

Алгоритм синтеза нелинейной системы управления многоэлектроприводными промышленными машинами и технологическими комплексами

А. М. Белов, М. П. Белов✉

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ milesa58@mail.ru

Аннотация. Проведен анализ нелинейных систем управления многоэлектроприводными промышленными машинами и технологическими комплексами. Выявлено, что подобные технологические объекты имеют сложные механические подсистемы, широкий спектр внутренних и внешних помех, большую номенклатуру применяемых электродвигателей, переменную нагрузку, различные архитектуры построения систем управления электроприводами. В результате этого можно сделать вывод о том, что системы управления электроприводами таких машин и комплексов имеют следующие неопределенности: сигнальную, структурную и параметрическую. В таком случае для реализации системы управления многоэлектроприводными промышленными машинами и технологическими комплексами лучше применить нейронные сети (регуляторы), фильтры Калмана. Разработан алгоритм синтеза нелинейной системы управления многоэлектроприводными промышленными машинами и технологическими комплексами. На основе разработанного алгоритма приводится пример синтеза системы управления электроприводами системы мониторинга (оптико-механического комплекса). Приводятся результаты моделирования.

Ключевые слова: нелинейная система управления, многоэлектроприводная система, промышленный механизм, технологический комплекс, нейронный регулятор, подчиненное регулирование, фильтр Калмана, возмущающие воздействия.

Для цитирования: Белов А. М., Белов М. П. Алгоритм синтеза нелинейной системы управления многоэлектроприводными промышленными машинами и технологическими комплексами // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 9. С. 79–90. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-9-79-90.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Algorithm of Synthesis of Nonlinear Control System of Multi-Electro-Drive Industrial Machines and Technological Complexes

A. M. Belov, M. P. Belov✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ milesa58@mail.ru

Annotation. Nonlinear control systems of multi-electro-drive industrial machines and technological complexes are analyzed. It is revealed that such technological objects have complex mechanical subsystems, a wide range of internal and external disturbances, a large range of used electric motors, variable load, different architectures of construction of electric drive control systems. As a result, it can be concluded that the control systems of electric drives of such machines and complexes have the following uncertainties: signalling, structural and parametric. In this case it is better to apply neural networks (regulators), Kalman filters for realisation of control system of multi electric drive industrial machines and technological complexes. In the article the algorithm of synthesis of nonlinear control system of multi-electro-drive industrial machines and technological complexes is

developed. On the basis of the developed algorithm an example of synthesis of control system of electric drives of monitoring system (optical-mechanical complex) is given. The results of modelling are given.

Key words: nonlinear control system, multi-electro-drive system, industrial mechanism, technological complex, neural regulator, subordinate regulation, Kalman filter, disturbing influences.

For citation: Belov A. M., Belov M. P. Algorithm of Synthesis of Nonlinear Control System of Multi-Electro-Drive Industrial Machines and Technological Complexes // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 9. P. 79–90. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-9-79-90.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

К многодвигательным электроприводным системам относятся промышленные агрегаты и технологические комплексы, имеющие два электродвигателя и более, поэтому они представляют широкий класс технологического оборудования. К ним можно, например, отнести металлорежущие станки, роботы, манипуляторы, системы мониторинга (оптико-механические комплексы), бумагоделательные машины, станы непрерывной прокатки металла и т. д. Как правило, они имеют многомассовые подсистемы с упругими связями, образованными элементами электродвигателей, передачами (например, цилиндрическими) и обрабатываемым или перемещаемым материалом.

В них все электроприводы взаимосвязаны механическими подсистемами и обрабатываемым материалом (например, металлом в прокатном стане, бумажным полотном в бумагоделательной машине). Для эффективного построения систем управления (СУ) электроприводами в вышеперечисленном технологическом оборудовании проводят декомпозицию. Это возможно, если внутри взаимосвязанной системы создать замкнутые сепаратные системы управления.

Современные технологии обработки того или иного материала требуют от СУ электроприводами высокой точности по положению и скорости.

В настоящее время в таком оборудовании применяются: 1) различные электродвигатели, в том числе и многополюсные линейные и вращательные; 2) электронные преобразователи; 3) мехатронные модули; 4) высокодинамичные электроприводные системы (ЭПС); широкая номенклатура датчиков. Для различных технологий могут применяться системы управления электроприводами, осуществляющими многоосевые движения, например в металлорежущих станках. Для того чтобы улучшить динамические характеристики систем управления электроприводами, разработчики стремятся максимально упростить кинематические передачи.

Для данной группы технологического оборудования характерно действие на электроприводы различных возмущающих воздействий: упругости,

люфты и зазоры в механических передачах, статические и вязкие трения, динамические удары, природные воздействия (ветровые нагрузки, рельеф местности, воздушная и водная среды).

Работа в широком диапазоне режимов работы (от S1 до S8) приводит к неравномерному нагреву, приводящему к изменению параметров (потерям) в электродвигателях, преобразователях энергии (преобразователях частоты, тиристорных преобразователях и др.), измерительной системе.

В связи с этим применяются как классические методы управления (каскадного (подчиненного), модального, адаптивные, робастные), так и современные методы управления с применением искусственного интеллекта, генетических алгоритмов и нечеткой логики, различных видов фильтра Калмана, нейронных сетей (нейронных регуляторов), например сети Элмана.

Это связано с тем, что имеется сигнальная, параметрическая, а в ряде случаев и структурная неопределенности.

Анализ работ в области электропривода позволяет выделить следующие направления разработки и модернизации систем управления многоэлектроприводного технологического оборудования с целью энергосбережения и достижения ими требуемых динамических характеристик:

1) замена нерегулируемых электроприводов на регулируемые;

2) применение блочно-модульных подходов к построению СУ электроприводами и программного обеспечения;

3) новая идеология проектирования систем управления электроприводами с применением искусственного интеллекта. Это связано с тем, что для обеспечения высоких динамических показателей систем управления электроприводами в отдельных механизмах (например, в промышленных роботах, системах мониторинга, крупных радиотелескопах) движения исполнительных механизмов должны происходить с текущими ошибками по положению, не превышающими единиц угловых секунд для угловых перемещений и единиц микрон для линейных перемещений. Точность

таких систем в значительной степени определяется показателями динамической точности;

4) развитие методов каскадного (подчиненного) управления;

5) совершенствование систем Scada (человеко-машинного интерфейса) с целью расширения функционала модуля визуализации технологических процессов управления;

6) унификация технических и программных средств приводной техники;

7) применение «коротких» механических передач и безредукторных электроприводов – по возможности. Это позволяет увеличить полосу частот пропускания до 2000 Гц и более, а также повысить надежность промышленных механизмов. Колебания (как правило, полигармонические) в широком низкочастотном спектре частот, возникающие при работе промышленных агрегатов, не позволяют реализовывать высокие частоты пропускания. Эти полигармонические колебания характерны для упругих многомассовых механических подсистем (ММП).

