

УДК 681.52

А.В. Майстренко

Томский государственный университет автоматизированных систем
управления и радиозлектроники, Томск, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ, ОСНОВАННОГО НА КОНЦЕПЦИИ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ

В статье излагается новый подход к синтезу методов автоматического регулирования объектов, основанный на использовании концепции обратных задач динамики и приводятся некоторые результаты экспериментальных исследований, иллюстрирующие преимущества предложенного метода перед методом ПИД-регулирования. Кратко рассмотрены сущность ПИД-регулирования объектов и причины, обуславливающие необходимость поиска методов автоматического регулирования, являющихся альтернативными ПИД-регулированию. В качестве объекта исследования была выбрана дополнительная система генерирования переменного тока мощностью 30 кВА, которая используется на современных воздушных судах российского производства. Выбор данной системы в качестве объекта исследований обусловлен тем, что в настоящее время энерговооруженность летательных аппаратов очень высока, так как на современных воздушных судах широко применяются электронные системы управления, навигации и связи, кроме того, весьма актуальна постепенная реализация концепции «полностью электрифицированного самолета». Метод и алгоритм автоматического регулирования объектов, основанный на концепции обратных задач динамики и разностных уравнений, описывающих связи между значениями регулируемой переменной объекта и управляющих воздействий, формируемых регулятором, были положены в основу адаптивного регулятора, который, в свою очередь, был реализован в виде S-функции и соответствующего ей блока в пакете MatLab Simulink. При использовании в составе системы управления адаптивного регулятора пульсации и искажения формы регулируемых сигналов (напряжения и токов) практически отсутствуют, а там, где они есть, находятся в допустимом диапазоне. При любых нештатных ситуациях, в любой момент времени синтезированный регулятор в полной мере и предельно корректно выполняет свои функции, поддерживая требуемые значения тока и напряжения в заданном диапазоне.

Показано, что предложенный метод синтеза автоматических регуляторов является достаточно универсальным и позволяющим синтезировать регуляторы для всех объектов управления, функционирование которых может быть описано как обыкновенными дифференциальными уравнениями, так и разностными уравнениями различных порядков.

Ключевые слова: автоматический регулятор, ПИД-регулирование, обратная задача динамики, производная, концепция.

A.V. Maystrenko

Tomsk State University of Automated Control Systems and Radioelectronics,
Tomsk, Russian Federation

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THE METHOD OF AUTOMATIC REGULATION OF PROCESSES BASED ON THE CONCEPT OF REVERSE DYNAMICS PROBLEMS

The article presents a new approach to the synthesis of methods of automatic control of objects, based on the use of the concept of inverse dynamic problems and gives some results of experimental studies that illustrate the advantages of the proposed method over the PID method. The essence of PID-regulation of objects and the reasons, causing the necessity of searching for methods of automatic regulation, which are alternative to PID-regulation, are briefly considered. As an object of investigation, an additional 30 kVA alternating current generating system was chosen, which is used on modern Russian aircraft. The choice of this system, as an object of research, is due to the fact that at present the power capacity of aircraft is very high, since modern electronic systems of control, navigation and communications are widely used in modern aircraft, and the concept of a "fully electrified aircraft" is very actual. The method and algorithm for automatic control of objects based on the concept of inverse problems of dynamics and difference equations describing the relationships between the values of the controlled variable of the object and the control actions generated by the regulator was placed in the basis of the adaptive controller, which in turn was realized as an S-function and the corresponding block in the MatLab Simulink package. When used in the control system of the adaptive regulator of pulsation and distortion of the shape of the regulated signals (voltage and current) are practically absent, and, where they are, are within the permissible range. In case of any abnormal situations, at any time, the synthesized controller performs its functions in full and extremely correctly, maintaining the required values of current and voltage in the specified range.

It is shown that the proposed method of synthesis of automatic regulators is sufficiently universal and allows to synthesize regulators for all control objects whose operation can be described both by ordinary differential equations and difference equations of various orders.

Keywords: automatic controller, PID-control, the inverse problem of dynamics, the derivative, concept.

Введение. Целью данной работы является экспериментальное подтверждение теоретических положений и выводов, изложенных в статье «Синтез метода автоматического регулирования процессов, основанного на концепции обратных задач динамики» [1]. В ней подробно изложен синтез метода автоматического регулирования объектов, основанный на использовании разностных уравнений и концепции обратных задач динамики, а ее основные результаты сводятся к следующему:

1. Изложена сущность концепции обратных задач динамики применительно к задаче автоматического регулирования объектов.
2. Рассмотрены основные положения ПИД-регулирования объектов и выявлены проблемы его практического использования, обусловленные

неустойчивостью вычисляемых управляющих воздействий, к ошибкам измерений регулируемой переменной управляемого объекта.

3. Синтезирован метод автоматического регулирования объектов, основанный на концепции обратных задач динамики и разностных уравнений, описывающих связи между значениями регулируемой переменной объекта и управляющих воздействий, формируемых регулятором.

4. Показано, что предложенный метод синтеза автоматических регуляторов является достаточно универсальным и позволяющим синтезировать регуляторы для всех объектов управления, функционирование которых может быть описано как обыкновенными дифференциальными уравнениями, так и разностными уравнениями различных порядков.

