

Г. А. Рустамов, д-р техн. наук, проф., gazanfar.rustamov@gmail.com,
М. Б. Намазов, канд. техн. наук, доц., mnamazov@beu.edu.az,
Бакинский инженерный университет, г. Баку, Азербайджан,
А. Ю. Гасымов, докторант, asif1964@mail.ru,
Р. Г. Рустамов, докторант, rustamzade.nigar@gmail.com,
Азербайджанский технический университет, г. Баку, Азербайджан

Управление динамическими объектами в условиях неопределенности в точечном скользящем режиме

Обсуждается развитие широко известного скользящего режима, который в классической постановке не нашел должного развития применительно к системам управления. В качестве альтернативы предлагается методика организации одной из разновидностей скользящего режима, называемой здесь "точечным скользящим режимом". Отличительная особенность этого режима заключается в том, что разрывы управления происходят в равностоящих по времени точках линии (гиперплоскости) переключения, что позволяет достичь начала координат за конечное число переключений. Возможность изменения временного интервала между этими точками позволяет получить различные режимы: финитный режим, при котором из любого начального состояния заданная точка достигается за одно переключение, причем в этом режиме линия переключения является "изохроной"; точечный скользящий режим, при котором заданная точка достигается за конечное число переключений; предельный режим, когда длина временных интервалов стремится к нулю, а частота переключений — к бесконечности. С учетом этой особенности вводится понятие "степень скольжения".

Показано, что при вынужденном движении в системах с переменной структурой наблюдается срыв скользящего движения, что не позволяет обеспечивать инвариантность относительно внешних возмущений. Предлагаются два способа устранения вынужденной составляющей движения. Одно из преимуществ использования точечного скользящего режима заключается в том, что в целях улучшения работоспособности не требуется использовать пограничный слой, который реализуется путем ввода в алгоритм управления различных логических условий.

Практическая значимость точечного скользящего режима заключается в том, что при небольшой частоте переключений он позволяет поддерживать показатели качества неопределенного объекта в допустимых пределах. Исследования проводились для одномерных линейных систем (SISO) второго порядка. Результаты могут быть обобщены на многомерные системы более высокого порядка.

Решение модельных задач на MATLAB/Simulink позволяет сделать ряд положительных выводов, имеющих важное прикладное значение в смысле расширения области использования скользящих режимов, особенно применительно к управлению неопределенными объектами.

Ключевые слова: скользящий режим, параметрическая неопределенность, разрывное управление, срыв скользящего режима, астатизм, робастность

Введение

Одним из прикладных направлений управления динамическими объектами в условиях неопределенности является применение особых режимов, в частности режимов скольжения [1–14]. Несмотря на классическое происхождение теории скользящих режимов в некоторых инженерных задачах это направление сохраняет свою актуальность [10–12]. После некоторого доопределения и регуляризации скользящий режим нашел математическую корректность, однако он не всегда является полезным для решения соответствующей практической задачи.

Причина появления теории скользящего режима, по-видимому, связана с желанием двигаться по заданной "искусственной фазовой траектории" при конечных коэффициентах усиления. В простом случае в качестве такой траектории используется прямая линия (или пересечение плоскостей в случае фазового пространства), проходящая через начало

координат. Одним из простых приемов организации движения по искусственным траекториям является "склеивание" отрезков двух фазовых портретов, пересекающих гиперплоскость навстречу друг другу. Отрезки фазовых траекторий лежат по разные стороны от плоскости переключения, причем результирующий вектор фазовой скорости должен быть направлен вдоль линии переключения к началу координат [1, 2]. При стремлении частоты переключений к бесконечности в пределе постулируется, что движение системы происходит по поверхности переключения, и возникает скользящий режим. При этом движение описывается непрерывным дифференциальным уравнением гиперплоскости, порядок которого на единицу меньше порядка системы. Кроме того, движение по "искусственной фазовой траектории" происходит при конечном значении переключаемых коэффициентов. Одновременно известен альтернативный вариант линейного управления с достаточно большим

коэффициентом усиления [2, 6, 15, 17, 18, 22]. В пределе при бесконечно большом коэффициенте усиления из-за выпрямления фазового пространства все траектории стягиваются к "искусственной фазовой траектории", которой соответствует "медленная составляющая" движения [17]. Эта траектория является разомкнутым аттрактором, конец которого находится в точке равновесия [22]. Реализация большого коэффициента усиления требует потребления значительной энергии. Поскольку в реальной системе достаточно обеспечивать ограниченные значения показателей качества и запасов устойчивости, то при реализации коэффициент усиления принимает вполне допустимое большое значение.

В реальной системе скользящий режим соответствует движению не по поверхности разрыва, а в некотором пограничном слое, благодаря которому происходит движение. Для физической реализуемости разрывного движения пограничный слой так или иначе должен существовать. При этом система функционирует в квазискользящем режиме. При стремлении ширины пограничного слоя к нулю происходит "заклинивание" траектории. Эту особенность можно наблюдать при компьютерном моделировании системы на MATLAB/Simulink при релейном управлении $u = K \text{sign}s$, ввиду того, что блок "Sign" благодаря программной реализации имеет ничтожно малую ширину гистерезиса.

Скользящий режим обладает рядом замечательных свойств, не относящихся ни к одной из отдельных структур: расширяются динамические возможности системы; удается получить стабильное качество переходных процессов по гиперплоскости скольжения, поскольку ее параметры не зависят от реквизитов объекта; система наделяется двойной инвариантностью относительно неизмеряемых ограниченных параметрической и сигнальной неопределенностей; не используются средства адаптации, что позволяет избавиться от проблемы сходимости и квазистационарности при реализации; упрощается системотехническая структура; обеспечивается движение в нелинейных системах путем стыковки поверхностей скольжения, относящихся к различным областям притяжения.