Для того чтобы обосновать применение нейронных регуляторов в системах управления такими промышленными агрегатами и технологическими комплексами, приведем описание некоторых из них. Проводя их анализ, выделим особенности технологического процесса, динамические характеристики и др.

При проектировании взаимосвязанных систем электроприводов необходимо рассматривать его не как заданный (или выбранный из нескольких

вариантов), а как изменяемый, в том числе и с регуляторами. Поэтому параметры ММП (коэффициенты инерции, параметры упругих механических связей объекта) при синтезе варьируемые.

Металлообрабатывающие станки. На точность обработки оказывают влияние вибрации в станке, упругие деформации, режимы резания, износ обрабатываемого инструмента, погрешность установки заготовки и обрабатываемого инструмента, геометрическая точность оборудования и другие факторы.

Анализ работ отечественных и зарубежных ученых показал, что: 1) диапазон регулирования скорости лежит в диапазоне от 100 до 100 000; 2) полоса пропускания – до 500 Гц. Для управления электроприводами в основном применяют преобразователи частоты, построенные по двум схемам: 1) индивидуального преобразователя частоты; 2) группового выпрямителя и индивидуального инвертора. В металлообрабатывающих станках в основном применяются электродвигатели: асинхронные с короткозамкнутым ротором и вентильно-индукторные.

Наиболее распространены в настоящее время системы векторного управления электроприводами с датчиками обратных связей и без них, системы прямого управления моментом и СУ с использованием нейронных регуляторов (НР). На рис. 1 [1, с. 74] показана одна из функциональных схем СУ электроприводом главного движения без датчика скорости.

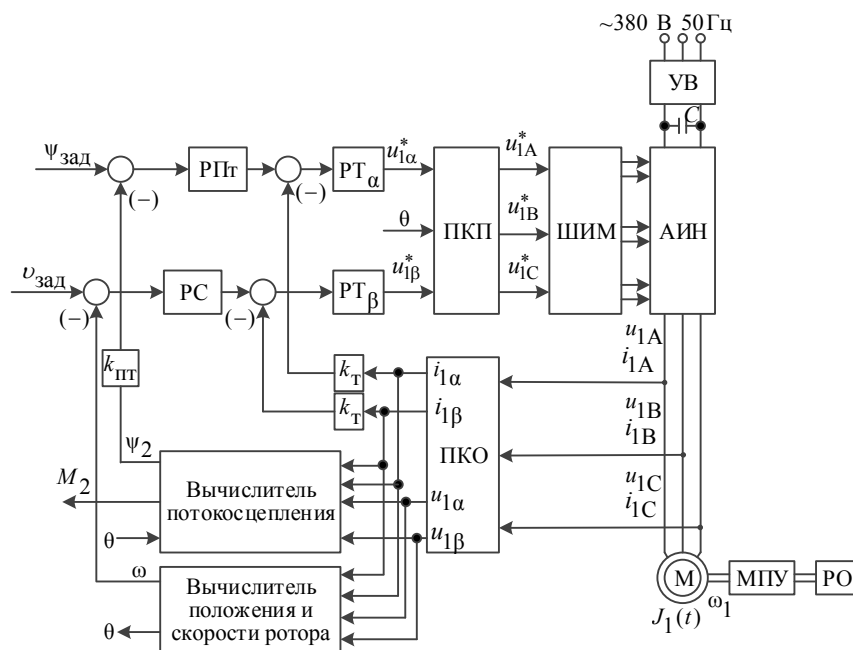


Рис. 1. Функциональная схема СУ электроприводом главного движения без датчика скорости
 Fig. 1. Functional diagram of the control system of the main motion electric drive without speed sensor

Решение этих проблем условно можно разделить на два основных направления:

1. Повышение жесткости и виброустойчивости отдельных узлов станка [2].
2. Разработка СУ электроприводами главного движения и подачи, обеспечивающих требуемые точности [2].

Промышленный робот манипулятор (ПРМ).

Основная задача при проектировании систем управления электроприводами ПРМ – это обеспечение стабильности перемещения его звеньев; парирования как внутренних, так и внешних помех; минимальной ошибки по положению исполнительного органа [3]. Как правило, для управления электроприводами ПР применяют классические методы управления с регуляторами: пропорционально-дифференциальные (ПД), пропорционально-интегральные (ПИ) или пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД). Кроме этого применяются адаптивные и робастные методы управления. Но когда робот работает с различными полезными нагрузками и имеет неопределенность в динамических моделях структур управления, применение классических методов управления ограничено.

Методы управления электроприводами ПР подробно изложены в [3].

Система мониторинга. Системы мониторинга, установленные на подвижных основаниях, используются для наблюдения за объектами слежения на земле, в море и в воздухе. Основной задачей оптико-механических комплексов (ОМК) служит стабилизация изображения, что обеспечивается качеством управления электроприводами ОКМ. В задачах стабилизации изображения системами управления реализуются стабилизирующие, следящие и программные высокоточные движения механизмов.

В системах мониторинга применяются двух-трехосные карданные системы и, соответственно, с учетом этого, – системы управления: одно-, двух- или трехканальные. На работу СУ электроприводами ОКМ влияет реакция транспортного средства, на котором она установлена [4].

В таких системах динамическая точность определяется в основном динамическими характеристиками: 1) возмущающими воздействиями; 2) помехами измерений. Динамические характеристики помех измерений представляются в виде сложных детерминированных и стохастических процессов.

Если слежение осуществляется в различных областях скоростей движений механизмов, то пе-

ревод системы из одной области в другую происходит посредством переключения структуры системы управления. Реализация такого траекторного режима осуществляется при ограничениях моментов электроприводов на уровне допустимых значений.

