

Б. В. Сухинин, д-р техн. наук, проф., зав. каф., eeo@uic.tula.ru,

В. В. Сурков, д-р техн. наук, проф., vvs150747@mail.ru,

Тульский государственный университет

К вопросу о методологическом кризисе современной теории оптимального управления

Известно, что если проблемы не решаются на том уровне, где они появились — необходимо подняться на уровень выше, на более высокую ступень понимания законов природы. Проблемы оптимального управления невозможно решить чисто математически: математика без физики — глупа, физика без математики — слепа. Предлагается взглянуть на проблемы метода динамического программирования Р. Беллмана, имеющего методологическое значение, хотя бы еще со стороны физических явлений. Это позволяет решить проблемы оптимального управления многомерным объектом высокого порядка, в том числе и нелинейным.

Ключевые слова: аналитическое конструирование, оптимальное управление, декомпозиция, подчиненное управление, оптимальная точность, оптимальное быстроедействие, устойчивость, функциональное уравнение, условие управляемости

В известном уникальном справочнике по теории автоматического управления (ТАУ), подготовленном группой отечественных ученых под руководством А. А. Красовского, синтез оптимальных управлений нелинейными объектами отнесен к основной проблеме современной ТАУ (СТАУ). Однако, как отмечает А. А. Колесников в своей широко известной монографии "Синергетическая теория управления": "Ситуация в этой области приняла в настоящее время угрожающий и, по всем признакам, кризисный характер". Авторы справочника по ТАУ отмечают, что "в развитии СТАУ с точки зрения практики далеко не все обстоит благополучно. Классическую ТАУ в основном создавали инженеры для инженеров. СТАУ создают в основном математики для инженеров и во все большей мере математики для математиков. Последнее с точки зрения практики вызывает определенное беспокойство. Главное негативное влияние на практическое внедрение методов СТАУ оказывает масса оторванных от практических потребностей и возможностей работ и даже направлений, интересных в математическом отношении, но бесплодных в отношении современных приложений". А. А. Колесников отмечает: "Другими словами, в СТАУ "математическое содержание" во многом подавляет физическое начало, которое фактически отсутствует в самой формулировке основной задачи управления и, что особенно важно, в подходах к ее решению". Впервые методологический кризис теории управления (ТУ) предсказал один из ее основоположников А. А. Красовский еще в 1990 г. и сформулировал проблему создания "физической теории управления" [1].

Подробно рассмотрев причины сложившегося кризиса, Н. Б. Филимонов показал, что "ключом к его преодолению является достижение в задачах управления органического единства математической строгости и физического смысла [2]: "... для вывода современной ТУ из методологического кризиса необходимо восстановить взаимобратную связь между теорией и практикой, сочетая инженерную направленность с обновляющимся математическим

аппаратом, обеспечивая в задачах управления наряду с математической и физической строгостью — правильный учет всех существенных в данной задаче факторов". Автор отмечает, что "несмотря на актуальность проблемы разработки физической ТУ, она, фактически, так и осталась без внимания и не вызвала никакой реакции со стороны ни отечественных, ни зарубежных специалистов. За прошедшие четверть века не опубликована ни одна работа, посвященная данной проблеме".

В настоящей работе предпринята такая попытка.

Предлагаемый путь решения задач современной теории оптимального управления

Наиболее общий метод решения задач оптимального управления в форме обратной связи, получивший название динамического программирования, предложен Р. Беллманом еще в 30-х годах прошлого столетия. В его основе лежит принцип оптимальности: любой конечный участок оптимальной траектории является также оптимальным, а любой промежуточный участок может быть не оптимальным.

Современные идеи оптимального управления распространяются не только на технические объекты и технологические процессы в промышленности, но и на такие области, как организация и управление производством, экономика, менеджмент, биология, военное дело и даже политика или здоровье отдельного человека, его успехи. Отметим методологическое значение принципа Р. Беллмана — управлять можно чем угодно или кем угодно, если выполнены три условия: известен объект управления, известна конечная цель управления и известен критерий оценки качества управления. Если нет хотя бы одного из них — нет смысла приступать к решению задачи управления. Подразумевается, что в задачах управления присутствуют, как минимум, два взаимодействующих блока: объект управления (ОУ) и субъект управления — человек (при ручном управлении) или система управления

(СУ) (при автоматическом управлении). Часто СУ называют регулятором (Р).