Кажущийся на первый взгляд простым, метод разрывного управления в скользящем исполнении при реализации наталкивается на значительные трудности, связанные с тем, что устойчивость и долговечность исполнительных механизмов снижается и, кроме того,

могут возбуждаться источники высокочастотной паразитной динамики. Здесь подтверждается сомнительность решения сложных задач простыми инженерными приемами в соответствии со старой истиной: "чудес не бывает" [15—17]. Использование высокочастотных разрывных сигналов управления существенно ограничивает область применения скользящих режимов, особенно для управления промышленными и техническими объектами, которые имеют большую инерционность.

С практической точки зрения можно выделить два вида разрывного управления, обеспечивающих существование и устойчивость скользящего режима: релейное управление и управление с переключаемыми коэффициентами.

Релейное управление

Для организации скользящего режима релейное управление [9—12] (в простейшем случае двухпозиционное реле без зоны чувствительности и гистерезиса $u = K \text{sign}s$) переключается в зависимости от ошибки регулирования не на оси абсцисс $\dot{x} = 0$, а на линии $s = \dot{e} + c e = 0$. При достаточно большом значении K по этой линии из-за асимметрии возникает скользящий режим. Этим обеспечивается двойная инвариантность относительно неизмеряемых параметрических и внешних возмущений. Тем не менее релейный скользящий режим является неэкономичным с точки зрения энергопотребления. Кроме того, в малой окрестности точки равновесия сохраняются высокочастотные разрывные колебания управления с предельной амплитудой, вызывающие предельный цикл. Для исключения предельного цикла подключение в малой окрестности заданной точки обратной связи является не лучшим решением, поскольку может привести к потере инвариантности.

Управление с переключаемыми коэффициентами

Данный класс систем относится к системам с переменной структурой (СПС) [2—12]. Стабилизирующее управление по двум структурам с П-законом управления имеет следующий вид [2, 3]:

$$u_s = \begin{cases} u_s^+(\varepsilon), & \text{если } \sigma(s, \varepsilon) > 0; \\ u_s^-(\varepsilon), & \text{если } \sigma(s, \varepsilon) < 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\epsilon = (\epsilon \dot{\epsilon} \dots \epsilon^{(n-1)})$ — вектор-строка ошибок рассогласования; $\sigma(s, \epsilon)$ — функция переключения; $s = c_1 \epsilon + c_2 \dot{\epsilon} + \dots + \epsilon^{(n-1)}$ — плоскость переключения.

Устранение нарушения скользящего режима.

Разрывное управление (1) обеспечивает скользящее движение по всей линии $s = 0$ только для систем со свободным движением, другими словами, двигающихся без влияния внешних сил (уставки и внешних возмущений) под воздействием ненулевых начальных условий. При этом оба фазовых портрета являются центральными — точка равновесия находится в начале координат. При вынужденном движении, когда действуют внешние силы, из-за смещения точек равновесия по мере приближения к началу координат наблюдается срыв скользящего режима [9].

Для устранения срыва можно использовать следующие способы:

- использование корректирующего управления u_k , которое при каждом нарушении скользящего режима, подобно многоуровневому релейному сигналу, ступенчато возрастает [9];
- для априори известных входов (уставки и возмущения) с помощью дополнительного астатического регулятора система наделяется астатическим свойством, при котором статическая ошибка равняется нулю. Движение астатической системы из-за компенсации входов равносильно свободному движению.

Первый способ — использование корректирующего управления. На конкретном примере рассмотрим алгоритм устранения срыва скользящего движения при управлении колебательным объектом

$$\ddot{y}(t) + a_1 \dot{y}(t) + a_2 y(t) = bu + f(t); \quad (2)$$

$$u = u_s + u_k,$$

при вынужденном движении [9].

Здесь $a_1 = 0,5$, $a_2 = 1$, $b = 1$, $f(t) = \sin(2t)$. Пусть уставка $g(t) = 1(t)$. Стабилизирующее управление u_s определяется выражением (1) при $u_s^+ = \alpha = 2$, $u_s^- = \beta = -4$, $c = 0,8$. Корректирующее управление u_k формируется только при выходе фазовой траектории из пограничного слоя заданной ширины [9].

На рис. 1, а, б показаны динамические характеристики системы.

Из рис. 1 ясно видны интервалы нарушения скользящего режима и его восстановление. Сигнал компенсации u_k формируется только в точках нарушения скользящего движения 3, 2 и 1 (рис. 1, а). Переходная характеристика $y(t)$ после $t = 8$ с достигает своего заданного значения $g = 1$ (рис. 1, а). Недостатком этого способа является то, что алгоритм устранения срабатывает после обнаружения факта нарушения.

Второй способ — наделение системы астатизмом. В качестве обобщенной передаточной функции (ПФ) астатического регулятора будем использовать выражение [18]

$$W_A = \frac{M_A(s)}{s^\rho D_A(s)}, \quad (3)$$

где ρ — натуральное число; $\rho \in Z$, $\rho \geq 1$ — порядок астатизма по полиномиальному входу

$$g = a_0 + a_1 t + \dots + a_{\rho-1} t^{\rho-1};$$

$D_A(s)$, $M_A(s)$ — многочлены вида

$$D_A(s) = \sum_{i=0}^n d_i s^i, \quad M_A(s) = \sum_{j=0}^m m_j s^j,$$

причем $d_n = 1$.

Условие физической реализуемости ПФ (3): $m \leq \rho + n$.

