

УДК 621.865.8; 681.511

Е.О. Мешковский, А.Д. Курмашев, В.Я. Фролов

Нечёткое согласованное управление системой электроприводов четырёхколёсного мобильного робота

Рассматривается построение нечёткого системного регулятора системы согласованного управления электроприводами четырёхколёсного мобильного робота с двумя дифференциальными приводными блоками. Показаны общая структура системного регулятора, база правил и выражения связи между его отдельными элементами. Приведены результаты компьютерных экспериментов в виде графиков траекторной ошибки при различных конфигурациях робота и значениях коэффициента системного регулятора.

Ключевые слова: колёсный робот, система согласованного управления, системный регулятор, нечёткий регулятор, дифференциальный приводной блок.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-3-61-69

В современном мире огромное количество предприятий внедряют в свой технологический процесс колёсные роботы [1–3]. Основная задача, выполняемая ими на этапах технологического процесса, заключается в перевозке (транспортировке) грузов вдоль заданной траектории (маршрут). Выполнение данной задачи требует проектирования таких систем управления, которые способны поддерживать перемещение колёсного робота с минимальными отклонениями при заданной скорости перемещения (контурная скорость). Данные факты позволяют отнести системы управления промышленных колёсных роботов к контурному типу.

Из-за особенности конструкции исследуемый колёсный робот можно отнести к классу многосвязных объектов управления. Объекты данного типа характеризуются наличием внутренних связей между его одноканальными элементами, которыми в нашем случае являются электроприводы колёс. Задача управления объектами такого класса уже достаточно давно решается при помощи систем согласованного (координирующего) управления [4–6].

Системы согласованного управления состоят из системного регулятора и локальных подсистем регулирования. Системный регулятор может быть любого типа: линейного, нелинейного, нечёткого, нейросетевого и др. Его главная задача – учитывать все необходимые внутренние связи между элементами объекта и генерировать задания для каждого из них. Задания поступают в локальные подсистемы регулирования, обеспечивающие их выполнение в рамках одного элемента.

В нашей работе мы решили оценить возможности использования методов нечёткого регулирования для стабилизации контурного движения исследуемого четырёхколёсного мобильного робота с двумя дифференциальными приводными блоками. Для этой цели спроектируем нечёткий системный регулятор и протестируем его возможности путём построения графиков отклонения центра корпуса робота от заданной траектории.

Постановка задачи и поиск решения

Исследуемый колёсный робот (рис. 1) представляет собой систему взаимосвязанных тел, в со-

став которой входят корпус, приводные блоки типа «дифференциальный привод» (способны вращаться относительно точки крепления к корпусу за счёт разности скоростей колёс) и система электроприводов колёс, позволяющая осуществить перемещение робота.

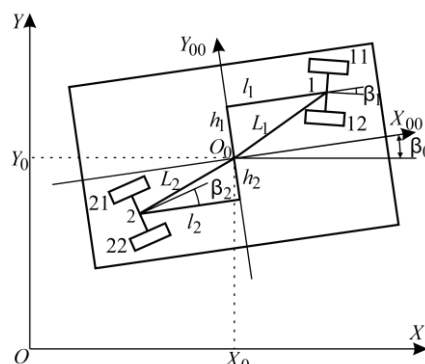


Рис. 1. Упрощённая кинематическая схема исследуемого мобильного робота (вид сверху)

На рис. 1 приняты следующие обозначения: $OXYZ$ – глобальная неподвижная система координат (с.к.); $O_0X_0Y_0Z_0$ – локальная подвижная система координат, связанная с центром симметрии корпуса робота O_0 ; 1, 2 – точки крепления поворотных блоков к корпусу; 11, 12, 21, 22 – колёса робота; $\mathbf{L}_1 = [l_1, h_1]^T$, $\mathbf{L}_2 = [l_2, h_2]^T$ – векторы, соединяющие центр корпуса робота O_0 с точками крепления поворотных блоков 1 и 2, состоящие из проекций на оси с.к. $O_0X_0Y_0Z_0$; X_0, Y_0 – координаты центра корпуса робота в с.к. $OXYZ$; β_0 – угол поворота корпуса робота (между с.к. $OXYZ$ и $O_0X_0Y_0Z_0$); β_1, β_2 – углы положения поворотного блока 1 и 2 в с.к. $O_0X_0Y_0Z_0$.

Наш колёсный робот будет применяться для транспортировки грузов на территории промышленного предприятия. По этой причине его можно отнести к классу промышленного оборудования, что предполагает использование промышленных логи-

ческих контроллеров (ПЛК). Также он может иметь значительные массогабаритные показатели и несимметричную конфигурацию расположения дифференциальных приводных блоков. Желательно предусмотреть масштабирование системного регулятора с целью возможности управлять роботами с числом приводных блоков больше двух. Перед построением нечёткого системного регулятора проведём краткий обзор литературы на предмет наличия готового решения.

В работах [7, 8] предлагается использовать нечёткий настройщик для корректировки коэффициентов нелинейного регулятора, построенного на базе уравнений динамики и кинематики, стабилизации траекторного движения робота, конструкция которого называется дифференциальным приводом. В исследовании [9] применяется схожий подход, только регулятор взят пропорционально-дифференцирующего (ПД) типа.

Исследования [10–12] демонстрируют возможности применения нечёткого контроллера управления линейной и угловой скоростью двухколёсного робота с дифференциальным приводом. Такой же метод показан в [13], но для управления четырёхколёсным роботом с дифференциальным приводом (отличие данной конструкции от нами исследуемой заключается в том, что все четыре колеса зафиксированы на корпусе (в нашей задаче дифференциальные приводные блоки вращаются относительно точки крепления)).