Общие принципы построения и расчета СУ электроприводами изложены в [4]. Для данного класса систем характерны:

- высокая степень организации управления электроприводом для получения жестких механических характеристик в разомкнутых системах;
- необходимость полного учета совокупности всех детерминированных и случайных процессов, влияющих на динамическую точность. Детерминированные и случайные процессы необходимо рассматривать в электроприводе, информационной системе, каналах управления;
- учет упругих свойств электроприводов и механизмов для реализации широких полос пропускания сигналов в системах управления.

Системы управления электроприводами таких объектов подробно описаны в [4], [5].

С целью компенсации негативного влияния задержки на точность отслеживания наблюдаемого объекта проектируют системы управления электроприводами ОКМ с соответствующей точностью. Для этого можно использовать нейронную сеть и генетические алгоритмы, например нейронную сеть Элмана.

В настоящее время в ОКМ применяются синхронные электродвигатели с постоянными магнитами [4], [5]. В [4], [6] показано, что в ОКМ можно применять безредукторные электроприводы.

Электроприводы крупных радиотелескопов (РТ). Рассмотрим особенности управления электроприводами крупного радиотелескопа на примере радиотелескопа РТ-70, который работает в двух режимах: автономный и радиоинтерферометрический. Функциональная схема СУ электроприводами (силовой части) по азимутальной оси представлена на рис. 2 [7, с. 28].

Наведение РТ в заданное положение обеспечивается работой азимутального и угломестного электроприводов. Эти электроприводы используют для совместной работы в асинхронных электродвигателях, редукторах, соединенных с поворотной платформой. Напряжение питания на электродвигатели подается от преобразователей частоты с автономным инвертором напряжения.

Радиотелескоп РТ-70 работает в двух режимах: 1) поиска космических объектов (быстрый); 2) слежения за дальними космическими объекта-

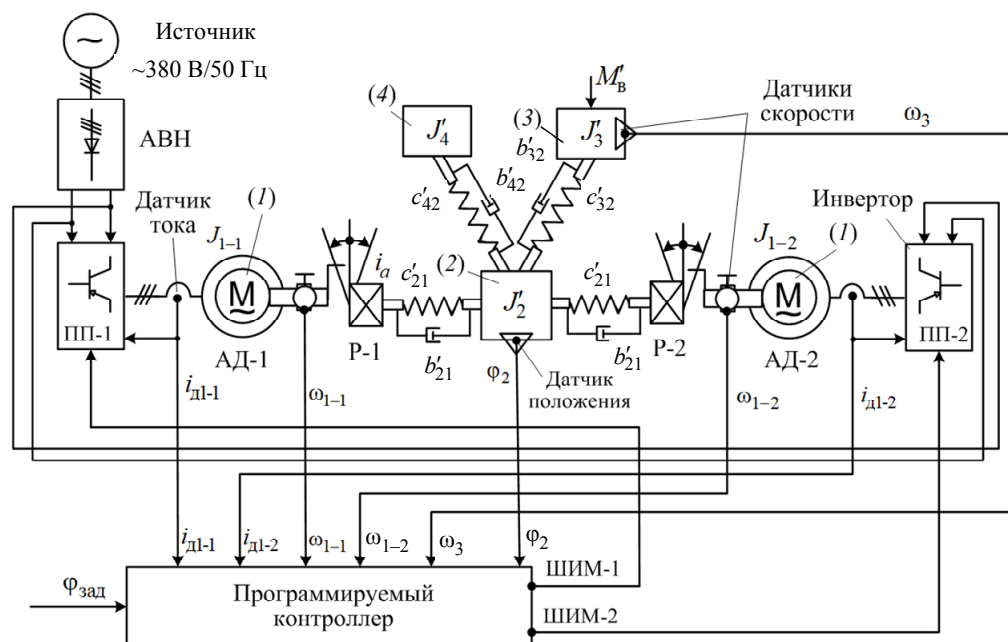


Рис. 2. Функциональная схема СУ электроприводами (силовой части) по азимутальной оси
 Fig. 2. Functional diagram of the control system of electric drives (power part) along the azimuthal axis

ми (медленный). Для каждого режима применяется индивидуальный следящий электропривод (СЭП). В ММП существуют слабо демпфированные колебания в конструкции РТ. При этом частота первого тона упругих колебаний лежит в пределах от 0.7 до 4 Гц [7].

Бумаго- и картоноделательные машины.

Такие машины характеризуются, прежде всего, скоростью и шириной вырабатываемой бумаги или картона [8]: ширина бумажного полотна от 6000 до 10 000 мм; скорость до 2000–2500 м/мин. Суммарная мощность электроприводов машин может достигать 7–8 МВт.

В основные задачи электроприводов машины входят: 1) последовательный запуск электроприводов секций; 2) поддержание равномерных нагрузок в электроприводах; 3) поддержание заданного натяжения полотна бумаги или картона [8].

Динамика электроприводов описана в [8]. Для управления общей скоростью и соотношением скоростей секций управление секциями осуществляется по цепям нагрузки и управления.

В таких машинах из-за особенностей технологии производства бумаги возникают транспортные запаздывания в выработке управляющих воздействий, что соответственно сказывается на динамических характеристиках управления. Транспортные запаздывания возникают в сушильной части и в транспортных механизмах машины. Транспортное запаздывание зависит от технологии сушки (пар или индукционный нагрев) и скорости пере-

мещения бумаги в машине. Компенсация транспортных запаздываний достигается введением в алгоритмы управления эталонных моделей процесса запаздывания [9]. Кроме транспортного запаздывания на СУ действуют случайные воздействия, определяемые температурой сушки бумажного полотна, его влажностью, возможными отклонениями параметров питающего напряжения и др. В этом случае классический многосвязный регулятор управления технологическими переменными (ТПер) не может обеспечить требуемых динамических характеристик [8] – с этой целью следует применять нейронные регуляторы. В настоящее время для обеспечения робастности СУ в нее вводят функцию. В некоторых режимах работы периодичность выполнения алгоритма управления ТПер может составлять не менее 60 с. В этих режимах необходимо повышать динамику локальных контуров СУ.

В настоящее время СУ ТПер в таких машинах выполняются как комбинированные системы. Структурная схема такой СУ показана на рис. 3. В таких СУ ТПер управление осуществляется по цепи обратной связи и по возмущению [9]. Коррекция по возмущению должна быть упреждающей.