Для обеспечения астатизма многочлен $D_A(s)$ должен содержать все чисто мнимые (граница колебательной устойчивости) и неустойчивые полюса (корни знаменателя) изображения входных сигналов как по уставке, так и по внешнему возмущению. Нулевые полюса (граница аperiodической устойчивости) включены в структуру самой ПФ (3). При таком под-

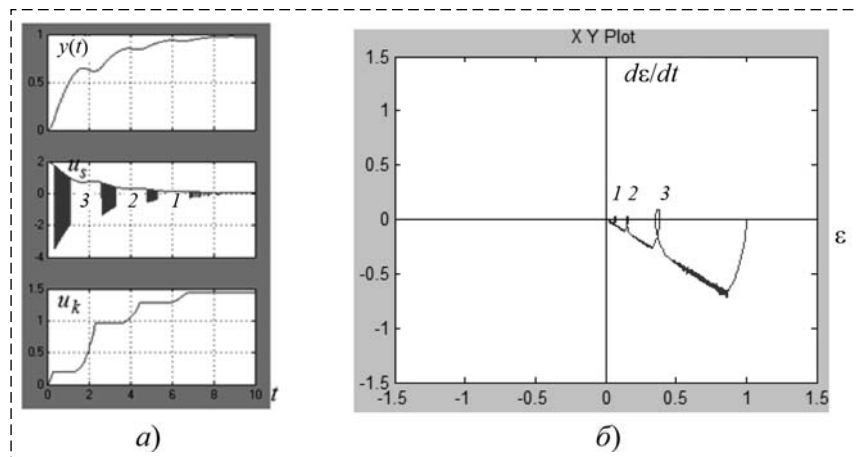


Рис. 1. Динамические характеристики системы с устранением нарушения скользящего режима (1, 2, 3 — точки нарушения скользящего режима)

Fig. 1. Dynamic characteristics of the system with elimination of sliding mode violation

ходе полюса астатического регулятора в качестве нулей входят и в ПФ замкнутой системы. В результате сокращения одинаковых нулей и полюсов вынужденная составляющая движения в одномерной по входу и выходу системе (SISO) компенсируется.

Многочлен $M_A(s)$ в простом случае может быть подобран из условия устойчивости замкнутой системы или определен из условия минимума некоторого интегрального критерия.

Для ясности рассмотрим пример построения астатического регулятора для объекта (2). Здесь входы системы $g(t) = 1(t)$, $f(t) = \sin(2t)$. Соответствующие изображения $G(s) = 1/s$, $F(s) = 2/(s^2 + 4)$. Полюсами являются $p_1 = 0$, $p_{2,3} = \pm 2i$. Разложения по полюсам $s = 0$, $(s + 2i)(s - 2i)$ должны входить в знаменатель $D(s) = sD_A(s) = (s - 0)(s + 2i)(s - 2i)$ ПФ (3). Поскольку не имеются устойчивые полюса, которые можно и не включить в $D(s)$, то можно просто написать $D(s) = s(s^2 + 2)$. Если среди входов имеются одинаковые полюса, то используется один из них. Для числителя принимаем $M_A(s) = m_0 + m_1s$. Если этим невозможно повлиять на все неустойчивые моды характеристической матрицы системы, то порядок числителя можно увеличивать включительно до $m = 3$.

Таким образом, при указанных входах астатический регулятор имеет вид

$$W_A = \frac{m_1s + m_0}{s(s^2 + 4)}.$$

Выход u_s стабилизирующего регулятора с переменной структурой (1) подается на вход астатического регулятора (3). Поскольку модифицированная система совершает свободное движение, то с помощью скользящего режима можно обеспечить инвариантность относительно параметрических неопределенностей в пределах выполнения условия существования и устойчивости скользящего режима $s\dot{s} < 0$, которое при использовании астатического регулятора зависит только от параметров системы.

Соотношение $s\dot{s} < 0$ можно легко получить, если в методе функции Ляпунова принимать $V = 1/2\epsilon^T Q \epsilon$, где $\text{rank} Q = 1$. При этом получается разлагающаяся на линейные множители квадратичная форма $V = (1/2)s^2$, производная по времени которой равна $\dot{V} = s\dot{s}$, а достаточным условием устойчивости является условие $s\dot{s} < 0$ [8].

Недостатки использования астатического регулятора:

- увеличение порядка системы; даже при простом стационарном гармоническом сигнале $f(t) = \sin(2t)$ порядок системы увеличивается на 2 единицы;
- потеря грубости при неточном сокращении нулей с полюсами;
- для решения задачи синтеза уставка и внешнее возмущение должны быть априори известными;
- зависимость ПФ астатического регулятора от типа $g(t)$, $f(t)$ и при их изменении необходимость перестройки регулятора.

Реализация точечного скользящего режима

Из-за наличия инерционности и запаздывания в различных узлах реальная система функционирует в квазискользящем режиме. Построение алгоритмов управления, позволяющее получить квазискользящий режим, связано с вводом пограничного слоя вдоль линии разрыва $s = 0$. В этом направлении существует множество способов и технических решений.

Отметим основные из них:

- организация движения по пограничному слою $s(t) \equiv s(t) \mp \delta$;
- задержка функции переключения $s(t) \equiv s(t - \tau)$;
- использование двухпозиционного реле с зоной нечувствительности $u = 0$, если $s(t) \leq |s_0|$, а также с отстающим гистерезисом;
- использование релейно-линейного управления $u = \text{sat}(\epsilon, \Delta)$, где Δ — интервал линейности;
- включение в цепь обратной связи инерционного звена с малой постоянной времени;
- использование нечеткого скользящего режима [7, 23].