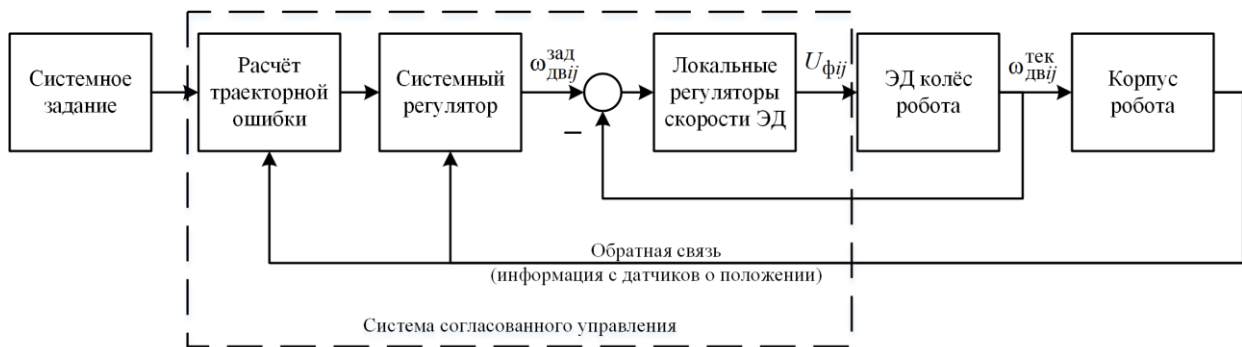


Рис. 2. Общая структура разрабатываемой системы согласованного управления

На рис. 2 обозначены: $\omega_{двij}^{зад}$, $\omega_{двij}^{тек}$ – заданная и текущая скорость электродвигателя колеса ij (индекс ij соответствует номеру колеса согласно рис. 1); $U_{фij}$ – фазное напряжение обмотки электродвигателя колеса ij .

При построении системного регулятора будем отталкиваться от следствия, вытекающего из геометрических свойств объекта: для минимального отклонения центра корпуса необходимо, чтобы точки крепления приводных блоков минимально отклонялись от заданной кривой маршрута. Данная идея требует построения дополнительных эквидистантных траекторий к основной траектории для каждого приводного блока. Они будут строиться с учётом особенности расположения точки крепления при-

дальнейший поиск решения сводится к нахождению применений методов нелинейного [14], нейросетевого [15] или комбинации различных способов управления [16–18]. Такие решения нам не подходят из-за условия применения нечёткого регулирования.

Поиск готового решения, к сожалению, не дал результатов, т.к. многие из них были разработаны для двухколёсных роботов с дифференциальной структурой, которая во многом отличается от нашей. По этой причине приступим к построению нечёткого системного регулятора для исследуемого мобильного робота.

Построение нечёткого системного регулятора

Необходимо стабилизировать движение центра симметрии корпуса вдоль заданной траектории с заданной контурной скоростью. Обратной связью будут данные с датчиков: скорости вращения электроприводов колёс $\omega_{дв11}^{тек}$, $\omega_{дв12}^{тек}$, $\omega_{дв21}^{тек}$, $\omega_{дв22}^{тек}$ (номер в нижнем индексе указывает на номер колеса согласно рис. 1), углы положения поворотных блоков относительно корпуса $\beta_1^{тек}$, $\beta_2^{тек}$, координаты центра корпуса $S_0^{тек} = [X_0^{тек}, Y_0^{тек}]^T$ и угол положения корпуса $\beta_0^{тек}$ в глобальной системе $OXYZ$. Общую структуру синтезируемой системы управления можно увидеть на рис. 2.

водного блока относительно центра корпуса в блоке расчёта траекторной ошибки.

Данный блок на основе информации о положении робота производит вычисление отклонений каждой контролируемой точки корпуса от заданной кривой маршрута и передаёт в системный регулятор векторы $\Delta L_0 = [\Delta l_0, \Delta h_0]^T$, $\Delta L_1 = [\Delta l_1, \Delta h_1]^T$ и $\Delta L_2 = [\Delta l_2, \Delta h_2]^T$, состоящие из продольных и поперечных отклонений, заданные углы положения в пространстве $\beta_0^{зад}$, $\beta_1^{зад}$ и $\beta_2^{зад}$, и заданную контурную скорость $v_c^{зад}$ (нижний индекс обозначает принадлежность: 0 – центр корпуса; 1, 2 – точка крепления поворотных блоков 1 и 2). Перечисленные величины продемонстрированы на рис. 3.

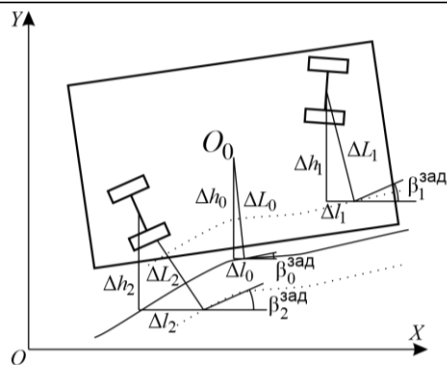


Рис. 3. Величины, контролируемые блоком расчёта траекторной ошибки

Получив информацию об отклонении элементов корпуса и задания углов положения в пространстве, системный регулятор определяет задания скоростей электроприводов колёс, которые уже будут выполняться локальными регуляторами скорости. В данной статье мы продемонстрируем только системный регулятор без блока контроля траектории.

Первым шагом в построении нечёткого системного регулятора будет определение его структуры. Согласно общепринятой концепции, в базе правил регуляторов такого типа должны учитываться все комбинации значений входных лингвистических переменных. В нашей ситуации нам необходимо производить контроль угла β_0 для правильного положения корпуса в пространстве, отклонение ΔL_0 для регулирования контурной скоростью, углов β_1 и β_2 , а также отклонений Δh_1 и Δh_2 с целью уменьшения поперечной траекторной ошибки. Получаем 6 входных переменных, для которых, в случае наличия трёх термов для каждой переменной, потребуется база правил из 729 элементов, что является недопустимым из-за большого количества обрабатываемых данных. По этой причине воспользуемся методом декомпозиции и разделим системный регулятор на три нечётких регулятора: один для стабилизации корпуса и два для приводных блоков. Связь между ними будет осуществляться уравнениями кинематики. Более подробная информация о нечётких регуляторах располагается в [19–21].

Нечёткий регулятор корпуса работа получается на вход отклонения угла положения $\Delta\beta_0 = \beta_0^{\text{зад}} - \beta_0^{\text{тек}}$ и продольную составляющую траекторной ошибки ΔL_0 . Для данных лингвистических переменных будут использоваться по три терма: N – отрицательная (трапецидальная функция); Z – нулевая (треугольная функция) и P – положительная (трапецидальная функция). Выходами регулятора будут корректирующее воздействие контурной скорости V_0 , устраняющее ΔL_0 , и угловая скорость корпуса робота ω_0 , уменьшающая $\Delta\beta_0$. Для выходных лингвистических переменных применяются по три терма типа синглетон: N – отрицательное; Z – нулевое и P – положительное управля-

ющее воздействие. Графики функций принадлежности изображены на рис. 4.