Непрерывные сортовые прокатные станы (НПС). Они характеризуются тем, что металл во время прокатки находится одновременно в нескольких клетях НПС. В [10] приводятся следующие преимущества НПС:

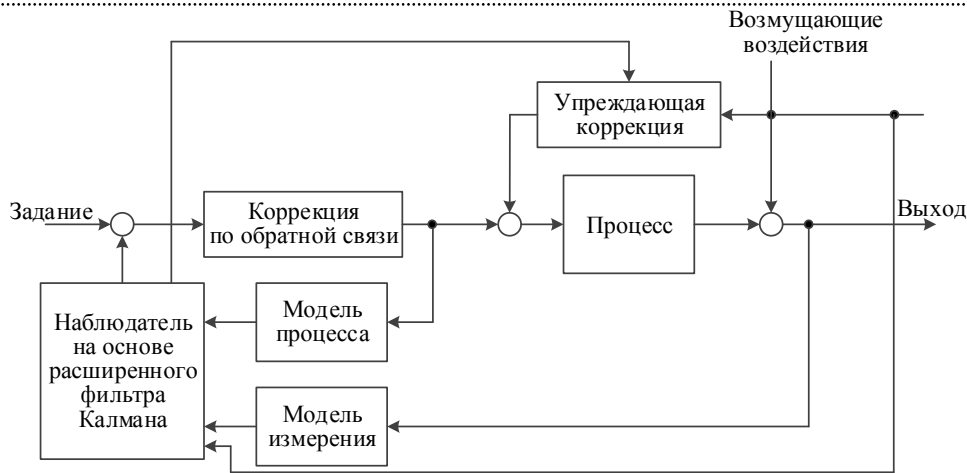


Рис.3. Структурная схема комбинированной системы управления технологическими переменными

Fig.3. Structural diagram of the combined system of control of technological variables

1. Регулирование скорости прокатки осуществляется от индивидуальных электроприводов клеток. Это позволяет значительно увеличить скорость прокатки, что приводит и к увеличению производительности НПС.

2. Паузы между прокатками металла непродолжительны (в чистой группе клеток НПС составляют всего 0.6...0.3 с).

В настоящее время в НПС применяются электроприводы постоянного и переменного [10] токов.

Анализ металлургического производства показал, что их электроприводы наиболее энергоемки. Суммарная мощность которых составляет десятки тысяч киловатт.

Проведенный анализ вышеперечисленных промышленных машин позволяет сделать вывод о том, что все рассмотренные объекты имеют сложные механические подсистемы; широкий спектр внутренних и внешних помех; большую номенклатуру применяемых электродвигателей; переменную нагрузку; различные архитектуры построения систем управления электроприводами. В результате этого можно сделать вывод о том, что в этом случае присутствуют следующие виды неопределенностей: сигнальной, структурной и параметрической. В этом случае для реализации СУ многоэлектроприводными механизмами лучше применить нейронные сети.

В этом случае в управлении многоэлектроприводными системами промышленных машин и комплексов наиболее эффективно применение современных методов управления с применением нейронных регуляторов различного типа, фильтра Калмана (расширенного фильтра Калмана).

При синтезе взаимосвязанной электромеханической подсистемы (ВЭМП) управления в общем случае необходимо учитывать не только помехи

измерения координат системы и возмущения по нагрузке, но также и параметрические возмущения в двигателях, связанные с формированием электромагнитных моментов, и другие воздействия.

Анализ научных работ показал, что в многодвигательных системах, с учетом вышесказанного, динамические процессы могут быть записаны в векторно-матричной форме в виде [11]

$$y = \mathbf{W}\mathbf{N} + \mathbf{K}\mathbf{A},$$

где $\mathbf{W} = r \times k$ – матрица эффективных полос пропускания системы, $\mathbf{W} = [\omega_{ij}]$, $i = \overline{1, r}$, $j = \overline{1, k}$, $\mathbf{K} = r \times k$ – матрица квадратов модулей передаточных частотных функций, ω_{ij} – частота полосы пропускания i в j взаимосвязанном канале управления в многоэлектроприводной системе, $\mathbf{K} = [|\mathbf{W}_{ij}(j\omega_j)|^2]$, $i = \overline{1, r}$, $j = \overline{1, k}$; $\mathbf{N} = [N_1 N_2 \dots N_k]^T$ – k -мерный вектор интенсивностей белого шума; $\mathbf{A} = [A_1^2 A_2^2 \dots A_k^2]^T$ – k -мерный вектор амплитуд регулярных воздействий.

Схема алгоритма синтеза нелинейной системы управления многоэлектроприводными системами промышленных машин и технологических комплексов представлена на рис. 4.

На шаге 1 алгоритма формируются исходные данные для синтеза взаимосвязанных многоэлектроприводных систем промышленных машин и технологических комплексов: определяются режимы работы, задаются исходные технические характеристики электроприводов, информационной составляющей (датчиков), параметры питающего напряжения, род тока, ограничения на параметры и т. д.