При реализации указанных способов могут возникнуть затруднения системотехнического характера и сложность настройки.

В данной статье предлагается совершенно иной способ организации квазискользящего режима, где переключение управления осуществляется в изолированных точках плоскости переключения $s = 0$, причем фазовая траектория системы между этими точками остается в малой окрестности плоскости переключения без введения каких-либо специальных коридоров.

Близость отрезков траекторий к $s = 0$ зависит от временного интервала между точками разрыва, который является постоянным и за-

дается при настройке регулятора. Максимальное удаление от $s = 0$ наблюдается, когда фазовая траектория достигает начала координат за одно переключение.

Идея используемой нами методики связана с работой Т. Мицумаки, представленной на 1-м конгрессе IFAC в 1960 г. (г. Москва) [19], в которой предложен новый метод регулирования, предусматривающий аппроксимацию оптимальной кривой переключения прямой линией в задаче оптимального быстродействия второго порядка. Угловой коэффициент линии переключения выбирается таким образом, чтобы траектория из любого начального состояния достигала начала координат за одно переключение. В целях предотвращения скользящего режима вторая часть траектории после попадания изображающей точки на линию переключения $s = 0$ формируется постоянным управлением, пропорциональным абсциссе точки попадания. При "неправильной" настройке в малой окрестности линии $s = 0$ наблюдалось движение (от точки к точке), состоящее из отрезков второй структуры, вызванное многократным переключением управления. Однако подобный режим был "отбракован" и его робастное свойство, которое могло бы быть использовано для управления неопределенных объектов, осталось без внимания. В настоящее время возможность компьютерного моделирования системы управления на *MATLAB/Simulink* позволило обнаруживать эффекты, не доступные используемым в то время графоаналитическим исследованиям.

Методика аппроксимации оптимальной линии переключения прямой линией в задаче оптимального быстродействия проанализирована также в работе [20]. В зависимости от начальных условий выделены различные режимы движения: движение по оптимальной линии переключения (парабола) для весьма ограниченного множества начальных условий; движение по аппроксимирующей линии в скользящем режиме; последовательное движение — режим переключений, далее режим скольжения.

Отличительная особенность алгоритма Т. Мицумаки состоит в том, что при определенной настройке из произвольного начального состояния начало координат достигается за одно переключение. Эта особенность указывает на высокую степень оптимальности и системотехническое преимущество данного способа управления.

Учитывая результаты [19], уравнение регулятора с переменной структурой, реализующего точечный скользящий режим, представим в следующем виде:

$$u = \begin{cases} -\alpha\varepsilon, & \text{если } \sigma > 0; \\ \beta\varepsilon_s = \text{const}, & \text{если } \sigma < 0. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь $\sigma = s\varepsilon$ — функция переключения; $s = \dot{\varepsilon} + c\varepsilon = 0$ — линия переключения; $\alpha, \beta, c > 0$ — параметры настройки; $\varepsilon = g - y$ — ошибка регулирования; g — уставка (задание); $\varepsilon_s \in \{\varepsilon : s = 0\}$ — абсцисса точки попадания изображающей точки на линию $s = 0$.

Прототипом (4) является классический полупропорциональный регулятор В. Фернера [21], в котором переключение структур проводится на оси абсцисс $\dot{\varepsilon} = 0$. Это приводит к "режиму переключений", при котором переходная характеристика является чрезмерно колебательной. По-видимому, эта особенность и стала причиной, ограничивающей дальнейшее развитие указанного направления.

Разрывное управление (4) позволяет получить различные режимы:

- финитный режим — из произвольного начального состояния начало координат (заданная точка) достигается за одно переключение. Линия переключения является "изохроной";
- точечный скользящий режим — заданная точка достигается за конечное число переключений управления. Этот режим используется для управления параметрически неопределенными объектами при существенно меньшей частоте переключений управления, чем обычный скользящий режим;
- движение по $s = 0$, когда число переключений стремится к бесконечности.

Кроме того, в малой окрестности начала координат исключается возникновение предельного цикла.

Результаты моделирования

На рис. 2, *a—г* показаны динамические характеристики указанных выше режимов. Моделирование выполнено на *MATLAB/Simulink* при уставке $g = 1(t)$, параметрах настройки $\alpha = 1, \beta = -2, c = [0,5; 1,5; 2]$ и астатическом объекте типа "двойной интегратор" $W_{ob} = 1/s^2$.

Важной задачей является исследование робастных свойств системы относительно параметрических и внешних возмущений. Не