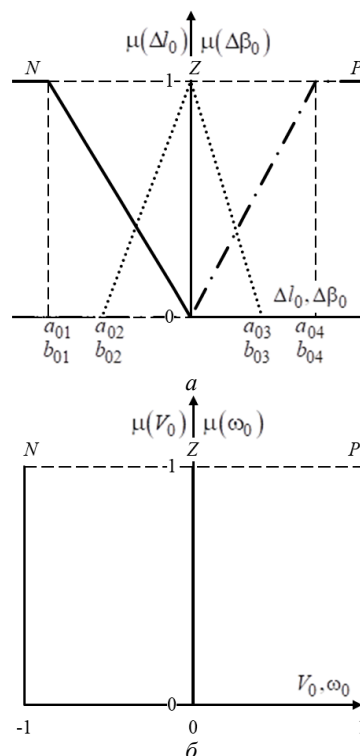


Рис. 4. Графики функций принадлежности нечёткого регулятора корпуса: a – входные переменные; b – выходные переменные

На рис. 4 обозначены: $\mu(\Delta L_0)$, $\mu(\Delta\beta_0)$, $\mu(V_0)$, $\mu(\omega_0)$ – значение функций принадлежности для входных величин ΔL_0 и $\Delta\beta_0$, и выходных переменных V_0 и ω_0 соответственно; a_{01} , a_{02} , a_{03} , a_{04} – опорные точки термов входа продольного отклонения корпуса ΔL_0 (в метрах); b_{01} , b_{02} , b_{03} , b_{04} – опорные точки термов входа ошибки угла положения корпуса $\Delta\beta_0$ (в радианах); N , Z , P – названия термов.

Изменяя значения опорных точек a_{0j} и b_{0j} , можно производить настройку регулятора. Для них необходимо выполнения условия:

$$\begin{cases} a_{01} \leq a_{02} < a_{03} \leq a_{04}; \\ b_{01} \leq b_{02} < b_{03} \leq b_{04}. \end{cases} \quad (1)$$

Выходные сигналы регулятора нормированы в диапазоне $[-1; 1]$. Для приведения их к физическим величинам вводим дополнительные коэффициенты $K_0^{\Delta L}$ (метр в секунду) и K_0^{β} (радиан в секунду) для выходов V_0 и ω_0 соответственно.

При такой конфигурации нечёткого регулятора получаем базу правил из 9 элементов, которая представлена в табл. 1. Словесно одно правило можно описать выражением ЕСЛИ $\Delta L_0 = \langle \rangle$ И $\Delta\beta_0 = \langle \rangle$, ТО $V_0 = \langle \rangle$ И $\omega_0 = \langle \rangle$.

Таблица 1

База правил регулятора корпуса робота

| | | | | |
|-------------------|-----|-----------------|----------|----------|
| $(V_0; \omega_0)$ | | $\Delta\beta_0$ | | |
| | | N | Z | P |
| Δl_0 | N | $(N; N)$ | $(N; Z)$ | $(N; P)$ |
| | Z | $(Z; N)$ | $(Z; Z)$ | $(Z; P)$ |
| | P | $(P; N)$ | $(P; Z)$ | $(P; P)$ |

Нечёткий регулятор приводного блока i (далее i используется как номер приводного блока 1 или 2) получает на вход отклонение угла положения $\Delta\beta_i$ и поперечную траекторную ошибку Δl_i . Заданный угол положения $\beta_i^{зад}$ поступает в системный регулятор в глобальной с.к. $OXYZ$, а угол $\beta_i^{тек}$, измеряемый датчиком, – относительно корпуса. По этой причине $\beta_i^{зад}$ необходимо предварительно привести к корпусу робота. Тогда $\Delta\beta_i$ находим как

$$\Delta\beta_i = \beta_i^{зад} - \beta_0^{зад} - \beta_i^{тек}. \quad (2)$$

Для входных лингвистических переменных будут, аналогично регулятору корпуса, использоваться по три термина: N – отрицательная (трапецеидальная функция), Z – нулевая (треугольная функция) и P – положительная ошибка (трапецеидальная функция). Выходом регулятора будет угловая скорость приводного блока относительно точки крепления ω_i . Для выходной лингвистической переменной применяются пять термов типа синглетон: N – отрицательное, NZ – средне-отрицательное, Z – нулевое, PZ – средне-положительное и P – положительное управляющее воздействие. Графики функций принадлежности изображены на рис. 5.

На рис. 5 приняты обозначения: $\mu(\Delta l_i)$, $\mu(\Delta\beta_i)$, $\mu(\omega_i)$ – значения функций принадлежности входных величин Δl_i и $\Delta\beta_i$ и выходной переменной и ω_i соответственно; a_{i1} , a_{i2} , a_{i3} , a_{i4} – опорные точки термов входа поперечного отклонения приводного блока Δl_i (в метрах); b_{i1} , b_{i2} , b_{i3} , b_{i4} – опорные точки термов входа ошибки угла положения $\Delta\beta_i$ (в радианах); c_{i1} , c_{i2} – опорные точки термов выхода регулятора ω_i i -го приводного блока; N, NZ, Z, PZ, P – названия термов.

Значения опорных точек a_{ij} , b_{ij} и c_{ij} подбираются в процессе настройки регулятора с соблюдением следующих условий:

$$\begin{cases} a_{i1} \leq a_{i2} < a_{i3} \leq a_{i4}, \\ b_{i1} \leq b_{i2} < b_{i3} \leq b_{i4}, \\ -1 \leq c_{i1} < c_{i2} \leq 1. \end{cases} \quad (3)$$

Выходной сигнал регулятора i -го приводного блока нормирован в диапазоне $[-1; 1]$, из-за чего вводим коэффициент преобразования K_i^β (радиан в секунду).