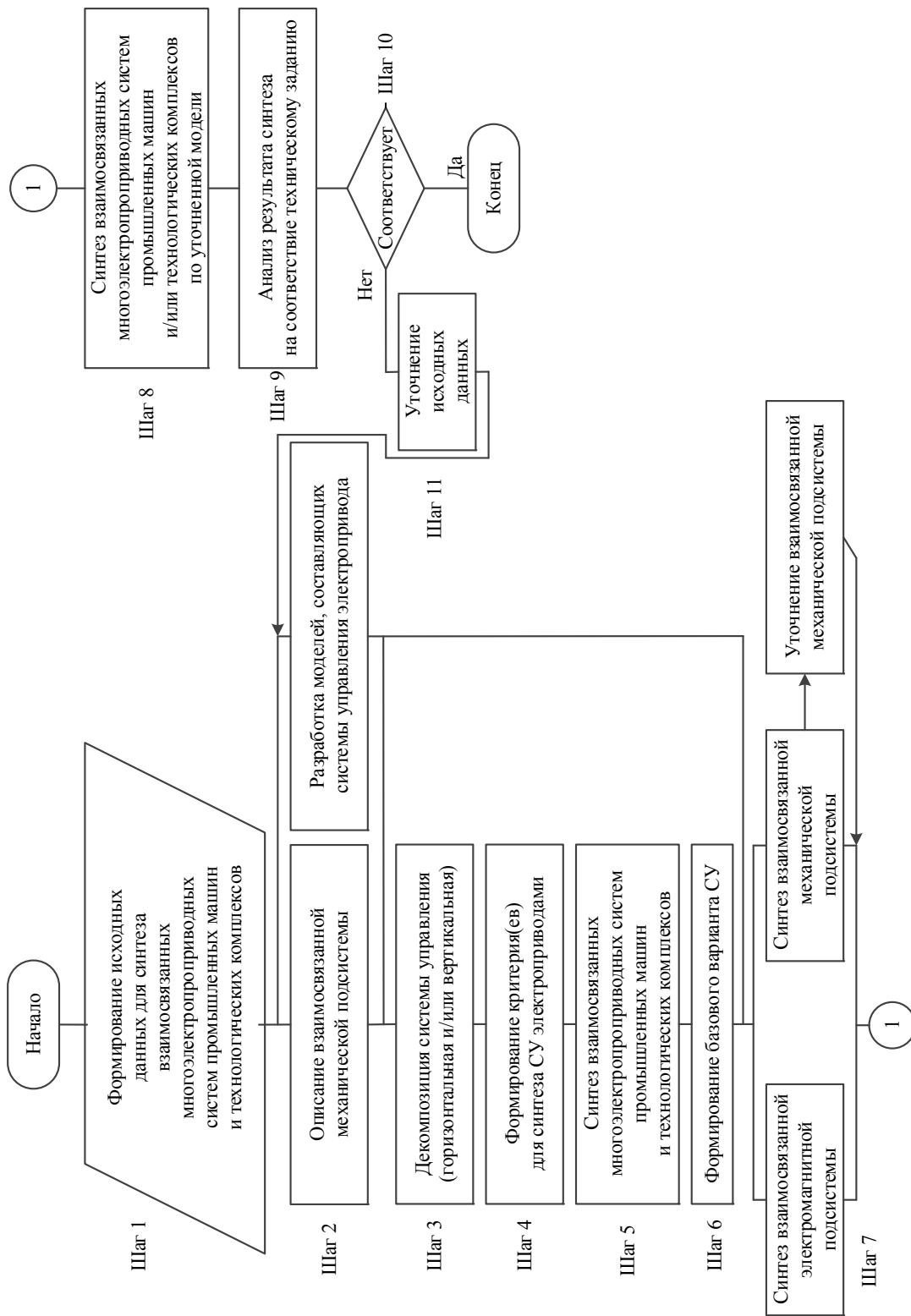


Рис. 4. Схема алгоритма синтеза нелинейной системы управления многоэлектроприводными промышленными машинами и технологическими комплексами
Fig. 4. Scheme of algorithm for synthesis of nonlinear control system of multi-electro-drive industrial machines and technological complexes

На шаге 2 описывается взаимосвязанная механическая подсистема с учетом геометрии и параметров передач (редукторов), расположения датчика, учетом упругих свойств обрабатываемого материала. На этом этапе при проектировании промышленного механизма и технологического комплекса возможна корректировка конструктивных параметров механической подсистемы с целью варьирования момента инерции составляющей механизма, жесткости и коэффициента демпфирования. На этом шаге также разрабатывается база моделей системы управления многоэлектроприводной системы промышленной машины и комплекса. В электроприводах существуют внутренние возмущения (например, для моделирования электропривода переменного рассчитываются параметры активных сопротивлений статора и ротора (R_s, R_r), индуктивность намагничивания (L_m), эквивалентная индуктивность рассеяния на зажимах статорной цепи (σL_s)), что вносит определенную погрешность (параметрическую неопределенность). Кроме этого существуют физические процессы, которые могут быть описаны приближенно. В этом случае предлагается применить для восстановления параметров расширенный фильтр Калмана.

На шаге 3 в случае сложной математической модели по определенной методике [11] осуществляют горизонтальную и/или вертикальную декомпозицию.

На шаге 4 формируют критерий качества с учетом задачи синтеза. Подробно методика формирования этого критерия качества описана в [11]. Оценка качества может быть как одно-, так и многокритериальной. В этом случае ряд критериев переводят в ограничения (описываются в виде неравенств).

На шаге 5 с учетом сформированного критерия качества, ограничений, наложенных на систему управления, а также возмущающих воздействий синтезируют нелинейную систему управления многоэлектроприводной промышленной машины или технологического комплекса.

На шаге 6 после анализа полученных результатов синтеза принимают решение о базовом варианте возможной архитектуры системы управления многоэлектроприводной системы промышленной машины.

На шаге 7, после того как определена базовая модель, синтезируют: 1) взаимосвязанную электромагнитную подсистему (с учетом нелинейных

процессов, происходящих в управляемых источниках питания, например в преобразователе частоты); 2) взаимосвязанную механическую подсистему (на этом этапе можно рассмотреть, в частности, место крепления датчиков скорости, возможность исключения редуктора и т. д.). Все эти мероприятия по изменению конструкции механической системы приводит к уточнению конструкции механизма, что приводит к расширению частотного канала управления и, соответственно, улучшает динамические характеристики привода.

На шаге 8 проводится синтез взаимосвязанной многоэлектроприводной системы промышленной машины или технологического комплекса по уточненной модели. В зависимости от промышленной машины или комплекса, их технических характеристик, режимов работы, условий эксплуатации применяют нейронные регуляторы, наблюдатели (например, на базе расширенного фильтра Кальмана), нечеткую логику, генетические алгоритмы.

На шаге 10 осуществляют анализ результатов синтеза. Для этого кроме традиционно применяемых переходных процессов применяют также анимационные изображения, отображающие поведение синтезируемого промышленной машины в реальном масштабе времени.

На шаге 11 принимается решение, продолжать проведение синтеза с измененными параметрами системы управления электроприводами или нет.

В общем, процесс синтеза нелинейной системы управления многоэлектроприводными системами промышленных машин и технологических комплексов многоитерационный.

Рассмотрим пример синтеза СУ электроприводами системы мониторинга (оптико-механического комплекса (ОМК)). Эквивалентная схема Омк с электроприводом в горизонтальной плоскости вращения (в вертикальной плоскости эквивалентная схема будет аналогичной) представлена на рис. 5.