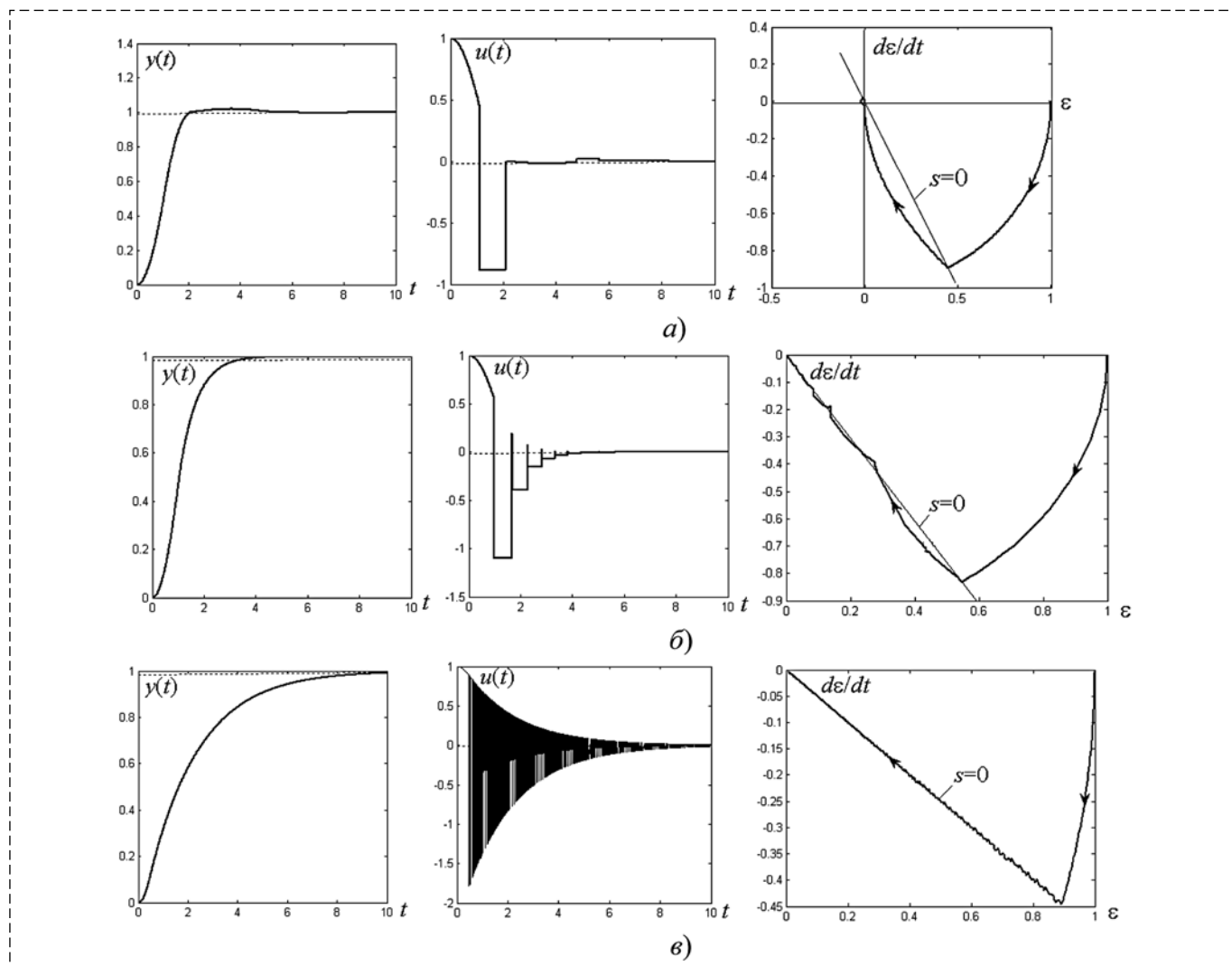


Рис. 2. Динамические характеристики системы при различных режимах:

a — финитный режим; *б* — точечный скользящий режим; *в* — точечный скользящий режим с большим числом переключений

Fig. 2. Dynamic characteristics of the system in various modes:

a — finite mode; *б* — point sliding mode; *в* — point sliding mode with a large number of switching

нарушая общности, исследование робастных свойств точечного скользящего режима будем выполнять на примере инерционного объекта 1-го порядка:

$$W_{ob} = \frac{k}{Ts + 1},$$

где T — постоянная времени; k — коэффициент усиления объекта.

Чтобы не повысить порядок системы, в качестве входов принимаем простые сигналы типа "единичный скачок" $g(t) = f(t) = 1(t)$. Тогда, согласно общей методике, при номинальных параметрах $T = 2,5$; $k = 2$ астатический регулятор (3) примет вид: $W_A = 1,25/s$. При моделировании использовано дифференциальное уравнение

$$\dot{y}(t) = -ay + bu.$$

Пусть объект имеет параметрическую неопределенность на интервале $0 \leq a \leq 1$, $b = 1$. На указанном интервале изменения параметра должно выполняться условие $s\dot{s} < 0$.

На рис. 3 при $\alpha = 2$, $\beta = -2$, $c = 2$ показана схема моделирования системы.

На схеме основным функциональным узлом является блок с управляемой памятью со сбросом "If Action".

На рис. 4 представлены характеристики системы для трех значений параметра $a = \{0, 0,4, 1\}$. Как видно из рис. 4, *a*, пучок переходных характеристик $\{y(t)\}$ для большого разброса параметра системы имеет высокую концентрацию, что позволяет убедиться в том, что в точечном скользящем режиме, как и в обычном, система обладает робастным свойством. Однако частота переключений здесь гораздо меньше (рис. 4, *б*).