В данной статье мы сузим круг задач и ограничимся рассмотрением вопросов теории оптимального управления применительно к технике и, в частности, к электроприводам. Разработка СУ электроприводами, обеспечивающей малые ошибки (не более $20''$) на минимальных скоростях слежения (до $0,01^\circ$) при флуктуациях момента трения и нагрузки в процессе эксплуатации, при наличии люфта редуктора, на порядок превышающего допустимую ошибку, при нежесткой и неуравновешенной конструкции исполнительного механизма, позволит создать высокотехнологичное промышленное оборудование (например, прецизионные станки) и перспективные виды вооружения и военной техники (например, высокоточные радиолокационные станции слежения и наведения).

Описание метода решения

Для простоты изложения, не влияющего на сущность задачи, будем рассматривать объект (электропривод) с одним управляющим воздействием $|u| \leq 1$, уравнение возмущенного движения которого в соответствии с теорией А. М. Ляпунова имеет вид

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}(\mathbf{X}) + \mathbf{B}(\mathbf{X})u(t),$$

где $\dot{\mathbf{X}} = (\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_n)^T$, $\dot{x}_i = x'_i = dx_i/dt$, $i = 1, 2, \dots, n$; $\mathbf{A}(\mathbf{X})$ — матрица-столбец с элементами $a_i(\mathbf{X}) \equiv a_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$, представляющими собой нелинейные однозначные функции; $\mathbf{B}(\mathbf{X}) = (b_1, b_2, \dots, b_m)$, $b_1=0, b_2=0, \dots, b_{m-1}=0, b_m \neq 0$, $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ — вектор-столбец переменных параметров (фазовый вектор или вектор состояния) динамического объекта; n — число параметров или порядок объекта или число дифференциальных уравнений объекта в форме Коши, m — число управляющих параметров (управлений).

Итак, **объект управления**

$$\dot{x}_1 = a_1(\mathbf{X}), \dot{x}_2 = a_2(\mathbf{X}), \dots, \dot{x}_n = a_n(\mathbf{X}) + b_n(\mathbf{X})u. \quad (1)$$

Цель управления: перевести объект управления (1) с помощью СУ (субъект) из начального положения $\mathbf{X}(0) = (x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0})^T$ в конечное положение $\mathbf{X} = 0$, т. е. в начало координат.

Критерий оценки качества управления: очевидно, наибольшее значение из всех известных критериев имеют критерии максимальной точности воспроизведения (что толку от того, что деталь изготовлена быстро, с минимумом ресурсов, но не точно). Общим признаком интегральных критериев точности является их независимость в явной форме от управления:

$$J = \int_0^T F(\mathbf{X})dt, F_0(\mathbf{X}) > 0, \text{ время } T \text{ — не определено,} \quad (2)$$

причем критерий быстродействия является частным случаем критерия точности при $F_0(\mathbf{X}) = 1$ или критерий быстродействия является одновременно и критерием точности [3]. Можно показать [4], что в рамках общего критерия точности (2) находится также и энергосберегающий критерий расхода "сигнала управления", присутствующий в критерии обобщенной работы А. А. Красовского.

Известно, что минимизация критерия точности (например, методом динамического программирования Р. Беллмана) обеспечивается идеальными релейными управлениями:

$$u(t) = -\text{sign}(\psi(\mathbf{X})), \quad (3)$$

где $|u(t)| \leq 1$, $\psi(\mathbf{X})$ — искомая функция переключения, причем $\psi(\mathbf{X}) = 0$ — поверхность переключения, проходящая через начало координат $\psi(0) = 0$.

Стандартное решение задачи подразумевает подстановку управления (3) в уравнение Беллмана, что приводит к известным проблемам, связанным с решением нелинейного уравнения Беллмана в частных производных даже в случае линейного объекта. При этом функция Беллмана должна иметь непрерывные частные производные по всем переменным, т. е. должна быть непрерывно дифференцируемой, что часто невыполнимо, например, в оптимальных по быстродействию системах.

