явиться наилучшим решением, так как при его реализации исключается работа системы с предельными значениями управляющих воздействий, снижается нагрузка на исполнительные устройства системы и обеспечивается плавная их работа.

Литература

1. Фираго Б. И. Теория электропривода. Минск: ЗАО «Техноперспектива», 2004. 527 с.
2. Лубенцова Е. В., Володин А. А. Метод аппроксимирующих преобразований в решении задач управления и моделирования биосистем // Информационные системы и технологии. 2013. № 4 (78). С. 26–35.
3. Тарасьев А. М., Усова А. А. Алгоритмы построения оптимальных траекторий по аппроксимирующим управлениям в задачах на бесконечном промежутке времени [Электронный ресурс]. URL: spisok.math.spbu.ru/2013/txt/papers/s9_3.docx (дата обращения: 26.03.2012).
4. Tarasyev A. M., Usova A. A. Stabilizing the Hamiltonian System for Constructing Optimal Trajectories // Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics. 2012. Vol. 277. P. 248–265.
5. Александров В. М. Построение аппроксимирующей конструкции для вычисления и реализации оптимального управления в реальном времени // Сиб. журн. вычисл. матем. 2012. Т. 15. № 1. С. 1–19. [Электронный ресурс]. URL: <http://mi.mathnet.ru/rus/sjvm/v15/i1/p1> (дата обращения: 13.03.2012).
6. Смольников Л. П., Бычков Ю. А. Расчет кусочно-линейных систем. Л.: Энергия, 1972. 161 с.
7. Розенфельд А. С., Яхинсон Б. И. Переходные процессы и обобщенные функции. М.: Наука, 1966. 440 с.
8. Никитин А. В., Шишляков В. Ф. Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления: монография / под ред. В. Ф. Шишлякова; СПбГУАП. СПб., 2003. 358 с.
9. Шишляков В. Ф. Синтез нелинейных САУ с различными видами модуляции: монография. СПб.: СПбГУАП, 1999. 268 с.
10. Фельдбаум А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем. 2-е изд. М.: Наука, 1966. 624 с.
11. Попов Е. П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления. М.: Наука, 1979. 256 с.
12. Медведев М. Ю. Синтез субоптимальных управлений нелинейными многосвязными динамическими системами // Мехатроника, автоматизация и управление. 2009. № 12. С. 2–8.
13. Волков Р. В. Квазиоптимизация быстродействия асимптотически устойчивых систем управления: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 Ростов-н/Д., 2005. 227 с.

14. Медведев М. Ю. Управление нелинейными многосвязными объектами в условиях неопределенности: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.01 / Медведев Михаил Юрьевич; Таганрог. гос. радиотех. ун-т. Таганрог, 2010. 379 с.
15. Лубенцова Е. В. Построение одного класса систем с разрывным управлением // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-14: сб. трудов Международ. научной конференции: в 6 т. Т. 2. Секции 2; 5 / Смоленский филиал Моск. энерг. ин-та (техн. ун-та). Смоленск, 2001. С. 67–69.
16. Фильчаков П. Ф. Справочник по высшей математике. Киев: Наукова думка, 1973. 743 с.
17. Нейдорф Р. А. Эффективная аппроксимация кусочных функций в задачах квазиоптимального по воздействию управления // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-2000: сб. трудов Международной научной конференции: в 7 т. Т. 2. Секции 2; 8 / Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет). СПб.: СПбГТУ, 2000. С. 18–22.

УДК: 621.313.223

Романенко Ирина Геннадьевна, Данилов Максим Иванович

МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ПИТАНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Предложен алгоритм моделирования квазистационарных режимов двигателя постоянного тока, питающегося пульсирующим напряжением. Алгоритм базируется на поверочном расчете, дополненном динамической математической моделью двигателя для учета пульсаций. Представлены результаты моделирования скоростных и механических характеристик с использованием математической модели двигателя и без неё.

Ключевые слова: двигатель постоянного тока, рабочие характеристики, поверочный расчет, математическая модель.

Irina Romanenko, Maksim Danilov

MODELING OF QUASISTATIONARY MODES OF DIRECT-CURRENT MOTOR UNDER PULSATING SUPPLY USING DYNAMIC MATHEMATICAL MODEL

The algorithm of quasistationary modes modeling of DC motor feeding on pulsating voltage was introduced. The algorithm bases on verifying calculation amended by dynamic mathematical DC motor model for taking into account pulsating supply voltage. The results of speed and mechanical performance modeling with dynamic mathematical motor model and without it were presented.

Key words: DC motor, working characteristics, verifying calculation, mathematical model.

Результатом моделирования квазистационарных режимов двигателя постоянного тока (ДПТ) являются рабочие, скоростные и механические характеристики. При дефиците исходных данных необходимая информация может быть получена в ходе поверочного расчета двигателя.

Так как процедура поверочного расчета является трудоемкой и требует значительных затрат времени, в настоящей работе использовалась разработанная программа, предназначенная для выполнения поверочного расчета ДПТ средней и большой мощности. В первом случае обмотка возбуждения выполняется как параллельная обмотке якоря, во втором случае – как последовательная [1]. В качестве исходных данных используются технические характеристики двигателя, приведенные