В данной работе излагаются некоторые результаты экспериментальных исследований метода автоматического регулирования процессов, основанного на концепции обратных задач динамики. В качестве объекта исследования была выбрана дополнительная система генерирования переменного тока мощностью 30 кВА, которая используется на современных воздушных судах российского производства. Выбор данной системы в качестве объекта исследований обусловлен тем, что в настоящее время энерговооруженность летательных аппаратов (ЛА) очень высока, так как на современных воздушных судах широко применяются электронные системы управления, навигации и связи, кроме того, весьма актуальна постепенная реализация концепции «полностью электрифицированного самолета». Создание такого концепта является одним из перспективных направлений в развитии современной авиации. Данная система должна состоять из трехфазного генератора, устанавливаемого на маршевом двигателе, и статического преобразователя частоты. Генератор и преобразователь должны быть устойчивыми к внешним воздействующим факторам. Все характеристики системы при ненормальном (аварийном) режиме работы должны быть такими же, как и при нормальном (штатном) режиме работы системы. Данное требование обусловлено тем, что оно напрямую связано с безопасностью полетов ЛА.

Требования к электрическим параметрам дополнительной системы генерирования электрической энергии летательных аппаратов приведены и подробно описаны в ГОСТ 54073-10.

1. Сущность ПИД-регулирования объектов. Как известно [2–4], одним из типов автоматических регуляторов, широко используемых в автоматических и автоматизированных системах управления

технологическими процессами (АСУТП), являются ПИД-регуляторы. Основная идея, обусловившая название данного типа регуляторов, заключается в том, что значение u_t управляющего воздействия U на регулируемую переменную Y управляемого технологического процесса (УТП) в каждый момент времени t формируется в соответствии со следующим равенством (законом регулирования):

$$u_t = c_1 \Delta y_t + c_2 \int_{t_0}^t \Delta y_\tau d\tau + c_3 d(\Delta y_t) dt, \quad (1)$$

где Δy_t – отклонение фактического значения y_t регулируемой переменной Y в момент времени t от заданного значения y_{zt} данной переменной, вычисляемое согласно равенству вида

$$\Delta y_t = y_t - y_{zt}; \quad (2)$$

где c_1, c_2 и c_3 – настраиваемые параметры (коэффициенты) ПИД-регулятора; t_0 – момент начала регулирования УТП; τ – переменная интегрирования, все значения которой удовлетворяют соотношению $\tau \in I_t$, где I_t – интервал времени, описываемый соотношением

$$I_t = [t_0, t]. \quad (3)$$

Важнейшим достоинством ПИД-регуляторов является наличие в реализуемом ими законе регулирования (1) настраиваемых параметров c_1, c_2 и c_3 . Наличие в (1) данных параметров позволяет в каждом конкретном случае подбирать их численные значения так, чтобы значения $u_t, t = 1, 2, 3, \dots$, вычисляемые согласно равенству (1), обеспечивали выполнение последовательности равенств вида:

$$y_t = y_{zt}, t = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

Здесь, как и в равенстве (2), y_{zt} – заранее заданное значение переменной Y в момент времени t . В своей совокупности равенства (1)–(4), означают, что управляющие воздействия u_t на регулируемую переменную Y должны обеспечивать изменение ее значений во времени в соответствии с заранее заданным законом ее изменения.

2. Две проблемы, связанные с практическим применением ПИД-регуляторов. Большое количество теоретических и экспериментальных исследований ПИД-регуляторов [2–5], а также практика их применения в автоматизации разнообразных технологических процессов (ТП) [3–6] выявили две актуальные проблемы, существенно затрудняющие и ограничивающие возможности практического использования данных регуляторов. Первая из них – это проблема его настройки, сводящаяся к определению и заданию таких численных значений параметров c_1 , c_2 и c_3 в законе регулирования (1), реализация которых позволяет вычислять управляющие воздействия u_t , обеспечивающие выполнение равенства (4).

Вторая проблема, ограничивающая возможности практического использования ПИД-регуляторов, обусловливается наличием в законе регулирования (1) производной $d(\Delta y_t)/dt$ отклонения Δy_t . Как известно [6–9], вычисление производной любого сигнала является одним из классических примеров некорректно поставленных задач. Характерная особенность данных задач состоит в том, что их решения оказываются чрезмерно чувствительными к малейшим изменениям их исходных данных. Применительно к задаче дифференцирования отклонения Δy_t , решением и исходными данными которой являются соответственно измеренные значения y_t и соответствующие отклонение Δy_t , отмеченная выше особенность некорректно поставленных задач означает, что в случае, когда значения y_t , $t = 1, 2, 3, \dots$ задаются неточно, вычисляемое и используемое в (1) значение производной может оказаться сколь угодно далеким от ее истинного значения. Как видно из (1), неизбежно далеким от истинного значения окажется и вычисляемое в соответствии с ним значение u_t . Учитывая отмеченное, а также то, что в реальных условиях значения y_t являются результатом измерения регулируемой переменной Y каким-либо измерительным устройством или датчиком и, следовательно, содержат в себе погрешности измерения, можно видеть, во-первых, что и процесс регулирования переменной Y с применением ПИД-регулятора в целом неизбежно оказывается неустойчивым. Во-вторых, первопричиной неустойчивости данного процесса является использование в ПИД-регуляторе производной по времени отклонения Δy_t .

3. Две возможности устранения проблем практической реализации ПИД-регуляторов. Чтобы избавиться от неустойчивости ПИД-регуляторов и учесть при этом изложенное выше, можно либо регуляризовать операцию дифференцирования отклонения Δu_t , воспользовавшись каким-либо методом регуляризации некорректно поставленных задач [7, 9–12], либо отказаться от использования ПИД-регулирования и заменить его каким-либо аналогом, в котором не используется производная регулируемой величины. Первая из отмеченных выше возможностей реализована в работе [13]. При этом регуляризация дифференцирования регулируемой переменной обеспечивается использованием скользящей квадратичной аппроксимации изменения данной переменной и аналитического дифференцирования аппроксимирующих алгебраических полиномов 2-го порядка. Представленные в работе результаты показывают, что предлагаемый в ней ПИД-регулятор обладает более высокой помехоустойчивостью и обеспечивает более высокую точность регулирования.