Как известно, если проблемы не решаются на том уровне, где они появились, то необходимо подняться на уровень выше, на более высокую ступень понимания законов природы. Уместно привести здесь слова А. Эйнштейна: "Нельзя решить любую проблему на уровне технических знаний, на которых она возникла". Возникшие проблемы трудно решить чисто математически: математика без физики — глупа, физика без математики — слепа. Мир и процессы в нем многогранны и взгляд на проблемы хотя бы еще со стороны физики приводит к основному функциональному уравнению относительно искомой функции переключения (по А. А. Красовскому — скорости проникновения поверхности переключения):

$$\begin{aligned} \dot{\psi}(\mathbf{X}) &= \frac{d\psi}{dt} = \frac{d\psi}{dx_1} \dot{x}_1 + \frac{d\psi}{dx_2} \dot{x}_2 + \dots + \frac{d\psi}{dx_n} \dot{x}_n = \\ &= \mathbf{GA} + \mathbf{GB}u \end{aligned} \quad (4)$$

или

$$\dot{\psi}(\mathbf{X}) = f(\mathbf{X}) + \varphi(\mathbf{X})u. \quad (5)$$

Здесь $f(\mathbf{X}) = \mathbf{GA} = g_1(\mathbf{X})a_1(\mathbf{X}) + g_2(\mathbf{X})a_2(\mathbf{X}) + \dots + g_n(\mathbf{X})a_n(\mathbf{X})$; $\varphi(\mathbf{X}) = \mathbf{GB} = g_n(\mathbf{X})b_n(\mathbf{X})$, $\mathbf{G} = (g_1, g_2, \dots, g_n)$, $g_i = \partial\psi/\partial x_i \neq 0$ — неизвестные искомые функции.

Функциональное уравнение (5) справедливо во всем фазовом пространстве [4], поскольку оно является обобщенным эквивалентным уравнением объекта (1). Отметим, что соотношение (5) использовали в своих трудах многие авторы, например,

А. А. Красовский в аналитическом конструировании регуляторов (АКР) по критерию обобщенной работы для определения условия возникновения скользящего режима; Я. З. Цыпкин, Е. А. Барбашин и В. И. Уткин в исследованиях скользящих режимов; А. А. Колесников в синергетической теории управления, который назвал соотношение (5) агрегированной моделью или обобщенным функциональным уравнением и обосновал данное название. Обоснование того, что уравнение (5) эквивалентно уравнениям (1), можно найти также в трудах Ю. Н. Павловского и Ю. П. Петрова.

Из физических принципов работы эквивалентного объекта (5) следует, что управление (3) неизбежно переведет объект (5) на поверхность переключения $\psi(\mathbf{X}) = 0$, и это означает, что первый интервал управления (3) закончился.

Воспользовавшись трудами Е. А. Барбашина и используя соотношение (5), можно показать [4], что для дальнейшего управления объектом для изменения знака скорости проникновения $\dot{\psi}(\mathbf{X})$ на втором интервале, т. е. для удержания объекта на (вдоль) поверхности переключения $\psi(\mathbf{X}) = 0$, необходимо выполнить условие управляемости (реализуемости) релейной системы в виде нестрогого равенства

$$|f(\mathbf{X})| \leq \varphi(\mathbf{X}), \quad \varphi(\mathbf{X}) > 0, \quad (6)$$

которое легко осуществить в виде подчиненного управления аналогично случаю ограничения координат. Можно показать [4], что условие (6) является одновременно и условием устойчивости движения системы на втором интервале, и условием возникновения скользящего режима. Чем ближе условие (6) к строгому равенству, тем более быстрым будет процесс управления второго интервала, а при равенстве получим оптимальное быстроедействие на втором интервале. Однако появляется проблема: управление на втором интервале чисто математически по формуле (3) определить невозможно, поскольку на этом интервале $\psi(\mathbf{X}) = 0$.

Воспользовавшись трудами В. И. Уткина, можно показать, что в силу оптимального управления (3) на втором интервале появляется эквивалентное (особое) управление, следующее из уравнения (5): $u_2 = -f(\mathbf{X})/\varphi(\mathbf{X})$ и не определяемое современными математическими методами. В реальных системах характеристики реле не идеальны, в результате управление изменяет знак несколько позже, чем изменяется знак $\psi(\mathbf{X})$, поэтому эквивалентное управление второго интервала математически точно можно представить в виде

$$u_2 = -(f(\mathbf{X})/\varphi(\mathbf{X}))\text{sign}(f(\mathbf{X})), \quad (7)$$

причем $|u_2| \leq 1$, а подсигнатурная функция $f(\mathbf{X})$ играет роль функции переключения $\psi_2(\mathbf{X}) = f(\mathbf{X})$ при движении системы на втором интервале вдоль многообразия $\psi_1(\mathbf{X}) = \psi(\mathbf{X}) = 0$.