Синтез Омк в целом описан в [11], поэтому рассмотрим только синтез процесса разработки информационной модели электропривода. Разработка модели реализуется в 2 шага. На первом шаге строится наблюдатель на базе расширенного фильтра Калмана (РФК) для процесса предсказания. Процесс синтеза РФК состоит из двух отдельных шагов: предсказание и коррекция [12].

Алгоритм оценки переменных состояния для предсказания описывается следующей системой уравнений:

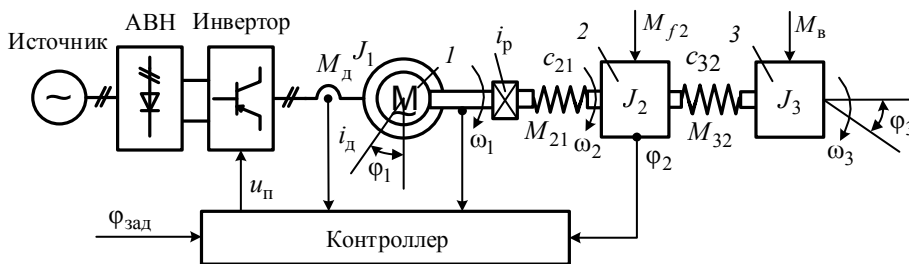


Рис. 5. Эквивалентная схема ОМК с электроприводом в горизонтальной плоскости вращения

Fig.5. Equivalent scheme of OMK with electric drive in the horizontal plane of rotation

$$\hat{\mathbf{x}}^-(k) = \mathbf{A}(k)\hat{\mathbf{x}}(k-1) + \mathbf{B}(k)\mathbf{u}(k);$$

$$\mathbf{P}^-(k) = \mathbf{A}(k-1)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{A}^T(k-1) + \mathbf{Q}(k-1); (*)$$

$$\hat{\mathbf{y}}(k) = \mathbf{C}(k)\hat{\mathbf{x}}^-(k),$$

где $\mathbf{Q}(k-1)$ – весовая матрица ковариации; $\mathbf{C}(k)$ – масштабная матрица, $\mathbf{B}(k)$ – матрица управления.

На рис. 5 введены следующие обозначения: J_1, J_2, J_3 – моменты инерции двигателя 1-й, 2-й и 3-й масс соответственно; c_{21}, c_{32} – коэффициенты жесткости механической подсистемы; $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – угловые скорости соответствующих масс; M_d, M_{21}, M_{32} – момент двигателя и моменты упругих связей между массами; M_{f2} – момент сухого трения; M_b – внешнее возмущение; i_p – передаточное число редуктора; i_d – ток двигателя; $u_{п}$ – напряжение на выходе преобразователя частоты (инвертора); АВН – активный выпрямитель напряжения; ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 – угловые положения соответствующей массы; $\phi_{зад}$ – задание угол выхода исполнительного механизма в заданное положение.

Далее для реализации коррекции применяется следующая система уравнений:

$$\mathbf{e}(k) = \hat{\mathbf{x}}(k) - \mathbf{C}(k)\hat{\mathbf{x}}^-(k);$$

$$\mathbf{L}(k) = \mathbf{P}^-(k)\mathbf{C}^T(k) \left[\mathbf{C}(k)\mathbf{P}^-(k)\mathbf{C}^T(k) + \mathbf{R}(k) \right]^{-1};$$

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = \hat{\mathbf{x}}^-(k) + \mathbf{L}(k)\mathbf{e}(k);$$

$$\mathbf{P}(k) = (\mathbf{I} - \mathbf{L}(k)\mathbf{C}(k))\mathbf{P}^-(k),$$

где $\mathbf{e}(k)$ – вектор погрешности измерения; $\hat{\mathbf{x}}^-(k)$, $\hat{\mathbf{x}}(k)$ – векторы оценки переменных состояния, предсказанного и текущего соответственно; $\mathbf{L}(k)$ – матрица коэффициентов усиления расширенного фильтра Калмана; $\mathbf{P}^-(k)$, $\mathbf{P}(k)$ – оценка матрицы ковариации ошибок, предсказанного и текущего соответственно; \mathbf{I} – единичная диагональная матрица.

Таким образом, наблюдатель на базе расширенного фильтра Калмана в контуре скорости ОМК будет иметь вид, представленный на рис. 6.

Векторы и матрицы для наблюдателя на основе расширенного фильтра Калмана в контуре скорости ОМК получаются из уравнений (*):

$$\mathbf{A}(k) =$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & -T_s c_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_s J_2^{-1} & 1 + T_s a_{22} & -T_s J_2^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_s c_{32} & 1 & -T_s c_{32} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T_s J_3^{-1} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & T_s & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - T_s T_{\phi}^{-1} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}(k) = \begin{bmatrix} T_s c_{21} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C}(k) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T;$$

$$a_{22} = J_2^{-1} M_{f0} \sigma \left[1 - \tanh^2(\sigma \omega_2) \right]; \quad \mathbf{u}(k) = \omega_1;$$

$$\mathbf{y}(k) = \phi_2; \quad \mathbf{w}(k) = w_b, \quad \mathbf{v}(k) = [v_1 \quad v_2]^T;$$

$$\mathbf{L}(k) = [l_1 \quad l_2 \quad l_3 \quad l_4 \quad l_5 \quad l_6]^T,$$

где T_s – период дискретизации; T_{ϕ} – постоянная времени фильтра; σ – величина дисперсии шума измерения; $\mathbf{w}(t)$, $\mathbf{v}(t)$ – белые шумы состояния и измерения соответственно, представляющие собой гауссовские случайные процессы с нулевым средним значением; w_b – возмущающее воздействие, $\mathbf{v}(k) = [v_1 \quad v_2]^T$ – вектор шумов измерения, l_1, \dots, l_6 – коэффициенты усиления фильтра Калмана.