Вторая из отмеченных выше возможностей совершенствования методов автоматического регулирования процессов и повышения их эффективности реализуется в данной работе. На основе использования концепции обратных задач динамики в ней предлагается метод автоматического регулирования ТП, являющийся альтернативой методу ПИД-регулирования и другим методом автоматического регулирования процессов, основанным на использовании производных регулируемых переменных. При этом в качестве математической модели, описывающей связь между значениями y_t , $t=1,2,3\dots$ регулируемой переменной Y и значениями u_t управляющего воздействия U , используются разностные уравнения 2-го порядка. Применительно к данному случаю синтезируется численный алгоритм вычисления управляющих воздействий u_t , $t = 1,2,3\dots$.

4. Синтез метода автоматического регулирования объектов, основанного на использовании разностных уравнений и концепции обратных задач динамики. Синтез данного метода автоматического регулирования объектов подробно описан в работе [1]. Однако для удобства читателя приведем его краткое описание. При этом для упрощения последующих рассмотрений будем считать, что:

1. Значения $y_{t+1}, y_t, y_{t-1}, y_{t-2}$ регулируемой переменной Y объекта управления (ОУ) в моменты времени $t + 1, t, t - 1, t - 2$ связаны между собой и со значениями u_t, u_{t-1} его входа U (управляющих воздействий) разностным уравнением вида:

$$y_{t+1} = \alpha_1 y_t + \alpha_2 y_{t-1} + \alpha_3 y_{t-2} + \alpha_4 U_t + \alpha_5 U_{t-1}, \quad (5)$$

коэффициенты $\alpha_1 - \alpha_5$ которого являются некоторыми постоянными числами, не зависящими от значений u_t, u_{t-1} входа U ОУ и от значений y_t, y_{t-1}, y_{t-2} его выхода Y .

2. Задан желаемый (необходимый) закон изменения во времени значений y_{zt} регулируемой переменной Y объекта управления, определяемых равенствами:

$$y_{zt} = \varphi(t), t = 1, 2, 3, \dots, \quad (6)$$

где $\varphi(t)$ – некоторая заданная функция времени t .

3. Значения u_t управляющих воздействий должны выбираться так, чтобы значения y_t выхода Y ОУ в каждый момент времени t удовлетворяли равенствам:

$$y_t = y_{zt}, t = 1, 2, 3, \dots, \quad (7)$$

и при этом выполнялось равенство (5).

Исходные данные, представленные равенствами (5)–(7), являются необходимым и достаточным условием для синтеза метода автоматического регулирования процессов. В самом деле, равенство (5) связывает в каждый момент времени t значения y_{t+1}, y_t, y_{t-1} регулируемой переменной Y со значениями u_t и u_{t-1} управляющего U и, таким образом, используя данное равенство и равенство (5) для вычисления желаемых значений $u_{zt}, t = 1, 2, 3, \dots$, можно составить уравнение относительно неизвестного значения u_t :

$$\alpha_1 y_t + \alpha_2 y_{t-1} + \alpha_3 y_{t-2} + \alpha_4 u_t + \alpha_5 u_{t-1} = y_{zt}. \quad (8)$$

Входящие в данное уравнение значения y_t, y_{t-1}, y_{t-2} и y_{zt} , а также значение u_{t-1} нам известны, и, как видно из (8), неизвестным здесь

является только значение u_t . Перенеся известные слагаемые $\alpha_1 y_t, \alpha_2 y_{t-1}, \alpha_3 y_{t-2}$ и $\alpha_5 u_{t-1}$ в его правую часть, представим данное уравнение в традиционном в линейной алгебре [14] виде:

$$\alpha_4 u_t = \Delta z_t, \quad t = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

Здесь $\Delta z_t = y_{zt+1} - \alpha_1 y_t - \alpha_2 y_{t-1} - \alpha_3 y_{t-2} - \alpha_5 u_{t-1}$. Полученное уравнение является простейшим линейным алгебраическим уравнением относительно искомого значения u_t . Его решение определяется следующим очевидным равенством:

$$u_t = \Delta z_t / \alpha_4, \quad t = 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

4. Проверяем соответствие вычисленного значения u_t условиям его физической реализуемости, представленным соотношением вида:

$$u_t \in I_t \equiv [u_t^{\min}, u_t^{\max}], \quad (11)$$

где u_t^{\min} и u_t^{\max} – некоторые заданные числа, выбираемые с учетом ограничений, налагаемых в момент времени t на значения управляющих воздействий u_t .

Если вычисленное значение u_t удовлетворяет данному соотношению, то полагаем, что оно является желаемым управляющим воздействием u_{zt} и полагаем

$$u_{zt} = u_t. \quad (12)$$

В противном случае, т.е. если вычисленное значение u_t данным соотношениям не удовлетворяет, то используем его для вычисления желаемого значения u_{zt} , и вычисление последнего осуществляем в соответствии с равенством:

$$u_{zt} = \begin{cases} u_t^{\min}, & \text{если } u_t \leq u_t^{\min}, \\ u_t^{\max}, & \text{если } u_t \geq u_t^{\max}. \end{cases} \quad (13)$$

Здесь u_t^{\min} и u_t^{\max} некоторые заданные функции времени t такие, что $u_t^{\min} < u_t^{\max}$. В простейшем случае данные функции определяются равенствами $u_t^{\min} = u^{\min}$ и $u_t^{\max} = u^{\max}$, где u^{\min} и u^{\max} – некоторые заданные постоянные числа, удовлетворяющие неравенству $u^{\min} < u^{\max}$.

В завершение синтеза предлагаемого метода автоматического регулирования объектов приведем следующие комментарии, более полно раскрывающие его сущность, особенности и возможности практической реализации.