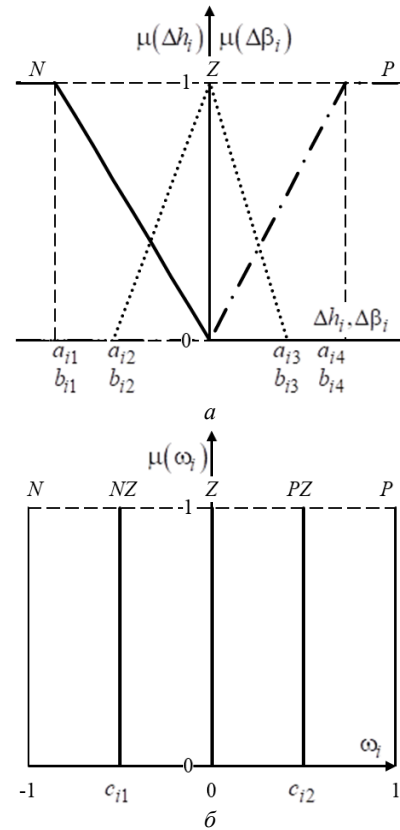


Рис. 5. Графики функций принадлежности нечёткого регулятора приводного блока: a – входные переменные; $б$ – выходная переменная

Нечёткий регулятор содержит базу правил из 9 элементов, которая представлена в табл. 2. Словесно одно правило можно описать выражением ЕСЛИ $\Delta l_i = \langle \langle \rangle \rangle$ И $\Delta\beta_i = \langle \langle \rangle \rangle$, ТО $\omega_i = \langle \langle \rangle \rangle$.

Таблица 2

База правил регулятора приводного блока

| | | | | |
|--------------|-----|-----------------|------|------|
| ω_i | | $\Delta\beta_i$ | | |
| | | N | Z | P |
| Δl_i | N | N | NZ | Z |
| | Z | NZ | Z | PZ |
| | P | Z | PZ | P |

Нечёткие регуляторы будут работать по алгоритму Мамдани со следующими параметрами: агрегирование подусловий – по правилу минимума, активизация заключений – по правилу минимума, аккумуляция заключений – по правилу максимума, дефаззификация – по правилу центра тяжести.

Заключительным этапом построения системного регулятора будет внедрение уравнений связи между отдельными его элементами и преобразование управляющих воздействий к виду, пригодному для локальных подсистем регулирования скоростью электроприводов.

Как говорилось ранее, нечёткий регулятор корпуса робота вычисляет значение корректирующих воздействий, которые устраняют продольную и угловую ошибки. Продольная ошибка уменьшается за счёт изменения задания линейной скорости, а угло-

вая – изменением угловой скорости корпуса робота. Данное можно записать в виде системы:

$$\begin{cases} V_0^K = (1 + K_0^{\Delta L} \cdot V_0) \cdot v_c^{\text{зад}}, \\ \omega_0^K = K_0^\beta \cdot \omega_0, \end{cases} \quad (4)$$

где V_0^K и ω_0^K – преобразованные значения линейной и задание угловой скорости корпуса робота соответственно.

Нечёткий регулятор i -го приводного блока уменьшает поперечную и угловую ошибку, изменяя угловую скорость вращения приводного блока относительно точки крепления. Тогда скорость вращения i -го приводного блока ω_i^K находится как

$$\omega_i^K = K_i^\beta \cdot \omega_i. \quad (5)$$

Колесо робота совершает сложное движение [22, с. 155–158], при котором переносным является перемещение корпуса в пространстве, а относительным – вращение приводного блока относительно точки крепления. Исходя из этого, заданная линейная скорость колеса ij приводного блока i определяется через выражение

$$v_{ij}^{\text{зад}} = v_i^{\text{зад}} \mp (\omega_0^K + \omega_i^K) \cdot l_{ij} \quad (6)$$

(для колёс 11 и 21 используется знак «-», для 12 и 22 – «+»).

Задание электродвигателю колеса ij находим следующим образом:

$$\omega_{\text{дв}ij}^{\text{зад}} = \pm \frac{v_{ij}^{\text{зад}}}{I_{rij} \cdot R_{Kij}}, \quad (7)$$

где I_{rij} – коэффициент преобразования редуктора; R_{Kij} – радиус колеса (для электродвигателя колеса 11 и 21 используется знак «+», для 12 и 22 – «-»). При необходимости управлять скоростью колеса, а не электродвигателя необходимо принять $I_{rij} = 1$.

Объединим всё вышесказанное и представим в виде структурной схемы, изображённой на рис. 6. На данной схеме блоком нечёткий регулятор корпуса обозначены сам нечёткий регулятор корпуса и выражение (4), блок нечёткого регулятора приводного блока содержит нечёткий регулятор приводного блока и выражение (5), блок расчёта скоростей электродвигателей колёс содержит выражения (6) и (7). Нетрудно заметить, что получившаяся структура нечёткого системного регулятора способна к масштабированию путём повторения блоков нечёткого регулятора приводного блока и блоков расчёта скоростей электродвигателей необходимое количество раз.