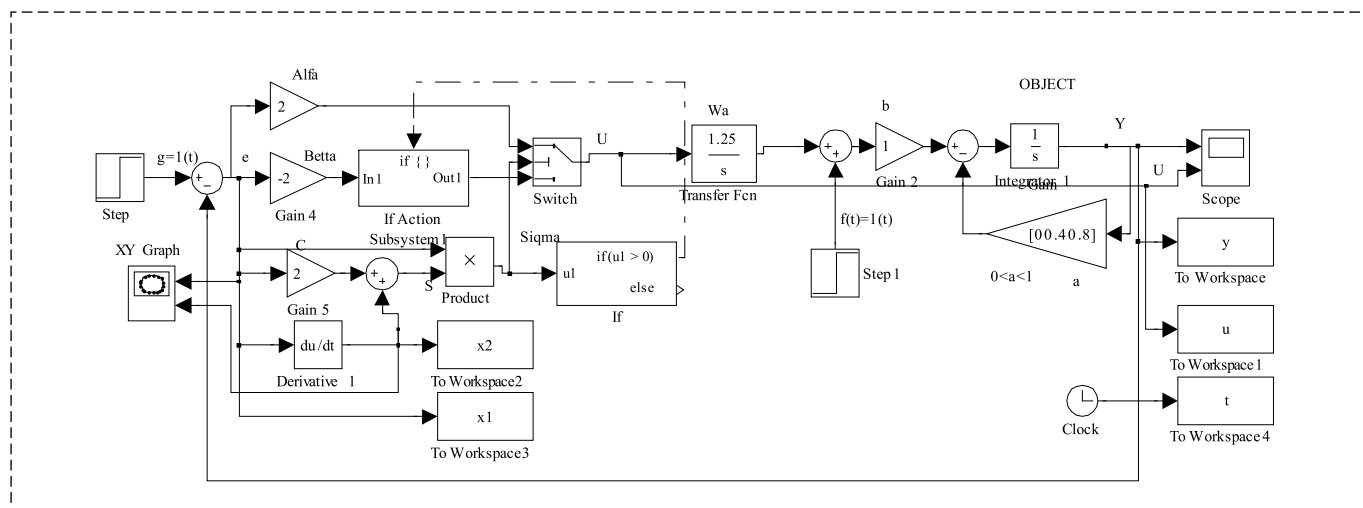


Рис. 3. Схема моделирования системы на *Simulink*
Fig. 3. *Simulink* system simulation diagram

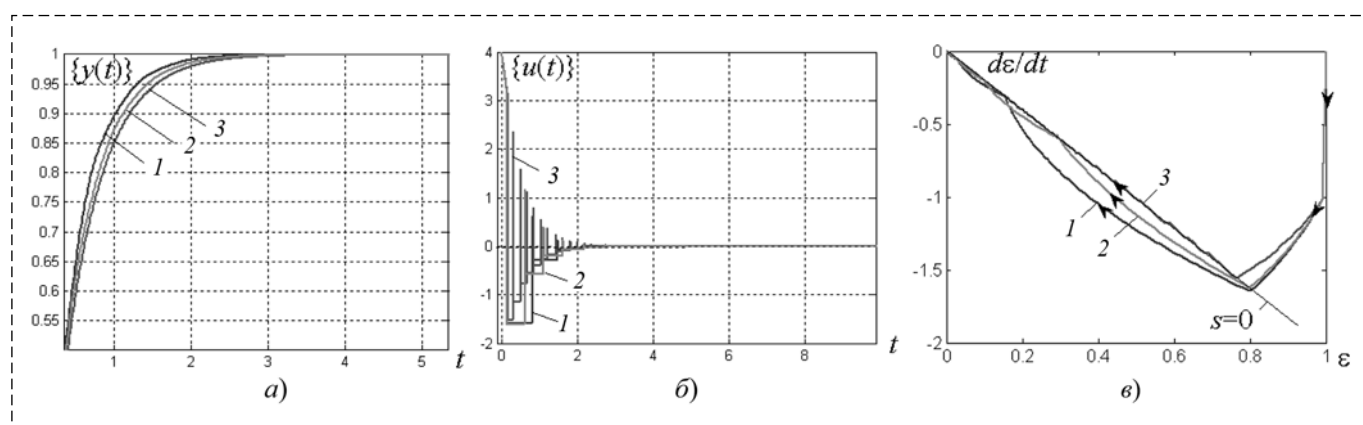


Рис. 4. Характеристики системы при параметрической неопределенности (1 — при $a = 0$; 2 — при $a = 0,4$; 3 — при $a = 0,8$)
Fig. 4. System characteristics with parametric uncertainty (1 — at $a = 0$; 2 — at $a = 0,4$; 3 — at $a = 0,8$)

Кроме того, все фазовые траектории после попадания на линию переключения $s = 0$ двигаются в начало координат по ее малой окрестности (рис. 4, в). Этим еще раз подтверждается небольшой разброс переходных характеристик $\{y(t)\}$.

Для количественной оценки показателя робастности можно использовать методику, предложенную в работе [22].

Заключение

Рассматриваемая в статье задача является классической, современное компьютерное моделирование позволило выявить ряд эффектов, не обнаруженных в результате графоаналитических исследований.

В работе предложена одна из разновидностей скользящего режима, отличительной осо-

бенностью которой является тот факт, что разрывы управления происходят в равностоящих по времени точках линии (гиперплоскости) переключения. Такой подход позволяет, во-первых, достичь начала координат как за одно (финитный режим), так и за конечное число переключений.

Поскольку частоту точечного скользящего режима можно регулировать, то в дальнейших исследованиях можно использовать понятие "степень скользящего режима": $0 \leq \theta \leq 1$. При $\theta = 0$ начало координат достигается за одно переключение. При этом линия переключения используется для аппроксимации оптимальной кривой переключения в задачах оптимального быстрогодействия. Линия переключения является "изохроной", т. е. попавшие на эту линию все траектории после переключения достигают начала координат за одинаковое время. Эту особенность можно использовать в различных

областях физической технологии, также и в военном деле.

$\theta = 1$ соответствует предельной частоте. Этот режим целесообразно использовать для управления в условиях существенной неопределенности.

Управление второй структурой каждый раз корректируется в зависимости от координаты точки попадания (которая уменьшается по мере приближения к началу координат), т. е. имеет дискретную обратную связь. Такая зависимость позволяет автоматически поддерживать участки фазовой траектории между точками разрыва в малой окрестности линии переключения. Также исключается возникновение предельного цикла. Поэтому не приходится дополнять систему различными логическими конструкциями в целях создания пограничного слоя.