1. Как непосредственно видно из равенств (5)–(10), ни в одном из них не фигурирует производная $d(\Delta y_t)/dt$ отклонения Δy_t , определяемого равенством (2), и, таким образом, в предлагаемом методе отсутствует основная причина, обуславливающая неустойчивость как ПИД-регулирования, так и других законов регулирования, в которых данная производная используется.

2. Изложенный выше синтез предлагаемого метода автоматического регулирования объектов осуществлен применительно к частному случаю управляемого объекта, когда связь между значениями регулируемой переменной и значениями управляющих воздействий описывается разностным уравнением (5). Однако совершенно аналогичными рассуждениями и действиями можно синтезировать подобный метод регулирования и для других управляемых объектов, связи между регулируемыми переменными и управляющими воздействиями которых описываются разностными уравнениями [15–19].

3. В настоящее время известен целый ряд способов преобразования обыкновенных дифференциальных уравнений [20], наиболее часто используемых в современной теории и практике автоматического управления, в разностные уравнения.

Поэтому, как это и сделано выше, при синтезе того или иного метода автоматического регулирования всегда можно считать, что связь между значениями регулируемой переменной и управляющих воздействий описывается каким-либо разностным уравнением [18].

5. Реализация адаптивного регулятора. Синтезированный в работе [1] метод и алгоритм автоматического регулирования объектов, основанный на концепции обратных задач динамики и разностных уравнений, описывающих связи между значениями регулируемой переменной объекта и управляющих воздействий, формируемых регулятором, был положен в основу адаптивного регулятора, который, в свою очередь, был реализован в виде S-функции и соответствующего ей блока в пакете MatLab Simulink.

Алгоритм предназначен для оценивания параметров линейных моделей, в том числе и разностных уравнений, которыми могут быть

описаны различные динамические процессы и объекты. Использование разностных уравнений позволяет достаточно просто и с наименьшими затратами формулировать и решать, как задачу подстройки параметров математической модели объекта, являющейся некоторым разностным уравнением, и делать это в реальном масштабе времени, так и задачу вычисления управляющих воздействий при минимальных требованиях к вычислительной системе.

Общая укрупненная структура адаптивной системы управления с подстраиваемой моделью объекта управления приведена на рис. 1.

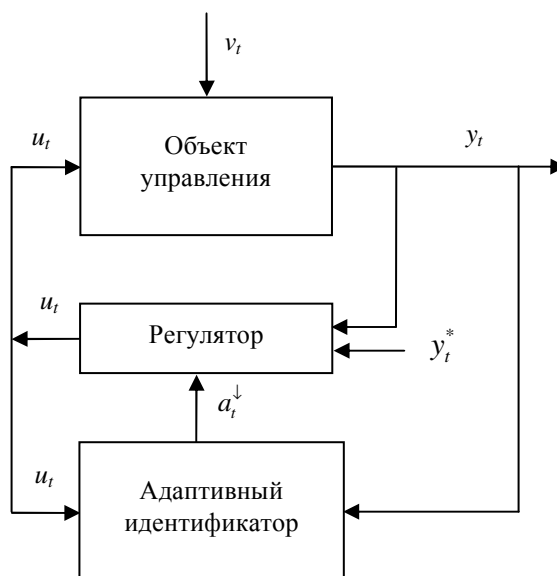


Рис. 1. Общая структурная схема адаптивной системы управления

На схеме приняты следующие обозначения: y_t^* – желаемое (необходимое) значение выхода Y управляемого объекта; v_t – значения неконтролируемых возмущений, действующих на объект; y_t – измеренное значение выхода объекта; u_t – значение управляющего воздействия, подаваемого на объект; a_t – оценки параметров α математической модели объекта; t – дискретное время.

В отличие от традиционных (неадаптивных) систем управления, включающих в свой состав только объект управления и управляющее устройство, в рассматриваемую систему входит еще один блок – иден-

тификатор. Идентификатор в процессе функционирования объекта, используя имеющиеся значения управляющего воздействия $u_t, u_{t-1}, u_{t-2}, \dots$, измеренные значения выхода объекта $y_t, y_{t-1}, y_{t-2}, \dots$ и имеющиеся оценки a_{t-1}^\downarrow параметров α , непрерывно вычисляет новые оценки a_t^\downarrow параметров α математической модели объекта и передает их в блок управляющего устройства. Используя эти оценки, управляющее устройство формирует управляющие воздействия u_t и передает их на исполнительные устройства.

Основное предназначение идентификатора состоит в том, чтобы по мере поступления в систему значений выхода объекта y_t и управляющих воздействий u_t уточнять оценки параметров объекта в соответствии с равенством (5). Наличие системы слежения за меняющимися параметрами нестационарного объекта делает всю систему существенно менее чувствительной к изменениям объекта. Такие системы называются с двойной инвариантностью, поскольку они нечувствительны к возмущениям v_t и к изменению передаточных функций каналов, по которым действуют эти возмущения.

Процесс функционирования системы: на каждом t -м такте управления, где t – дискретные и равноотстоящие друг от друга моменты времени, $t = 1, 2, \dots$, производятся измерения значений y_t и u_t , которые передаются в блок подстройки параметров математической модели объекта управления – идентификатор. На основе поступивших значений y_t и u_t и уже хранящихся в нем значений $y_t, y_{t-1}, y_{t-2}, \dots$ и $u_t, u_{t-1}, u_{t-2}, \dots$, поступивших в него в предыдущие моменты времени $t - 1, t - 2, \dots$, в данном блоке осуществляется уточнение вектора оценок a_{t-1}^\downarrow неизвестных параметров объекта α с помощью некоторого алгоритма оценивания. Затем полученные новые оценки a_t^\downarrow передаются в управляющее устройство. На основе поступивших в управляющее устройство оценок a_t^\downarrow и измеренных значений y_t и u_t , а также с учетом заданного значения y_t^* в данном блоке вычисляются управляющие воздействия u_{t+1} и передаются на исполнительное устройство. На этом t -й такт функционирования завершается и начинает реализовываться следующий $(t + 1)$ -й такт [1].