Решим последнее уравнение относительно самой младшей координаты x_1 : $x_1 = -\psi^*(x_2, x_3, \dots, x_n)$ и

подставим последнее соотношение в уравнение (7). Воспользовавшись трудами А. А. Колесникова, приходим к выводу о сжатии фазового пространства, в котором уже не будут координаты x_1 . Поэтому условие (6) можно назвать условием сжатия фазового пространства. При применении последовательно $(n - 1)$ раз условия (6) фазовое пространство постепенно сжимается до единицы [4], причем

$$|u_n| < |u_{n-1}| < \dots < |u_2| < |u| = 1, \\ u_i = -\frac{f_{i-1}(x_i, \dots, x_n)}{\varphi_{i-1}(x_i, \dots, x_n)} \cdot \text{sign}[\psi_i(x_i, \dots, x_n)],$$

$i = 2, 3, \dots, n$, а последняя функция переключения $\psi_n(\mathbf{X}) = x_n$.

Функции $g_i(\mathbf{X}) \neq 0$ в уравнении (4) и условии (6) могут быть какие угодно, в частном случае (для облегчения интегрирования функции $\dot{\psi}(\mathbf{X})$) выбираем (например, произвольно) $g_i = \text{const} \neq 0$ (что означает решение задачи управления с оптимальной точностью с помощью линейных обратных связей).

В частном случае, при $g_i = \text{const} \neq 0$ из уравнения (4) получаем искомое решение задачи в отклонениях:

$$\psi(\mathbf{X}) = g_1 x_1 + g_2 x_2 + \dots + g_n x_n \\ \text{и } u = -\text{sign}(\psi(\mathbf{X})), \quad (8)$$

где вместо отклонений x_i необходимо подставить реальные координаты $x_i \Rightarrow x_i - x_{i\text{зад}}$ или $x_i \Rightarrow x_i - x_{i\text{возм}}$. Здесь $x_{i\text{зад}}$ — задание (управление) по соответствующей координате, $x_{i\text{возм}}$ — возмущающие воздействия (задания) или помехи (это тоже управления, но неизвестные нам, они могут быть как вредными, так и полезными, ради которых и создается система, например, момент нагрузки, который мешает искомому управлению).

Прикладная интерпретация применительно к электроприводам

Применительно к электроприводам (это объект, как правило, третьего порядка с одним входом управления) различают три основные задачи (по числу независимых координат): управление моментом (током) x_3 , управление скоростью x_2 и управление положением вала привода x_1 .

Найденное управление (8) получено из уравнений возмущенного движения и сводит к нулю (оптимально по точности) все отклонения (возмущения), по какой бы причине они ни возникли. Следовательно, управление в отклонениях (8) можно использовать для определения оптимального управления по любой реальной координате.

Например, управление по реальной координате x_1 (угол поворота вала двигателя):

$$u = \text{sign}(x_{1\text{зад}} - x_1 - a x_2 + b(x_n - x_3)),$$

где $a = g_2/g_1$; $b = g_3/g_1$; x_n — возмущение по координате x_3 (по току), пропорциональное моменту

нагрузки. Так как момент нагрузки неизвестен, то отклонение тока $x_3 - x_H$ выражают часто через производные от координат из уравнений объекта (1), причем производные получают с помощью наблюдающих за реальными координатами объекта устройств, используя для синтеза наблюдающих устройств тот же рассматриваемый метод.

Управление по другой реальной координате x_2 (скорость вращения вала двигателя):

$$u = \text{sign}(x_{2\text{зад}} - x_2 + c(x_H - x_3)),$$

где $c = g_3/g_2$.

Управление по x_3 (ток двигателя или момент):

$$u = \text{sign}(x_{3\text{зад}} - x_3).$$

Здесь $g_1 = g_2 = 0$. Можно показать [4], что управление по току двигателя (моменту) будет оптимально одновременно и по быстродействию.

Применяя метод подчиненного управления, также легко определить управление при ограничении любых координат [4] или их комбинаций, например, условие (6).