Для восстановления срыва скользящего режима при вынужденном движении предложены два способа. Первый из них основан на интегрировании участков траектории, вышедших за пределы пограничного слоя. Второй способ предусматривает наделение системы астатическим свойством для априори известных входов (уставка и возмущение). При этом движение системы состоит только из свободной составляющей.

Практическая значимость точечного скользящего режима заключается в том, что при небольшой частоте переключений он позволяет поддерживать показатели качества неопределенной системы в допустимых пределах. Кроме того, расширяется множество комбинаций переключаемых структур (фазовых портретов).

Исследования проводились для одномерных линейных систем (SISO) второго порядка. Результаты могут быть обобщены на многомерные системы более высокого порядка.

Решение модельных задач на *MATLAB/Simulink* позволяет сделать ряд положительных выводов, имеющих важное прикладное значение в смысле расширения области использования скользящих режимов, особенно применительно к управлению неопределенными объектами.

Список литературы

1. Филиппов А. Ф. Приложение дифференциальных уравнений с разрывной правой частью к нелинейным задачам автоматического регулирования // Труды I Конгресса ИФАК. М.: Изд-во АН СССР, 1961.
2. Utkin V. I. Sliding Modes in Optimization and Control Problems. New York: Springer Verlag, 1992. 387 p.

3. Декарло Р. А., Жак С. Х., Мяттюз Г. П. Управление с переменной структурой нелинейными многомерными системами: Обзор // ТИИЭР. 1988. Т. 76, № 3. С. 4–27.
4. Levant A. Universal SISO sliding-mode controllers with finite-time convergence // IEEE Transactions on Automatic Control. 2001. Vol. 46, N. 9. P. 1447–1451.
5. Levant A. Principles of 2- sliding mode design // Automatica (Journal of IFAC). 2007. V. 43, Iss. 4. P. 576–586.
6. Емельянов С. В., Коровин С. К. Новые типы обратных связей: Управление в условиях неопределенности. М.: Наука, 1997. 352 с.
7. Lagrat I., Ouakka H., Boumhidi I. Fuzzy Sliding mode PI control for Nonlinear Systems // Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Simulation. Modelling and Optimization. Lisbon-Portugal. September 22–24. 2006. P. 534–539.
8. Rustamov G. A., Abdullayeva A. T., Elchuyev I. A. Realization of sliding motion in a nonlinear stabilization system based on the method of the Lyapunov function // Automatic Control and Computer Sciences. 2009. Vol. 43, N. 6. P. 336–341.
9. Mamedov G. A., Rustamov G. A., Gasanov Z. R. Elimination of the sliding mode breakdown in forced motion of controlled objects // Automatic Control and Computer Sciences. 2009. Vol. 43, N. 2. P. 74–79.
10. Бейранович В. А. Инвариантные системы автоматического управления с релейным усилителем // Доклады ТУСУРа. 2010 (июнь). № 1 (21). Ч. 1. С. 70–73.
11. Клиначев Н. В. Теория систем автоматического регулирования. Уч. методический комплекс. 800 файлов. Челябинск. 2010–2013.
12. Мещанов А. С., Султанова А. Ф. К построению многообразий скольжения и управления при невыполнении условий инвариантности // Вестник Казанского технологического университета. 2016. Т. 19, № 10. С. 113–117.
13. Блехман И. И. Что может вибрация? О вибрационной механике и вибрационной технике. М.: URSS, 2017. 216 с.
14. Софиев А. Э., Шауро В. С. Применение вибрационного управления для химико-технологических объектов // Программные средства: теория и приложения. 2004. С. 475–490.
15. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Метод больших коэффициентов усиления и эффект локализации движения в задачах синтеза систем автоматического управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 2 (95). С. 2–10.
16. Филимонов Н. Б. Методологический кризис "всепобеждающей математизации" современной теории управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 5. С. 291–299.
17. Рустамов Г. А. Анализ методов построения предельных робастных систем управления с большим коэффициентом усиления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 6. С. 363–373.
18. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Робастная коррекция в системах управления с большим коэффициентом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 12 (165). С. 3–10.
19. Мицумаки Т. Модифицированная оптимальная система регулирования / В кн.: Труды I конгр. ИФАК, том 2. М.: Из-во АН СССР, 1960. С.608–623.
20. Востриков А. С., Французова Г. А. Теория автоматического управления. Уч. пособ. М.: Высшая школа, 2004. 365 с.
21. Говоров А. А. Методы и средства построения регуляторов с расширенными функциональными возможностями для непрерывных технологических процессов. Тула, 2002. 500 с.
22. Рустамов Г. А., Фархадов В. Г., Рустамов Р. Г. Исследование K_∞ -робастных систем при ограниченном управлении // Мехатроника, автоматизация, управление. № 11. 2018. С. 699–706.
23. Namazov M. Fuzzy Control and Sliding mode Fuzzy Control of DS motor // Journal of Engineering and Natural Sciences Mühendislik ve Fen Bilikleri Dedgisi. Sigma 32, 2014. P. 97–108.