6. Некоторые результаты экспериментальных исследований метода автоматического регулирования процессов. Так же, как и во всех системах, в процессе эксплуатации системы электроснабжения на воздушных судах возможны отказы ее элементов, приводящие к нарушению нормального режима работы отдельных каналов или даже всей системы. При изменении значения одного или нескольких основных параметров канал системы, работавший до этого в нормальном режиме, под воздействием непредвиденного возмущения внешних факторов переходит в новое состояние – ненормальный режим работы. Для предотвращения опасных последствий ненормальных режимов защита отключает неисправный канал генерирования. Очевидно, что область срабатывания защиты не должна выходить за пределы области ненормальных режимов. Вследствие действия климатических и технологических факторов допускается некоторый разброс уставок аппаратов защиты, поэтому возможна длительная работа системы электроснабжения при небольших отклонениях напряжения и частоты от номинального значения.

При отказе всех каналов приемники переходят на питание от дополнительного (резервного) источника, мощность которого, как правило, ограничена, и поэтому часть приемников электрической энергии отключается. Такой режим работы системы электроснабжения называется аварийным. Для исследования таких режимов (переходных процессов) в дополнительной системе генерирования электрической энергии (СГЭЭ) ЛА были использованы пакет прикладных программ MatLab и его графическая среда имитационного моделирования Simulink. Для этого в среде Simulink была создана математическая модель, реализующая систему управления дополнительной СГЭЭ, с использованием блока адаптивного регулятора, которая позволяет моделировать все необходимые процессы, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации реальной системы. Структурная схема математической модели резервной СГЭЭ ЛА в данной работе не представлена, но отметим, что она состоит из тиристорного выпрямителя, непосредственно силовой части, состоящей из трех включенных параллельно мостовых инверторов и выходного L-C фильтра, широтно-импульсных модуляторов, блока адаптивных регуляторов, блока нагрузок и измерительных блоков.

Экспериментальные исследования электромагнитных процессов в СГЭЭ ЛА, имитирующие нештатные ситуации, возникающие в реальных условиях эксплуатации ЛА, проводились для следующих трех случаев:

- 1) при «сбросе-набросе» нагрузки от 10 до 160 % от номинального значения мощности;
- 2) при коротком замыкании в нагрузке;
- 3) при межфазных замыканиях в СГЭЭ.

При «сбросе-набросе» нагрузки от 10 до 160 % от номинального значения СГЭЭ ЛА должна быть устойчива, значения напряжений и токов должны быть в допустимом диапазоне, предусмотренном ГОСТ Р54073-2010, а переходные процессы должны укладываться в заданные временные границы. На рис. 2–7 приведены сравнительные результаты моделирования изменения выходного напряжения при «сбросе-набросе» нагрузки 160 % от номинала. При этом на рис. 2 приводятся результаты исследований, когда в качестве регулятора в СГЭЭ используется адаптивный регулятор, а на рис. 3 – ПИД-регулятор.

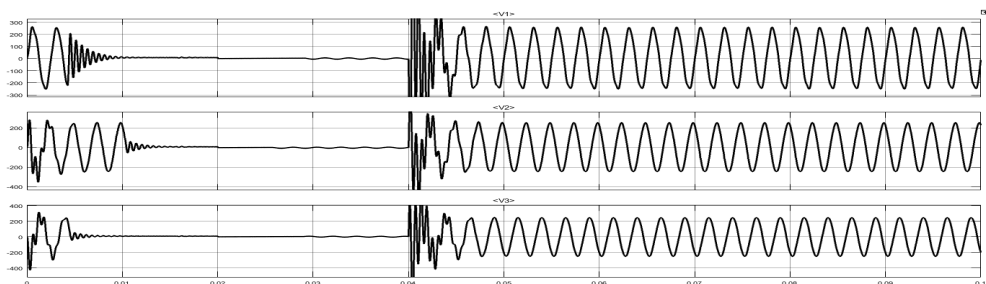


Рис. 2. Выходное напряжение на нагрузку 160 % от номинала.
Система с адаптивным регулятором

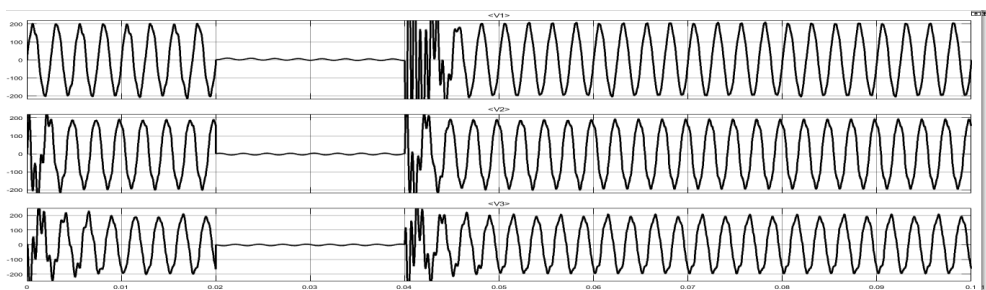


Рис. 3. Выходное напряжение на нагрузку 160 % от номинала.
Система с ПИД-регулятором

Как видно из представленных графических зависимостей, при использовании в составе системы адаптивного регулятора до и после воздействия возмущающих факторов все параметры находятся в допустимых пределах. Временные параметры переходного процесса