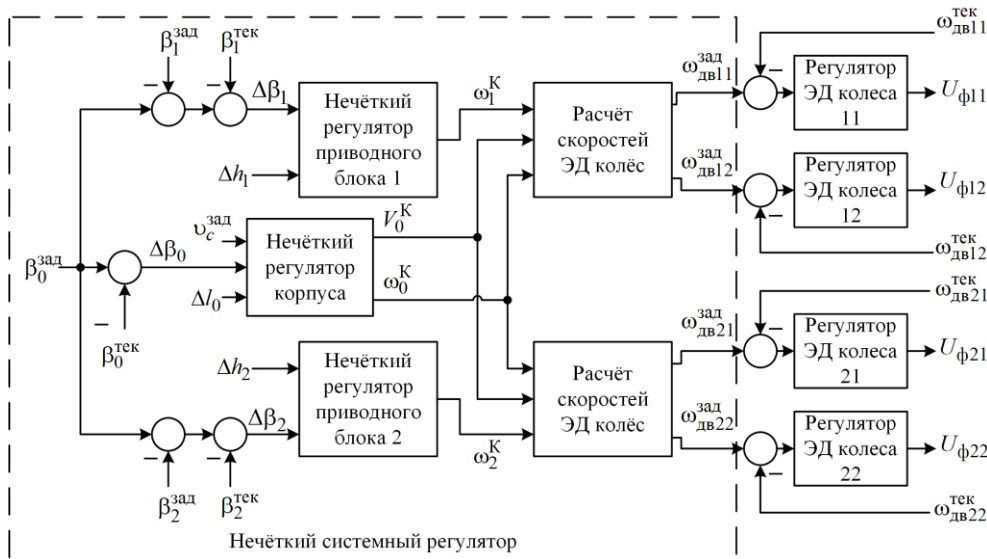


Рис. 6. Структурная схема нечёткого системного регулятора

Программное моделирование

Продемонстрируем результаты программной реализации полученного нечёткого системного регулятора, проведя ряд программных экспериментов при помощи математической модели [23]. Масса робота 100 кг, заданная контурная скорость равна 1,0 м/с, регуляторы скорости электродвигателей выбраны ПИ-типа с настройкой на модульный (технический) оптимум [24]. Параметры контуров управления заранее подобраны и имеют значения $a_{01} = a_{02} = -0,1$ м; $a_{03} = a_{04} = 0,1$ м, $b_{01} = b_{02} = -0,03$ рад; $b_{03} = b_{04} = 0,03$ рад; $a_{11} = a_{12} = a_{21} =$

$= a_{22} = -0,2$ м; $a_{13} = a_{14} = a_{23} = a_{24} = 0,2$ м; $b_{11} = b_{12} = b_{21} = b_{22} = -0,05$ рад; $b_{13} = b_{14} = b_{23} = b_{24} = 0,05$ рад; $c_{11} = c_{21} = -0,5$; $c_{12} = c_{22} = 0,5$. Коэффициенты примем следующие: $K_0^{\Delta L} = 0,5$ м/с, $K_1^\beta = K_2^\beta = 3,0$ рад/с. Рассмотрим поведение двух конфигураций робота: продольно-симметричное расположение приводных блоков ($L_1 = [0,5, 0,0]^T$, $L_2 = [-0,5, 0,0]^T$, в метрах) и несимметричное ($L_1 = [0,5, 0,2]^T$, $L_2 = [-0,5, -0,4]^T$, в метрах).

Будем производить изменение коэффициента K_0^β регулятора корпуса робота с целью оценки его влияния на характер контурного движения различных конструкций расположения приводных блоков при фиксированных значениях других параметров системного регулятора.

Заданная программная траектория представлена на рис. 7. Буквами A, B, C, D и E обозначены точки сопряжения траекторий. Данная траектория выбрана по нескольким причинам. Прямой участок ($0 - A$) служит для плавного разгона. Повороты с изгибом (участок $A - C$, изгиб в точке B), после которых выход на прямой участок ($C - D$), и поворот $D - E$ с прямым участком после точки E служат для оценки управляемости на криволинейных и прямолинейных участках траектории.

В первом эксперименте примем $K_0^\beta = 0,5$ рад/с (рис. 8), во втором – $K_0^\beta = 1,0$ рад/с (рис. 9), в третьем – $K_0^\beta = 2,5$ рад/с (рис. 10).

Результаты экспериментов для продольно-симметричной конфигурации говорят о следующем. При значении коэффициента $K_0^\beta = 0,5$ рад/с (см.

рис. 8, a) движение устойчивое, но с большим отклонением от контура (более 0,6 м) и статической ошибкой в 0,04 м на последнем участке траектории.

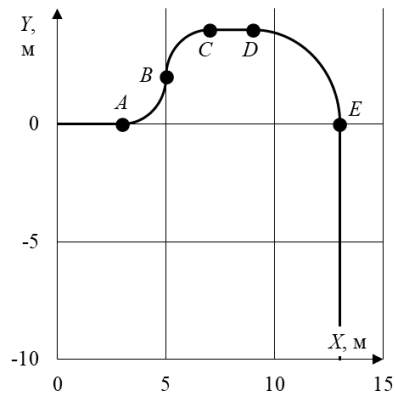


Рис. 7. Заданная программная траектория

При $K_0^\beta = 1,0$ рад/с (см. рис. 9, a) движение робота устойчивое и отклонение не превышает 0,1 м. При $K_0^\beta = 2,5$ рад/с (см. рис. 10, a) движение неустойчивое, наблюдается сход с траектории после точки E .

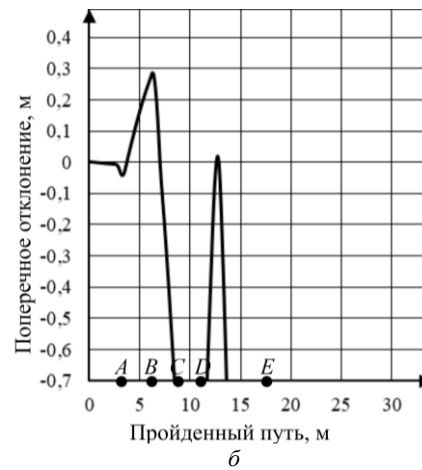
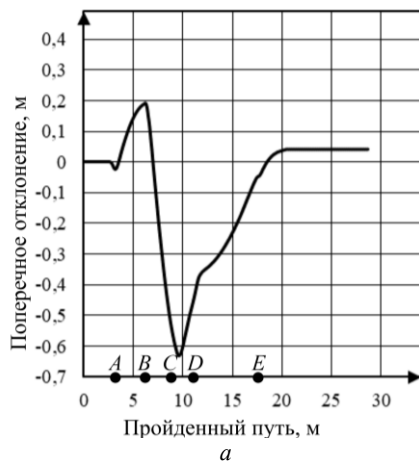


Рис. 8. Результаты первого программного эксперимента: a – продольно-симметричная конфигурация робота; b – несимметричная конфигурация робота

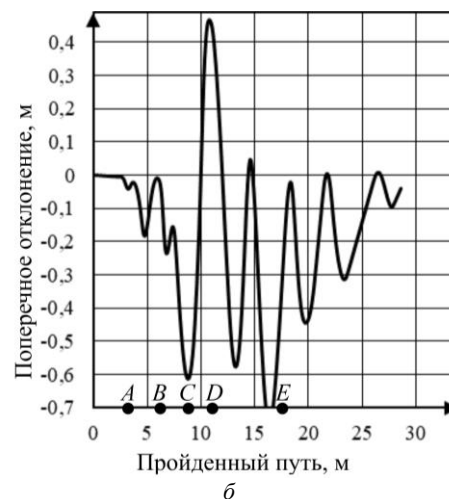
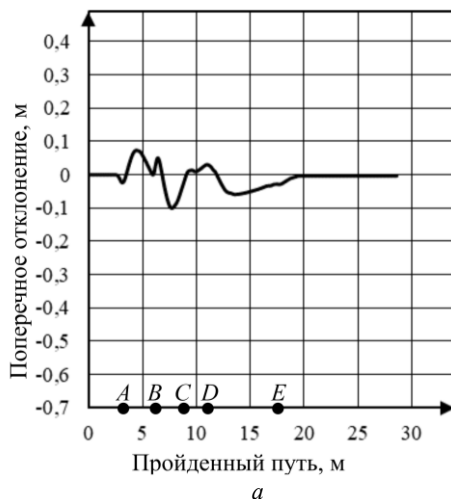