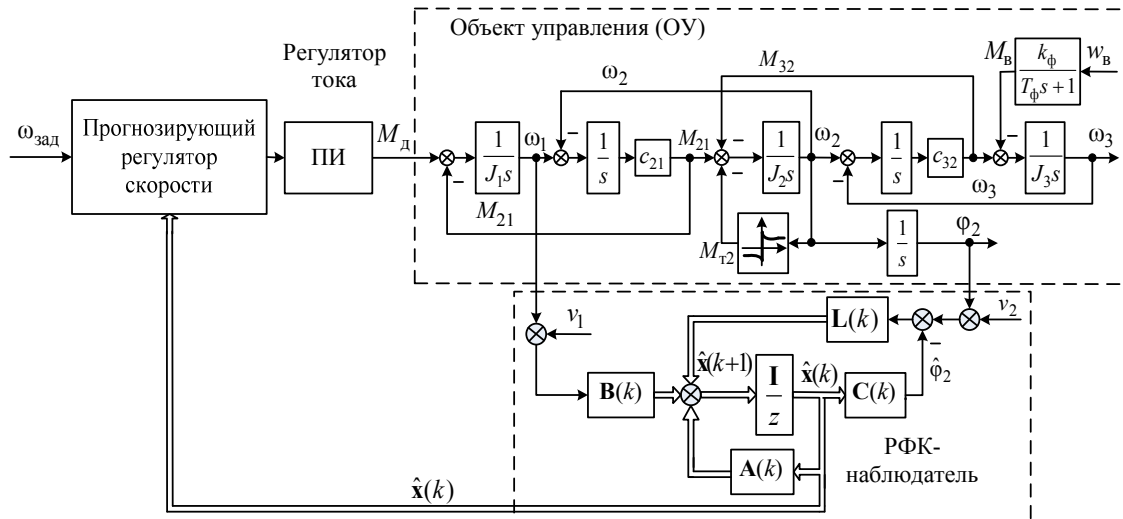


Рис. 6. Наблюдатель на базе расширенного фильтра Калмана в контуре скорости ОМК
Fig. 6. An observer based on the extended Kalman filter in the OMK velocity loop

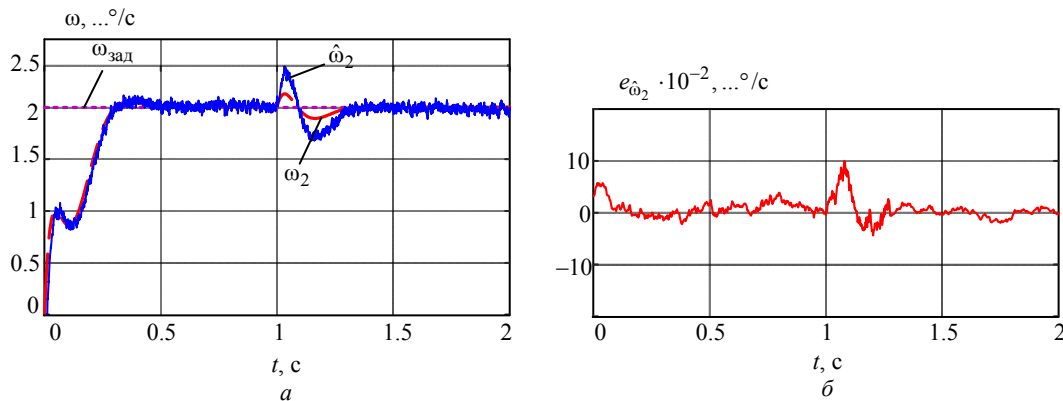


Рис. 7. Результаты оценки угловой скорости и ошибки движения второй массы
Fig. 7. Results of estimation of angular velocity and error of motion of the second mass

Тогда систему уравнений, описывающую контур скорости, можно записать в виде

$$\begin{cases} \hat{M}_{21}(k) = \hat{M}_{21}(k-1) + l_1 [\varphi_2(k) - \hat{\varphi}_2(k-1)]; \\ \hat{\omega}_2(k) = \hat{\omega}_2(k-1) + l_2 [\varphi_2(k) - \hat{\varphi}_2(k-1)]; \\ \hat{M}_{32}(k) = \hat{M}_{32}(k-1) + l_3 [\varphi_2(k) - \hat{\varphi}_2(k-1)]; \\ \hat{\omega}_3(k) = \hat{\omega}_3(k-1) + l_4 [\varphi_2(k) - \hat{\varphi}_2(k-1)]; \\ \hat{\varphi}_2(k) = \hat{\varphi}_2(k-1) + l_5 [\varphi_2(k) - \hat{\varphi}_2(k-1)]; \\ \hat{M}_B(k) = \hat{M}_B(k-1) + l_6 [\varphi_2(k) - \hat{\varphi}_2(k-1)]. \end{cases}$$

Моделирование работы наблюдателя на базе расширенного фильтра Калмана в контуре скорости СУ электроприводом ОМК в среде MatLab/Simulink осуществлялось со следующими исходными данными: $P_d = 1.2$ кВт – номинальная мощность двигателя; $M_d = 12$ Н·м – номинальный момент двигателя; $J_d = J_1 = 36 \cdot 10^{-4}$ кг·м² – моменты инерции двигателя и первой массы соответственно, $i_p = 140$ – передаточное число редуктора; $J_2 =$

$= 1.34$ кг·м², $J_3 = 1.42$ кг·м², $c_{21} = 21$ Н·м/рад, $c_{32} = 16$ Н·м/рад, $M_{f0} = 1.1$ Н·м, $\sigma = 0.16$ – значение дисперсии шума возмущающего воздействия, $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = 0.005$ – значение дисперсии шумов измерения в соответствующих каналах измерения, $\mathbf{Q}(k) = \text{diag}[0, 001]_{6 \times 6}$, $\mathbf{R}(k) = 0.025$, $T_s = 10^{-3}$ с, $\hat{\mathbf{x}}^-(0) = 0$, $\mathbf{P}^-(0) = \begin{bmatrix} 10^{-3} & 0 & 10^{-3} \\ 0 & 0.01 & 0.01 \end{bmatrix}$.

Результаты моделирования оценки состояния угловых скоростей ($\hat{\omega}_2$, $\hat{\omega}_3$) и их ошибок $e_{\hat{\omega}_2}$ на рис. 7.

На этом рисунке $\omega_{\text{зад}}$ обозначает заданное значение частоты вращения вала электродвигателя.

Выводы. Разработан алгоритм синтеза нелинейной системы управления многоэлектроприводными системами промышленных машин и технологических комплексов. Алгоритм учитывает различные режимы работы и условия

эксплуатации, возмущающие воздействия как внутри электропривода, так и внешние, а также ошибки информационного канала управления. Позволяет разрабатывать электромеханические системы с учетом таких неопределенностей, как сигнальная, структурная и параметрическая. По-

казана обоснованность применения расширенного фильтра Калмана в качестве наблюдателя для восстановления параметров. Получены результаты моделирования, соответствующие заданным характеристикам.