Часто возникает задача управления двумя координатами. Например, в приводе сканера антенны необходимо стабилизировать скорость и одновременно положение вала привода на каждом периоде вращения. Управление по реальной координате x_2 (скорость):

$$u = \text{sign}(x_{2\text{зад}} - x_2 + a(x_H - x_3) + b(x_{1\text{зад}} - x_1)).$$

Из последнего выражения следует, что в приводе сканера антенны необходимо искусственно организовать дополнительный вход возмущения (управления) по координате $x_{1\text{зад}}$, выполняющий роль полезного возмущения. Поскольку $x_{1\text{зад}}$ должна быть линейно возрастающей функцией: $x_{1\text{зад}} = x_2 t + \varphi_{\text{зад}}$, что трудно реализовать, можно взять в качестве датчика, например, вращающийся трансформатор, вал которого соединен с валом привода. При этом $x_{1\text{зад}} = \sin(x_2 t + \varphi_{\text{зад}})$. Для увеличения точности позиционирования можно использовать и вторую (косинусную) обмотку вращающегося трансформатора.

Иллюстрация полученных результатов исследования

Пусть электропривод постоянного тока задан системой уравнений в отклонениях:

$$\dot{\varphi}' = \omega; \quad \dot{\omega}' = i; \quad i' = u; \quad |u| \leq 1, \quad (9)$$

где φ — угол поворота вала привода; ω — скорость вращения вала двигателя; i — сила тока двигателя.

Это система третьего порядка. Здесь три интервала, и необходимо принудительно выполнить два ограничения (6) или доказать, что они автоматически выполняются.

Составим функциональное уравнение (3) для объекта (9), предполагая $g_i = \text{const} \neq 0$, $g_1 = 1$:

$$\psi'(X) = \varphi' + a\omega' + bi' = \omega + ai + bu. \quad (10)$$

Запишем условие (6) для первого интервала: $|\omega + ai| \leq b$ или

$$|\psi_2| \leq 1, \quad \psi_2 = \frac{\omega + ai}{b}, \quad (11)$$

где ψ_2 — функция переключения второго интервала.

Функциональное уравнение второго интервала:

$$\psi_2' = \frac{\omega' + ai'}{b} = \frac{i + au}{b}.$$

Условие (6) для второго интервала: $|i| \leq a$ или

$$|\psi_3| \leq 1, \quad \psi_3 = \frac{i}{a}, \quad (12)$$

где ψ_3 — функция переключения третьего интервала.

Интегрируя уравнение (10) и используя принцип подчиненного управления для учета ограничений (11) и (12), запишем оптимальное по точности управление для реальных координат:

$$u = \text{sign} \left(\text{sign} \left(\text{sign} \left(\sin(\omega_{\text{зад}} t - \sin \varphi + a(\omega_{\text{зад}} - \omega) + b(i_H - i)) - \frac{\omega + ai}{b} \right) - \frac{i}{a} \right) \right), \quad (13)$$

где $\varphi_{\text{зад}} = 0$ и $i_H = 0$.

На рис. 1 (см. вторую сторону обложки) приведены результаты моделирования объекта (9) с управлением (13) в режиме разгона привода.

Исследование работы объекта (9) с управлением (13) в режиме разгона и вывода на заданную скорость, например $\omega_{\text{зад}} = 90 \text{ с}^{-1}$, и наибольшим быстродействием приводит к величинам $a = 1$ и $b = 4,75$, при этом ограничения (11) и (12) выполняются автоматически, и их нет необходимости учитывать:

$$u = \text{sign}(\text{sign}(\sin(\omega_{\text{зад}} t - \sin \varphi - \omega - 4,75i))). \quad (14)$$

Из рис. 1 следует, что отработка заданной скорости происходит оптимально по быстродействию. На графике управления (рис. 1) не показан скользкий режим, возникающий по окончании переходного процесса. На рис. 2 (см. третью сторону обложки) приведены результаты моделирования объекта (9) с управлением (13) или (14) в режиме стабилизации скорости и отработки угла поворота вала привода.

Из рис. 2 следует, что при стабилизации скорости отработка угла в системе происходит практически с нулевой ошибкой (в данном случае ошибка вызвана дискретностью вычислений при моделировании на ЦВМ).

Таким образом, к настоящему моменту времени сотрудниками кафедры электротехники и электрооборудования ТулГУ предложены пути решения проблем, связанных с оптимальными по точности системами управления нелинейными объектами высокого порядка.

Дальнейшее рассмотрение проблем оптимального управления с точки зрения физики с привлечением математики и учетом законов природы позволит решить главную проблему теории оптимальных систем — проблему оптимального быстродействия.