Рис. 9. Результаты второго программного эксперимента: a – продольно-симметричная конфигурация робота; b – несимметричная конфигурация робота

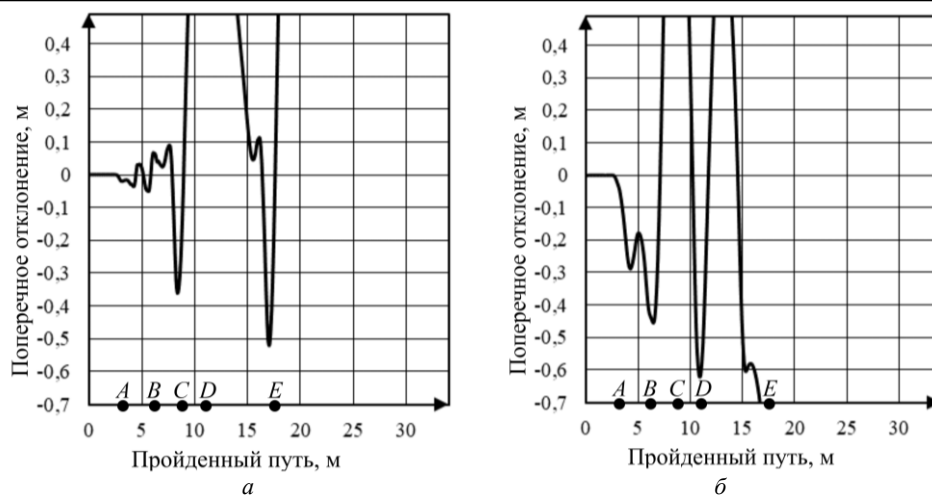


Рис. 10. Результаты третьего программного эксперимента:
 а – продольно-симметричная конфигурация робота; б – несимметричная конфигурация робота

Указанные особенности поведения объекта говорят о том, что параметры нечётких регуляторов возможно применить для данной конфигурации колёсного робота, но при использовании оптимального значения коэффициента K_0^β , который располагается вблизи 1,0 рад/с. Для его уточнения необходимо проводить дополнительный набор испытаний или использовать методы параметрической оптимизации, которые не рассматриваются в данной работе.

При экспериментах на несимметричной конструкции робота системный регулятор показал хуже качество управления. При K_0^β , равном 0,5 рад/с (см. рис. 8, б) и 2,5 рад/с (см. рис. 10, б), робот терял управление и сходил с заданной программной траектории. При $K_0^\beta = 1,0$ рад/с (см. рис. 9, б) движение робота было относительно стабильным, но отклонение от траектории и «виляние» корпуса значительно превышают полученный результат при испытании симметричной компоновки робота. Данное обстоятельство связано с остальными параметрами системного регулятора, значения которых следует выбирать другими при изменении конфигурации робота.

В целом можно предположить, что системный регулятор выполняет свою работу корректно и он должен быть способен производить стабилизацию контурного движения разных компоновок приводных блоков при условии правильной его настройки. Данные предположения должны будут подтвердиться при проведении натурных экспериментов, запланированных на этапе внедрения.

Заключение

Применяя построенный нечёткий системный регулятор, мы можем стабилизировать контурное движение исследуемого колёсного робота. Полученная структура регулятора даёт возможность управлять электроприводами колёсного робота с любой компоновкой приводных блоков и с числом таких блоков больше двух, используя возможности масштабирования. Небольшой объём базы правил и, как следствие, вычислений позволяет использовать та-

кой регулятор в промышленных контроллерах даже при реализации на языках LAD/LD, FBD и STL/PL. Дальнейшие исследования будут посвящены параметрической оптимизации данного регулятора, сравнению с нелинейным и нейросетевым способом управления и внедрению его в промышленный колёсный робот.

Литература

1. Кауркин И.А. Роботизация в горнодобывающей промышленности / И.А. Кауркин, В.В. Зиновьев // Россия молодая: сб. матер. IX Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых с международным участием. – Кемерово: КузГТУ, 2017. – 829 с.
2. Robotics in logistics. A DPDHL perspective on implications and use cases for the logistics industry. – DHL. – March 2016. – 37 p. – URL: https://www.dhl.com/content/dam/downloads/g0/about_us/logistics_insights/dhl_trendreport_robotics.pdf (дата обращения: 03.06.2020).
3. Shamshiri R.R. Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming / R.R. Shamshiri, C. Weltzien, I.A. Hameed, I.J. Yule, T.E. Grift, S.K. Balasundram // Int J Agric & Biol Eng. – 2018. – Vol. 11, No. 4. – P. 1–14.
4. Беляева Н.И. Синтез структуры системы программного управления двухкоординатной электромеханической системой / Н.И. Беляева, А.Д. Курмашев // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 1-2 (25). – С. 241–244.
5. Мирошник И.В. Согласованное управление многоканальными системами. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1990. – 128 с.
6. Шаповалов А.А. Контурная система согласованного управления промышленным роботом / А.А. Шаповалов, А.Д. Курмашев // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 1-2 (25). – С. 245–250.
7. Chand P. Fuzzy reactive control for wheeled mobile robots // Proceedings of the 2015 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications. – 2015. – P. 167–172.
8. Keighobadi J. From nonlinear to fuzzy approaches in trajectory tracking control of wheeled mobile robots / J. Keighobadi, M.B. Menhaj // Asian Journal of Control. – 2012. – Vol. 14, No. 4. – P. 960–973.
9. Saleem O. Adaptive Fuzzy-PD tracking controller for optimal visual-servoing of wheeled mobile robots / O. Saleem, H. Hassan, A. Khan, U. Javaid // Control Engineering and Applied Informatics. – 2017. – Vol. 19, No. 3. – P. 58–68.