значительно меньше определенных требованиями ГОСТ Р54073-2010. Нетрудно заметить, что при любых возмущающих факторах время переходного процесса составляет не более 35 мс, что свидетельствует о достаточно высоком быстродействии системы управления, в основе которой применен адаптивный регулятор. Одновременно с тем выходные напряжения и токи не имеют каких-либо пульсаций и достаточно точно укладываются в заданные диапазоны допустимых значений. В случае, когда в составе системы управления используется ПИД-регулятор, таких результатов достичь не удастся, на рисунках отчетливо видны искажения выходного напряжения, что является крайне нежелательным явлением в реальных условиях эксплуатации. При коротком замыкании в нагрузке, которое может появиться вследствие некоторых внешних воздействующих факторов, дополнительная СГЭЭ ЛА должна удовлетворять требованиям ГОСТ Р54073-2010. Графики зависимостей выходных трехфазных напряжений приведены на рис. 4, 5.

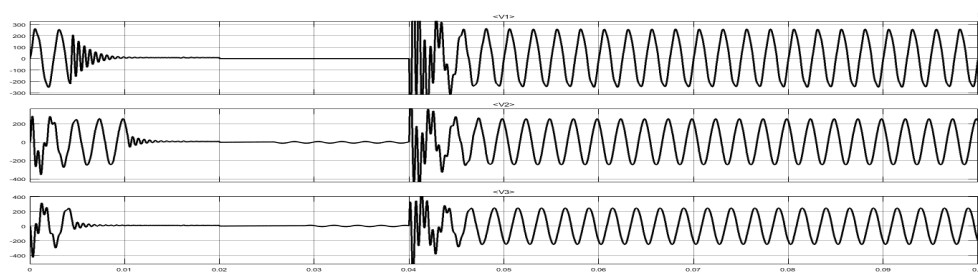


Рис. 4. Выходное напряжение при коротком замыкании в нагрузке.
Система с адаптивным регулятором

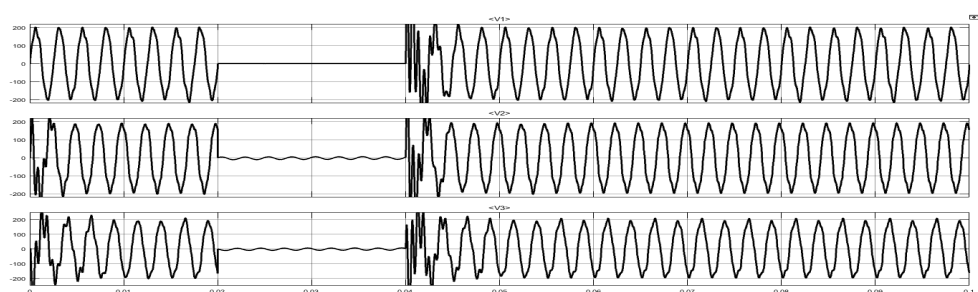


Рис. 5. Выходное напряжение при коротком замыкании в нагрузке.
Система с ПИД-регулятором

На них, как и в предыдущем случае, наблюдается практически идентичная ситуация, что в принципе вполне понятно и закономерно. Предлагаемый регулятор имеет неоспоримое преимущество, а схо-

жесть графических зависимостей свидетельствует о том, что регулятор имеет стабильные качественные и точностные характеристики и успешно выполняет поставленную перед ним задачу.

Графические результаты, иллюстрирующие поведение системы при межфазном замыкании, приведены на рис. 6, 7. Графические зависимости были получены для всех возможных случаев межфазного замыкания, при замыкании трех фаз поочередно графики приведены только для замыкания фаз *A* и *C*.

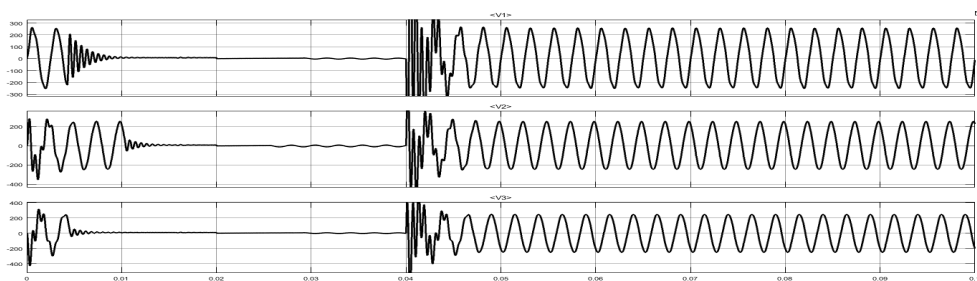


Рис. 6. Выходное напряжение при межфазном замыкании между фазами *A* и *C*. Система с адаптивным регулятором

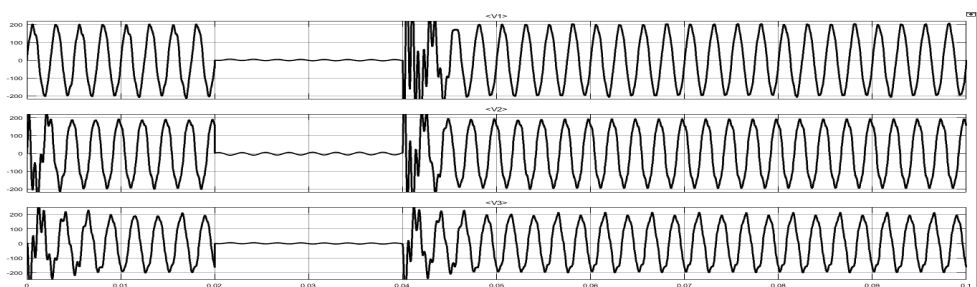


Рис. 7. Выходное напряжение при межфазном замыкании между фазами *A* и *C*. Система с ПИД-регулятором

Как и в двух предыдущих случаях, мы видим абсолютно схожие графические зависимости, соответственно и выводы относительно поведения рассматриваемых систем управления будут идентичными, а дополнительные комментарии излишними.