Control of Dynamic Objects in the Conditions of Uncertainty in the Point Sliding Mode

G. A. Rustamov, D. Sc., Professor, gazanfar.rustamov@gmail.com,

M. B. Namazov, Assoc., Professor, mnamazov@beu.edu.az,

Baku Engineering University, 120 AZ0102, Baku, Azerbaijan,

A. Y. Gasimov, Postgraduate, asif1964@mail.ru,

R. G. Rustamov, Postgraduate, rustamshrustamov@gmail.com,

Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

Corresponding author: **Rustamov Gazanfar A.**, D. Sc., Professor,

Baku Engineering University, 120 AZ0102, Baku, Azerbaijan, e-mail: gazanfar.rustamov@gmail.com

Accepted on June 11, 2019

Abstract

There is development of the well-known sliding mode, which in the classical formulation didn't find the development to be applied to control systems discussed. Alternatively, there is method of organizing one of the uniformity of the sliding mode called the "point sliding mode" proposed. The distinctive feature of this mode is that here the control gaps occur at time-equal points of the switching line (hyperplane) which allows the origin of coordinates for a finite number of switches. The possibility of changing the time interval between these points makes it possible to obtain various modes: a finite mode, in which a given point is reached from any initial state in one switch, and in this mode the switch line is "isochronous"; point sliding mode in which a given point is reached in a finite number of switchings; limit mode, when the length of time intervals tend to zero, and the switching frequency to infinity. Considering this feature the concept of "degree of slip" is introduced. It is shown that in the case of forced movement in the SPS, a sliding motion is observed, which does not allow for ensuring invariance with respect to external disturbances. There are two ways to eliminate the forced component of the movement offered. One of the advantages of using a point sliding mode is that, in order to improve performance, it is not necessary to use a boundary layer, which is realized by entering various logical conditions into the control algorithm. The practical significance of a point sliding mode lies in the fact that, with a small switching frequency, it is possible to maintain the quality indices of an undefined object within an acceptable interval. The studies were conducted for one-dimensional second-order linear systems (SISO). Results can be generalized for higher order multidimensional systems. Solution of model problems on MATLAB / Simulink allows us to make a number of positive conclusions that are of great practical importance in terms of expanding the area of use of skipping modes, especially in relation to the management of undefined objects.

Keywords: sliding mode, parametric uncertainty, discontinuous control, sliding mode failure, astatism, robustness

For citation:

Rustamov G. A., Namazov M. B., Gasimov A. Y., Rustamov R. G. Control of Dynamic Objects in the Conditions of Uncertainty in the Point Sliding Mode, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 12, pp. 714–722.

DOI: 10.17587/mau.20.714-722

References

1. Filippov A. F. Application of differential equations with a discontinuous right side to nonlinear problems of automatic control, *Trudi I Kongressa IFAC*, Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1961 (in Russian).
2. Utkin V. I. Sliding Modes in Optimization and Control Problems, Springer Verlag, New York, 1992, 387 p.
3. Dekarlo R. A., Jak S. H., Matthews G. P. Control with variable structure of nonlinear multidimensional systems: An overview, 1988, *TIIEP*, vol. 76, no. 3, pp. 4–27 (in Russian).
4. Levant A. Universal SISO sliding-mode controllers with finit-time convergence, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2001: 46(9), pp. 1447–1451.
5. Levant A. Principles of 2-sliding mode design, *Automatica (Journal of IFAC)*, 2007, vol. 43, iss. 4, pp. 576–586.
6. Yemelyanov S. V., Korovin S. K. New types of feedback: Control in conditions of uncertainty, Moscow, Nauka, 1997, 352 p. (in Russian).
7. Lagrat I., Ouakka H., Boumhidi I. Fuzzy Sliding mode PI control for Nonlinear Systems, *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Simulation. Modelling and Optimization*, Lisbon-Portugal, September 22–24, 2006, pp. 534–539.
8. Rustamov G. A., Abdullayeva A. T., Elchuyev I. A. Realization of sliding motion in a nonlinear stabilization system based on the method of the Lyapunov function, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2009, vol. 43, no. 6, pp. 336–341.
9. Mamedov G. A., Rustamov G. A., Gasanov Z. R. Elimination of the sliding mode breakdown in forced motion of controlled objects, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2009, vol. 43, no. 2, pp. 74–79.
10. Beyranovich V. A. Invariant automatic control systems with a relay amplifier, *Dokladi TUSURa*, 2010, no. 1(21), Ch. 1, pp. 70–73 (in Russian).
11. Klinachov N. V. Theory of automatic control systems, Uch. Metodicheskiy kompleks, 800 faylov, Chelabinsk, 2010–2013 (in Russian).
12. Meshanov A. S., Sultanova A. F. To the design of varieties of slip and control in case of failure invariance conditions, *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, vol. 19, no. 10, pp. 113–117 (in Russian).
13. Blekhman I. I. What is vibration? About vibration mechanics and vibration technology. Moscow, 2017, 216 p. (in Russian).
14. Sofiyev A. E., Shauro V. S. The use of vibration control for chemical-technological objects. Software: theory and applications, 2004, pp. 475–490 (in Russian).
15. Filimonov A. B., Filimonov N. B. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2009, no. 2 (95), pp. 2–10 (in Russian).
16. Filimonov N. B. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 5, pp. 291–299 (in Russian).
17. Rustamov G. A. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 6, pp. 363–373 (in Russian).
18. Filimonov A. B., Filimonov N. B. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 12 (165), pp. 3–10 (in Russian).
19. Micumaki T. Modified optimal control system, *Trudi I kong. IFAC*, vol. 2. Moscow, Publishing house of AN SSSR, 1960, pp. 608–623 (in Russian).
20. Vostrikov A. S., Francuzova G. A. Theory of automatic control, Novosibirsk, Publishing house of NGTU, 2003, 364 p. (in Russian).
21. Govorov A. A. Methods and means of designing regulators with enhanced functionality for continuous technological processes, Tula, 2002, 500 p. (in Russian).
22. Rustamov G. A., Farkhadov V. G., Rustamov R. G. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, no. 11, vol. 19, 2018, pp. 699–706 (in Russian).
23. Namazov M. Fuzzy Control and Sliding mode Fuzzy Control of DS motor, *Journal of Engineerign and Natural Scinces Mühendislik ve Fen Bilikleri Dedgisi*. Sigma 32, 2014, pp. 97–108.