10. Falsafi M.H. Fuzzy motion control for wheeled mobile robots in real-time / M.H. Falsafi, K. Alipour, B. Tarvirdizadeh // *Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering*. – 2019. – Vol. 8, No. 2. – P. 133–144.

11. Falsafi M.H. Tracking-Error Fuzzy-Based Control for Nonholonomic Wheeled Robots / M.H. Falsafi, K. Alipour, B. Tarvirdizadeh // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 44, No. 2. – P. 881–892.

12. Sanjaya A. Stability of Line Follower Robots with Fuzzy Logic and Kalman Filter Methods / A. Sanjaya, H. Mawengkang, S. Efendi, M. Zarlis // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1361, No. 1. – P. 012016.

13. Fahmizal. Trajectory and heading tracking of a mecanum wheeled robot using fuzzy logic control / Fahmizal, C.-H. Kuo // *Proceedings of the 2016 International Conference on Instrumentation, Control, and Automation, ICA 2016*. – 2016. – P. 54–59.

14. Сизых В.Н. Модальное управление мобильным роботом при дифференциальном отклонении колесной пары / В.Н. Сизых, М.В. Баканов // *Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами*. – 2019. – № 1 (2). – С. 62–71.

15. Звонарев И.С. Управление многозвездным колесным мобильным роботом с применением искусственных нейронных сетей / И.С. Звонарев, Ю.Л. Караваев // *Выставка инноваций, 2018 (весенняя сессия): сб. матер. XXV республиканской выставки-сессии студенческих инновационных проектов, 2018*. – Ижевск: ИжГТУ, 2018. – С. 42–46.

16. Boukens M. Design of an intelligent optimal neural network-based tracking controller for nonholonomic mobile robot systems / M. Boukens, A. Boukabou // *Neurocomputing*. – 2017. – Vol. 226. – P. 46–57.

17. Caceres C. Approach of Kinematic Control for a Nonholonomic Wheeled Robot using Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms / C. Caceres, J.M. Rosario, D. Amaya // *2017 International Work Conference on Bio-Inspired Intelligence: Intelligent Systems for Biodiversity Conservation, IWOBI 2017*. – *Proceedings*. – 2017. – P. 7985533.

18. Takahashi K. Multi-layer quantum neural network controller trained by real-coded genetic algorithm / K. Takahashi, M. Kurokawa, M. Hashimoto // *Neurocomputing*. – 2014. – Vol. 134. – P. 159–164.

19. Григорьева Д.Р. Основы нечеткой логики: учеб.-метод. пособие к практ. занятиям и лаб. работам / Д.Р. Григорьева, Г.А. Гареева, Р.Р. Басыров. – Набережные Челны: Изд-во НЧИ КФУ, 2018. – 42 с.

20. Хижняков Ю.Н. Нечеткое регулирование температуры теплоносителя // *Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. – 2016. – № 20. – С. 5–12.

21. Passino K.M. Fuzzy control. 1-st Ed. / K.M. Passino, S. Yurkovich. – Menlo Park, California: Addison-Wesley Longman, 1997. – 522 p.

22. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики: учеб. для вузов. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1986. – 416 с.

23. Мешковский Е.О. Построение математической модели четырёхколёсного мобильного робота с двумя дифференциальными приводными блоками / Е.О. Мешковский, А.Д. Курмашев // *Инновации и инвестиции*. – 2020. – № 2. – С. 113–118.

24. Кояин Н.В. Оптимизация контуров регулирования систем электропривода по типовым методикам / Н.В. Кояин, О.П. Мальцева, Л.С. Удут // *Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов*. – 2005. – № 7. – С. 120–125.

Мешковский Евгений Олегович

Аспирант Института энергетики Санкт-Петербургского политехнического ун-та Петра Великого
Политехническая ул., д. 29, г. Санкт-Петербург,
Россия, 195251

ORCID 0000-0002-6996-7864

Тел.: +7 (812-5) 52-76-43

Эл. почта: meshkovskii_evge@mail.ru

Курмашев Арон Даутханович

Канд. техн. наук, доцент Высшей школы киберфизических систем и управления Санкт-Петербургского политехнического ун-та Петра Великого

Гражданский пр-т, д. 28, г. Санкт-Петербург,
Россия, 195220

Тел.: +7 (812-2) 97-59-60

Эл. почта: kurmashev_ad@spbstu.ru

Фролов Владимир Яковлевич

Д-р техн. наук, профессор Высшей школы электроэнергетических систем Санкт-Петербургского политехнического ун-та Петра Великого

Политехническая ул., д. 29, г. Санкт-Петербург,
Россия, 195251

ORCID 0000-0002-1744-4375

Тел.: +7 (812-5) 52-76-43

Эл. почта: frolov_vya@spbstu.ru

Meshkovskiy E.O., Kurmashev A.D., Frolov V.Ya.

Fuzzy Coordinated Control of an Electric Drive System of a Four-Wheel Mobile Robot

This paper presents the construction of a fuzzy system controller of a coordinated control system of an electric drive system for a four-wheel mobile robot with two differential drive units. The structure of this system regulator, the rule base, and the expression of the relationship between its elements are shown. In the article the authors show the results of computer experiments in graphs of trajectory error for different configurations of the robot and the system controller coefficient values.

Keywords: wheeled robot; coordinated control system; system regulator; fuzzy regulator; differential drive.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-3-61-69

References

1. Kaurkin I.A., Zinoviev V.V. *Robotizaciya v gornodobyvayushhey promyshlennosti* [Mining Robotics]. «ROSSIYA MOLODAYA». Sbornik materialov IX Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenyh s mezhdunarodnym uchastiem [RUSSIA YOUNG. Proceedings of the ninth All-Russian scientific-practical conference of young scientists with international participation]. Kemerovo, KuzGTU Publ., 2017, 829 p., pp. 35006 (in Russ.).

2. Robotics in logistics. A DPDHL perspective on implications and use cases for the logistics industry. *DHL*, March 2016, 37 p. Available at: https://www.dhl.com/content/dam/downloads/g0/about_us/logistics_insights/dhl_trendreport_robotics.pdf (Accessed: June 03, 2020).