Выводы. В результате экспериментальных исследований было выявлено, что при любых возмущающих факторах (нештатных ситуациях) время переходных процессов для обоих видов регулирования составляет не более 35 мс, что вполне удовлетворяет предъявляемым требованиям к быстродействию системы управления. Анализируя

графические зависимости и массивы выходных значений напряжений и токов от времени, можно сделать следующие выводы:

– при использовании в составе системы управления ПИД-регулятора регулируемые переменные (напряжения и токи) имеют пульсации, наличие которых является крайне нежелательным явлением на реальных объектах управления, а это, в свою очередь, указывает на то, что регулирование осуществляется не совсем корректно. Еще одним недостатком такой системы управления является то, что регулируемые сигналы (токи и напряжения) не всегда попадают в требуемый диапазон значений;

– при использовании в составе системы управления адаптивного регулятора пульсации и искажения формы регулируемых сигналов (напряжения и токов) практически отсутствуют, а там, где они есть, находятся в допустимом диапазоне. При любых нештатных ситуациях в любой момент времени, синтезированный регулятор в полной мере и предельно корректно выполняет свои функции, поддерживая требуемые значения тока и напряжения в заданном диапазоне.

Основываясь на вышеизложенных замечаниях и выводах, можно однозначно утверждать, что система управления дополнительной системой генерирования электрической энергии с использованием адаптивного регулятора является более устойчивой к внешним воздействиям, имеет более высокую точность и скорость регулирования, чем система, основанная на применении ПИД-регулятора.

Библиографический список

1. Синтез метода автоматического регулирования процессов, основанного на концепции обратных задач динамики / А.Е. Карелин, А.В. Майстренко, А.А. Светлаков, С.А. Харитонов // Омский научный вестник. – 2017. – № 4(154). – С. 83–87.

2. Юревич Е.И. Теория автоматического управления: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1969. – 375 с.: – Л.: Энергия, 1975. – 714 с.

3. Ротач В.Я. Расчет настройки реальных ПИД-регуляторов // Теплоэнергетика. – 1993. – № 10. – С. 32–35.

4. Майстренко А.В., Светлаков А.А., Старовойтов Н.В. Цифровое дифференцирование сигналов на основе скользящей квадратичной аппроксимации и его применение в синтезе ПИД-регуляторов // Омский научный вестник. – 2016. – № 1(145). – С. 73–77.

5. Майстренко А.В., Светлаков А.А., Старовойтов Н.В. Цифровое дифференцирование сигналов с применением многоточечных методов в системах автоматического регулирования процессов // Доклады ТУСУРа. – 2009. – № 2(20). – С. 86–89.

6. Майстренко А.В., Светлаков А.А. Косвенное измерение расхода жидкости перекачиваемой насосными агрегатами // Доклады ТУСУРа. – 2014. – № 4(34). – С. 215–220.

7. Cruceanu S. Regularisation pour les problemes a operateurs monotones et la methode de Galerkin // Comment Math. University Carol. – 1971. – Т. 12. – № 1.

8. Рабинер Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов: пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 848 с.

9. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач: – 2-е изд. – М.: Наука, 1979. – 286 с.

10. Майстренко А.В., Светлаков А.А., Старовойтов Н.В. Цифровое дифференцирование измеряемых сигналов с применением интегральных уравнений В. Вольтерра и его регуляризация // Омск. науч. вестник. – 2013. – № 2(120). – С. 308–313.

11. Майстренко А.В., Светлаков А.А., Старовойтов Н.В. Регуляризация простейшего алгоритма цифрового дифференцирования сигналов // Научный вестник Новосибир. гос. техн. ун-та. – 2006. – № 4(25). – С. 53–67.

12. Латгес Р., Лиенс Ж.Л. Метод квазиобращения и его приложения. – М.: Мир, 1970.

13. Майстренко А.В., Светлаков А.А., Старовойтов Н.В. Цифровое дифференцирование сигналов в реальном масштабе времени с применением скользящей квадратичной аппроксимации // Омск. науч. вестник. – 2006. – № 7(43). – С. 106–108.

14. Уилкинсон Дж., Райнш К. Справочник алгоритмов на языке АЛГОЛ. Линейная алгебра / пер. с англ. под ред. д-ра техн. наук проф. Ю.И. Топчиева. – М.: Машиностроение, 1976. – 389 с.

15. Харитонов С.А. Электромагнитные процессы в системах генерирования электрической энергии для автономных объектов: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 536 с.

16. Tsai Huan-Liang. Generalized Linear Quadratic Gaussian and Loop Transfer Recovery Design of F-16 Aircraft Lateral Control // Engineering Letters. – 2007. – Vol. 14. – Iss. 1. – P. 1–6.

17. Электрический самолет. Концепция и технологии: монография / А.В. Левин, С.М. Мусин, С.А. Харитонов [и др.]. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2014. – 388 с.

18. Van der Schaft A., Schumacher H. An Introduction to Hybrid Dynamical Systems // Lect. Notes in Control and Information Sciences. Springer-Verlag. – 2000. – Vol. 251.

19. Gao Z., Antsaklis P.J. Stability of the pseudo-inverse method for reconfigurable control systems // International Journal of Control. – 1991. Vol. 53. – № 3. – P. 717–729.

20. Коллатц Л. Численные методы решения дифференциальных уравнений. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1953. – 463 с.