Список литературы

1. Гуляев И. В., Тутаяев Г. М. Системы векторного управления электроприводом на основе асинхронизированного вентильного двигателя. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2010. 197 с.

2. Металлорежущие станки: учеб. для вузов: в 2 т. Т. 1. / Т. М. Авраамова, В. В. Бушуев, Л. Я. Гиловой и др.; под ред. В. В. Бушуева. М.: Машиностроение, 2011. 608 с.

3. Юревич Е. И. Основы робототехники. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 368 с.

4. Демидова Г. Л. Разработка и исследование регуляторов с нечеткой логикой для следящих электроприводов оптико-механических комплексов: дис. канд. техн. наук. СПб., 2016.

5. Балашов О. Е. Модели и алгоритмы управления приводами бортовых оптикомеханических систем автосопровождения объектов: дис. канд. техн. наук. Рязань, 2006. 168 с.

6. Gawronski W. Modeling and control of antennas and telescopes. Springer Science & Business Media, LLC. 2008. 235 p. doi: 10.1007/978-0-387-78793-0.

7. Фьонг Ч. Х. Исследование системы управления следящими электроприводами наведения крупного

радиотелескопа под воздействием возмущений: дис. канд. техн. наук. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. 208 с.

8. Савва С. В. Моделирование систем управления бумагоделательными машинами. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2001.

9. Новиков В. А., Савва С. В. Алгоритмы управления бумаго- и картоноделательными машинами с транспортными запаздываниями // XXIX неделя науки СПбГТУ. Тез. докл. Межвуз. науч. конф. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. Ч. V. С. 116–117.

10. Автоматизированный электропривод – современная основа автоматизации технологических процессов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов, А. А. Сушников // Электротехника. 2003. № 5. С. 12–16.

11. Белов М. П., Новиков В. А. Оптимизация интегрированных электроприводных систем механизмов, агрегатов, машин и комплексов. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 299 с.

12. Фьонг Ч. Х., Белов М. П., Лань Н. В. Разработка метода компенсации момента сухого трения в системе управления электроприводами радиотелескопа на основе прогнозирующего регулятора // 22-я Международ. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM). СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. Т. 1. С. 115–118.

Информация об авторах

Белов Александр Михайлович – аспирант, старший преподаватель кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: sana19976@mail.ru.

Белов Михаил Петрович – д-р техн. наук, профессор кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: milesa58@mail.ru.

References

1. Guljaev I. V., Tutaev G. M. Sistemy vektornogo upravlenija jelektroprivodom na osnove asinhronizirovannogo ventil'nogo dvigatelja. Saransk: Izd-vo Mordovskogo un-ta, 2010. 197 s. (In Russ.).

2. Metallorezhushhie stanki: uch. dlja vuzov: v 2 t. T. 1. / T. M. Avraamova, V. V. Bushuev, L. Ja. Gilovoj, i dr.; pod red. V. V. Bushueva. M.: Mashinostroenie, 2011. 608 s. (In Russ.).

3. Jurevich E. I. Osnovy robototehniki. SPb.: BHV-Peterburg, 2010. 368 s. (In Russ.).

4. Demidova G. L. Razrabotka i issledovanie reguljatorov s nechetkoj logikoj dlja sledjashhih jelek-

tropriwodov optiko-mehanicheskikh kompleksov: dis. kand. tehn. nauk. SPb., 2016. (In Russ.).

5. Balashov O. E. Modeli i algoritmy upravlenija privodami bortovyh optikomehanicheskikh sistem avtosoprovozhdenija ob#ektov: dis. kand. tehn. nauk. Rjazan', 2006. 168 s. (In Russ.).

6. Gawronski W. Modeling and control of antennas and telescopes. Springer Science & Business Media, LLC. 2008. 235 p. doi: 10.1007/978-0-387-78793-0. (In Russ.).

7. Fyong Ch. H. Issledovanie sistemy upravlenija sledjashhimi jelektroprivodami navedenija krupnogo radioteleskopa pod vozdejstviem vozmushhenij: dis. kand. tehn. nauk. SPb.: SPbGjETU «LjETI», 2020. 208 s. (In Russ.).

8. Savva S. V. Modelirovanie sistem upravlenija bumagodelatel'nymi mashinam. SPb.: SPbGJeTU «LJeTI», 2001. (In Russ.).

9. Novikov V. A., Savva S. V. Algoritmy upravlenija bumago- i kartonodelatel'nymi mashinami s transportnymi zapazdyvanijami // XXIX nedelja nauki SPbGTU. Tez. dokl. Mezhvuz. nauch. konf. SPb: Izd-vo SPbGTU, 2001. Ch. V. S. 116–117. (In Russ.).

10. Avtomatizirovannyj jelektroprivod – sovremenaja osnova avtomatizacii tehnologicheskikh processov / M. P. Belov, V. A. Novikov, L. N. Rassudov, A. A. Sushnikov // Jelektrotehnika. 2003. № 5. S. 12–16. (In Russ.).

11. Belov M. P., Novikov V. A. Optimizacija integrirovannyh jelektroprivodnyh sistem mehanizmov, agregatov, mashin i kompleksov. SPb.: SPbGJeTU «LJeTI», 2015. 299 s. (In Russ.).

12. Fyong Ch. H., Belov M. P., Lan' N. V. Razrabotka metoda kompensacii momenta suhogo trenija v sisteme upravlenija jelektroprivodami radioteleskopa na osnove prognozirujushhego reguljatora // 22-ja Mezhdunar. konf. po mjagkim vychislenijam i izmerenijam (SCM). SPb.: SPbGJeTU «LJeTI», 2019. T. 1. S. 115–118. (In Russ.).

Information about the authors

Alexander M. Belov – postgraduate student, senior lecturer of the Department of Robotics and Automation of Production Systems, St. Petersburg Electrotechnical University «LETI».
E-mail: sana19976@mail.ru.

Mikhail P. Belov – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Robotics and Automation of Production Systems of St. Petersburg Electrotechnical University «LETI».
E-mail: milesa58@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 29.09.2024; принята к публикации после рецензирования 03.10.2024; опубликована онлайн 25.11.2024.

Submitted 29.09.2024; accepted 03.10.2024; published online 25.11.2024.