1. Красовский А. А. Проблемы физической теории управления // Автоматика и телемеханика. 1990. № 11. С. 3—28.
2. Филимонов Н. Б. Методологический кризис "всепобеждающей математизации" современной теории управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Том 17, № 5. С. 291—299.
3. Сурков В. В., Сухинин Б. В., Ловчаков В. И., Феофилов Е. И. Оптимальные управления в релейных системах // Известия вузов. Электромеханика. 2002. № 6. С. 29—35.
4. Сурков В. В., Сухинин Б. В., Ловчаков В. И., Соловьев А. Э. Аналитическое конструирование оптимальных регуляторов по критериям точности, быстродействию, энергосбережению. Монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2005. 300 с.

To the Question on Methodological Crisis of the Modern Theory of Optimum Control

B. V. Suhinin, eeo@uic.tula.ru, V. V. Surkov, vvs150747@mail.ru,
The Tula State University, Tula, 300012, Tula Branch, Russian Federation

Corresponding author: Surkov Victor V., Dr. Sci. Tech., Prof.,
The Tula State University, Tula, 300012, Tula Branch, Russian Federation,
e-mail: vvs150747@mail.ru

Accepted on September 07, 2017

It is known that if problems do not dare at that level where they have appeared — it is necessary to rise on level above, on a higher step of understanding of laws of the nature. Optimum control problems cannot be solved purely matematically: the mathematics without physics — is silly, the physics without mathematics — is blind. It is offered to look at problems of a method of dynamic programming of R. Bellman having methodological value, at least still from outside the physical phenomena. It allows to solve optimum control problems multidimensional installation of a high order, in that count also nonlinear. The principle of R. Bellman has a methodological importance — it is possible to control everything and everybody if three conditions are met: the object of control is known, the ultimate goal of control is known and the criterion of an estimation of quality of control is known. If there is no at least one of them — there is no sense to get down to the solution of a control problem. It is meant that there are at least two co-operating blocks in control tasks: the control object and the subject of control, i.e. a person (manual control) or a control system — an automatic steering block which often called a regulator. Questions of the optimum control theory with reference to technics and, in particular, to electric drives are considered in this paper. Ways to solve the problems of control systems optimum on accuracy for nonlinear objects of high order are offered. By example of a direct-current drive it is shown that usage of the physical and mathematical theory will allow to achieve small errors (no more than 20 arc sec.) on minimal speeds of tracking (up to 0,01 deg./sec.) with friction torque and load fluctuations during operation, with presence of a reducer backlash that is 10 times greater than admissible error, with a nonrigid and unbalanced design of an actuator. The theory also allows to create a hi-tech industrial equipment (for ex., precision rigs) and prospective types of weapons and military equipment (for ex., high-precision radar tracking stations).

Keywords: analytical construction, optimum control, the decomposition, the subordinated control, optimum accuracy, optimum speed, stability, the functional equation, a controllability condition

For citation:

Suhinin B. V., Surkov V. V. To the Question on Methodological Crisis of the Modern Theory of Optimum Control, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 1, pp. 26—30.

DOI: 10.17587/mau.19.26-30

References

1. Krasovskij A. A. *Problemy fizicheskoy teorii upravleniya* (Problem of physical control theory), *Automatics and Teleautomatics*, 1990, no. 11. pp. 3—28 (in Russian).

2. Filimonov N. B. *Metodologicheskij krizis "vsepobezhdajushhej matematizatsii" sovremennoj teorii upravleniya* (Methodological crisis of "all-conquering mathematization" modern control theory), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, vol. 17, 2016, no. 5, pp. 291—299 (in Russian).
3. Surkov V. V., Suhinin B. V., Lovchakov V. I., Feofilov E. I. *Optimal'nye upravleniya v relejnyh sistemah* (Optimum of control in relay systems), *Izvestija Vuzov. Jeletromehanika*, 2002, no. 6, pp. 29—35 (in Russian).
4. Surkov V. V., Suhinin B. V., Lovchakov V. I., Solov'ev A. E. *Analiticheskoe konstruirovanie optimal'nyh reguljatorov po kriterijam tochnosti, bystrodejstviju, jenergosberezeniju*, (Analytical's construction of optimum regulators by criteria of accuracy, speed, power savings), Tula, Publishing house of TulGU, 2005, 300 p. (in Russian).