References

1. Karelin A.E., Maistrenko A.V., Svetlakov A.A., Kharitonov S.A. Sintez metoda avtomaticheskogo regulirovaniia protsessov, osnovannogo na kontseptsii obratnykh zadach dinamiki [Synthesis of the method of automatic control of processes based on the concept of inverse problems of dynamics]. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2017, no. 4(154), pp. 83-87.

2. Iurevich E.I. Teoriia avtomaticheskogo upravleniia [Automatic control theory]. 2nd ed. Leningrad: Energiia, 1969. 375 p. Leningrad: Energiia, 1975. 714 p.

3. Rotach V.Ia. Raschet nastroiiki real'nykh PID-regulatorov [Calculation of real PID control settings]. *Teploenergetika*, 1993, no. 10, pp. 32-35.

4. Maistrenko A.V., Svetlakov A.A., Starovoitov N.V. Tsifrovoe differentsirovanie signalov na osnove skol'ziashchei kvadrachnoi approksimatsii i ego primenenie v sinteze PID-regulatorov [Digital differentiation of signals based on sliding quadratic approximation and its use in the synthesis of PID - regulators]. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2016, no. 1(145), pp. 73-77.

5. Maistrenko A.V., Svetlakov A.A., Starovoitov N.V. Tsifrovoe differentsirovanie signalov s primeneniem mnogotochechnykh metodov v sistemakh avtomaticheskogo regulirovaniia protsessov [Digital signal differentiation using multipoint methods in automatic process control systems]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniia i radioelektroniki*, 2009, no. 2(20), pp. 86-89.

6. Maistrenko A.V., Svetlakov A.A. Kosvennoe izmerenie raskhoda zhidkosti perekachivaemoi nasosnymi agregatami [Indirect measurement of fluid flow pumped pumping units]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniia i radioelektroniki*, 2014, no. 4(34), pp. 215-220.

7. Cruceanu S. Regularisation pour les problemes a operateurs monotones et la methode de Galerkin. *Comment Math. University Carol*, 1971, vol. 12, no. 1.

8. Rabiner L. Teoriia i primeneniie tsifrovoi obrabotki signalov [Theory and Application of Digital Signal Processing]. Moscow: Mir, 1978. 848 p.

9. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ia. Metody resheniia nekorrektnykh zadach [Methods for solving incorrect problems]. 2nd ed. Moscow: Nauka, 1979. 286 p.

10. Maistrenko A.V., Svetlakov A.A., Starovoitov N.V. Tsifrovoye differentsirovaniie izmeriaemykh signalov s primeneniem integral'nykh uravnenii V. Vol'terra i ego regularizatsiia [Digital differentiation of measured signals using V. Volterra integral equations and its regularization]. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2013, no. 2(120), pp. 308-313.

11. Maistrenko A.V., Svetlakov A.A., Starovoitov N.V. Regularizatsiia prosteyshogo algoritma tsifrovogo differentsirovaniia signalov [Regularization of the simplest digital signal differentiation algorithm]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, no. 4(25), pp. 53-67.

12. Lattes R., Liens Zh.L. Metod kvaziobrashcheniia i ego prilozheniia [The quasi-inversion method and its applications]. Moscow: Mir, 1970.

13. Maistrenko A.V., Svetlakov A.A., Starovoitov N.V. Tsifrovoye differentsirovaniie signalov v real'nom masshtabe vremeni s primeneniem skol'ziashchei kvadrachnoi approssimatsii [Real-time digital differentiation of signals using sliding quadratic approximation]. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2006, no. 7(43), pp. 106-108.

14. Uilkinson Dzh., Rainsh K. Spravochnik algoritmov na iazyke ALGOL. Lineinaia algebra [Handbook of algorithms in the language of ALGOL. Linear algebra]. Ed. Iu.I. Topcheev. Moscow: Mashinostroenie, 1976. 389 p.

15. Kharitonov S.A. Elektromagnitnye protsessy v sistemakh generirovaniia elektricheskoi energii dlia avtonomnykh ob"ektov [Electromagnetic processes in the systems of generation of electric energy for autonomous objects]. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2011. 536 p.

16. Tsai Huan-Liang. Generalized Linear Quadratic Gaussian and Loop Transfer Recovery Design of F-16 Aircraft Lateral Control. *Engineering Letters*, 2007, vol. 14, iss. 1, pp. 1-6.

17. Levin A.V., Musin S.M., Kharitonov S.A. [et al.]. Elektricheskii samolet. Kontseptsii i tekhnologii [Electric plane. Concept and technology]. Ufa: Ufimskii gosudarstvennyi aviatsionnyi tekhnicheskii universitet, 2014. 388 p.

18. Van der Schaft A., Schumacher H. An Introduction to Hybrid Dynamical Systems. *Lect. Notes in Control and Information Sciences*. Springer-Verlag, 2000, vol. 251.

19. Gao Z., Antsaklis P.J. Stability of the pseudo-inverse method for reconfigurable control systems. *International Journal of Control*, 1991, vol. 53, no. 3, pp. 717-729.

20. Kollatts L. Chislennye metody resheniia differentsial'nykh uravnenii [Numerical methods of the solution of the differential equations]. Moscow: Izdatel'stvo inostranoi literatury, 1953. 463 p.

Сведения об авторе

Майстренко Андрей Васильевич (Томск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Компьютерные системы в управлении и проектировании» Томского государственного университета автоматизированных систем управления и радиоэлектроники (634050, Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: maestro67@mail.ru).

About the author

Maistrenko Andrey Vasilievich (Tomsk, Russian Federation) is a Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Systems in Management and Design of Tomsk State University of Automated Control Systems and Radioelectronics (634050, Tomsk, 40, Lenina pr., e-mail: maestro67@mail.ru).

Получено 09.07.2018