3. Shamshiri R.R., Weltzien C., Hameed I.A., Yule I.J., Grift T.E., Balasun-dram S.K. Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming. *Int J Agric & Biol Eng*, 2018, vol. 11, no. 4, pp. 1–14.

4. Belyaeva N.I., Kurmashev A.D. [The structural synthesis of control system of two-coordinate electromechanical system]. *Proceedings of TUSUR University*, 2012, vol. 25, no. 1-2, pp. 241–244 (in Russ.).

5. Miroshnik I.V. *Soglasovannoe upravlenie mnogokanal'nymi sistemami* [Coordinated control of multi-channel systems]. Leningrad, Energoatomizdat. Leningr. otd-nie, 1990. 128 p. (in Russ.).
6. Shapovalov A.A., Kurmashev A.D. [Contouring system of coordinated control of an industrial robot]. *Proceedings of TUSUR University*, 2012, vol. 25, no. 1-2, pp. 245–250 (in Russ.).
7. Chand P. Fuzzy reactive control for wheeled mobile robots. *Proceedings of the 2015 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications*, 2015, pp. 167–172.
8. Keighobadi J. Menhai M.B. From nonlinear to fuzzy approaches in trajectory tracking control of wheeled mobile robots. *Asian Journal of Control*, 2012, vol. 14, no. 4, pp. 960–973.
9. Saleem O., Hassan O., Khan A., Javaid U. Adaptive Fuzzy-PD tracking controller for optimal visual-servoing of wheeled mobile robots. *Control Engineering and Applied Informatics*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 58–68.
10. Falsafi M.H., Alipour K., Tarvird-izadeh B. Fuzzy motion control for wheeled mobile robots in real-time. *Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering*, 2019, vol. 8, no. 2, pp. 133–144.
11. Falsafi M.H., Alipour K., Tarvird-izadeh B. Tracking-Error Fuzzy-Based Control for Nonholonomic Wheeled Robots. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019, vol. 44, no. 2, pp. 881–892.
12. Sanjaya A., Mawengkang H., Efendi S., Zarlis M. Stability of Line Follower Robots with Fuzzy Logic and Kalman Filter Methods. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1361, no. 1, 012016.
13. Fahmizal, Kuo C.-H. Trajectory and heading tracking of a mecanum wheeled robot using fuzzy logic control. *Proceedings of the 2016 International Conference on Instrumentation, Control, and Automation, ICA 2016*, 2016, pp. 54–59.
14. Sizykh V.N., Bakanov M.V. [Modal control of the mobile robot at the differential deviation of wheel]. *Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems*, 2019, vol. 2, no. 1, pp. 62–71 (in Russ.).
15. Zvonarev I.S., Karavaev Yu.L. *Upravlenie mnogozvennym kolesnym mobil'nym robotom s primeneniem iskusstvennykh neyronnykh setey* [Control of a Multi-Link Wheeled Mobile Robot Using Artificial Neural Networks]. Vystavka innovatsiy – 2018 (vesenniyaya sessiya): Sbornik materialov XXV Respublikanskoy vystavki-sessii studenteskikh innovatsionnykh proektov [*Innovation Exhibition - 2018 (spring session)*]. Proceedings of the twenty fifth Republican exhibition-session of student innovation projects]. Izhevsk, IzhGTU Publ., 2018, pp. 42–46 (in Russ.).
16. Boukens M., Boukasbou A. Design of an intelligent optimal neural network-based tracking controller for nonholonomic mobile robot systems. *Neurocomputing*, 2017, vol. 226, pp. 46–57.
17. Caceres C. Rosario J.M., Amaya D. Approach of Kinematic Control for a Non-holonomic Wheeled Robot using Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms. *2017 International Work Conference on Bio-Inspired Intelligence: Intelligent Systems for Biodiversity Conservation, IWOB 2017 – Proceedings*, 2017, 7985533.
18. Takahashi K., Kurokawa M., Hashimoto M. Multi-layer quantum neural network controller trained by real-coded genetic algorithm. *Neurocomputing*, 2014, vol. 134, pp. 159–164.
19. Grigor'eva D.R., Gareeva G.A., Basyrov R.R. *Osnovy nechetkoy logiki: Uchebno-metodicheskoe posobie k prakticheskim zanyatiyam i laboratornym rabotam* [Fuzzy: Educational handbook for practical classes and laboratory work]. Naberezhnye Chelny, KFU Publishing House, 2018, 42 p. (in Russ.).
20. Hizhnyakov Yu.N. [Fuzzy control of the heat-carrier temperature]. *PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems*, 2016, no. 20, pp. 5–12 (in Russ.).
21. Passino K.M., Yurkovich S. *Fuzzy control. 1st Edition*. Menlo Park, California, Addison-Wesley Longman, 1997. 522 p.
22. Targ S.M. *Kratkiy kurs teoreticheskoy mekhaniki: Ucheb. dlya vtuzov* [Theoretical Mechanics – A Short Course]. Moscow, High School, 1986. 416 p. (in Russ.).
23. Meshkovskiy E.O., Kurmashev A.D. [Construction of a mathematical model of a four-wheel mobile robot with two differential drive units]. *Innovation and Investment*, 2020, no. 2, pp. 113–118 (in Russ.).
24. Koyain N.V., Mal'ceva O.P., Udut L.S. *Optimizatsiya konturov regulirovaniya sistem yelektroprivoda po tipovym metodikam* [Optimization of control circuits of electric drive systems according to standard techniques]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2005, no. 7, pp. 120–125 (in Russ.).

Evgeniy O. Meshkovskiy

Postgraduate Student, Institute of Energy,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29, Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, Russia, 195251
ORCID 0000-0002-6996-7864
Phone: +7 (812-5) 52-76-43
Email: meshkovskii_evge@mail.ru

Aron D. Kurmashev

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor,
Higher School of Cyberphysical Systems and Control,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
28, Grazhdanskiy pr., St. Petersburg, Russia, 195220
Phone: +7 (812-2) 97-59-60
Email: kurmashev_ad@spbstu.ru

Vladimir Ya. Frolov

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Higher School of Electric Power Systems,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29, Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, Russia, 195251
ORCID 0000-0002-1744-4375
Phone: +7 (812-5) 52-76-43
Email: frolov_vya@spbstu.ru