

А. В. Гулай, канд. техн. наук, зав. кафедрой, is@bntu.by, В. М. Зайцев, канд. техн. наук, доц., is@bntu.by, Белорусский национальный технический университет, Минск

Интеллектуальная мехатронная система как адаптивная модель "управляемой конструкции"

Изложены принципы построения интеллектуальной модели, имитирующей процессы управляемых переходов между оптимальными состояниями "управляемой конструкции" при наличии НЕ-факторов. Проанализирован процесс идентификации состояний изучаемой конструкции, предполагающий сопоставление текущих значений ее параметров, соответствующих микросостояниям информационного образа, с классификационными параметрами заранее выделенного множества таксонов микросостояний. Представлены примеры выполнения интеллектуальной модели механической конструкции в виде цифровых регуляторов для управления исполнительным механизмом системных реакций.

Ключевые слова: "управляемая конструкция", интеллектуальная модель, идентификация состояний, таксономическая схема, импульсный регулятор

Введение

Развитие вычислительной техники, методов цифрового преобразования сигналов, алгоритмов обработки данных и знаний обусловило эффективное внедрение аппаратно-программных средств со свойствами искусственного интеллекта в технологии моделирования сложных систем. Интеллектуальные цифровые модели для исследования поведения объектов в неоднозначных, неопределенных и неконтролируемых условиях постепенно приходят на смену традиционным устройствам диагностики и прогнозирования как аналогового, так и цифрового типа. На учете указанных условий работы конкретных изучаемых объектов и анализе результатов имитации их характеристик базируется развиваемый авторами адаптивный подход к синтезу интеллектуальных цифровых моделей [1, 2]. Этот подход полностью сохраняет свою значимость при построении интеллектуальных систем для моделирования управляемых механических конструкций.

"Управляемая конструкция" в контексте предлагаемого исследования представляет собой механическую систему, которая, реагируя на внешнее воздействие, спонтанно (самопроизвольно) переходит из одного устойчивого состояния в другое. Характерная особенность объекта "управляемая конструкция" заключается в том, что он при внешнем воздействии

(функциональном или энергетическом) автоматически находит другое рациональное (возможно, оптимальное) состояние и фактически адаптируется к внешней нагрузке. При этом функциональные или энергетические рациональные состояния "управляемой конструкции" представляют собой набор ее надсистемных параметров и характеристик, которые обладают свойством количественной или качественной оценки.

Вызывает особый интерес опыт исследования "управляемой конструкции" при использовании электронной модели для определения ее надсистемных свойств [3]. При невозможности сенсорного контроля параметров "управляемой конструкции" (например, в зонах радиационного и химического загрязнения, в космосе, под водой или при отсутствии доступа к ней по иным причинам) вполне эффективно применение ее интеллектуальной модели в исследовательском процессе. В этом случае одной из основных проблем является задача анализа и моделирования с помощью интеллектуальной системы процесса идентификации состояний "управляемой конструкции" в рабочем режиме.

Целесообразно оснащение создаваемой модели высокоскоростными процессорами, развитым программным обеспечением, экспертными (обучающими) таблицами влияния значений системных параметров на характер поведения и конечные результаты работы. Указанная модель

реализует процедуры с четкими и нечеткими логическими производными правилами. Такой подход к построению модели "управляемой конструкции" позволяет представить ее как интеллектуальную цифровую мехатронную систему. Потенциально интеллектуальная система способна обеспечивать моделирование рациональных, а в ряде случаев даже оптимальных решений для достижения конечных надсистемных результатов функционирования объекта. Она позволяет изучать рабочие режимы целенаправленного преобразования вещества, энергии и информации.

Построение модели на основе компонентов со свойствами искусственного интеллекта дает возможность исследовать функциональную и энергетическую эффективность "управляемой конструкции" в условиях наличия различных НЕ-факторов. К ним относятся: неточности в определении текущих значений внешних и внутренних параметров; несоблюдение постоянства условий функционирования; неполнота или приблизительность описаний возможных системных состояний; нелинейности с большим числом интервалов кусочно-линейной аппроксимации; неработоспособность отдельных системных составных частей [4]. Объективное наличие НЕ-факторов существенно отягощает или делает невозможной предварительную строгую и точную выработку решений на основе использования аналитических методов, при этом сами решения на практике оказываются крайне "хрупкими".

Интеллектуальная модель "управляемой конструкции": анализ процесса ее функционирования

Анализ вариантов реализации в интеллектуальной модели процессов изменения состояний показывает, что в большинстве случаев эти процессы целесообразно строить по общей адаптивной схеме в виде циклически повторяемых блоков определенных системных операций. В каждом цикле вырабатывается управленческое решение, которое должно обеспечивать либо сохранение текущего состояния конструкции, либо ее перевод из текущего состояния в иное состояние, которое должно быть физически достижимым и по логике функционирования (или по предварительным оценкам экспертов) считается более рациональным и предпочтительным. Необходимо, чтобы оцен-

ка текущего системного состояния в отдельных циклах управления была, по возможности, достоверной и правдоподобной, не противоречила сформированному текущему информационному образу "управляемой конструкции" при конкретных условиях функционирования и являлась бы первичной в блоке причинно-следственных системных операций каждого цикла.

Совокупность системных операций по оценке текущих состояний "управляемой конструкции" в конкретных условиях функционирования можно определить с помощью понятия "идентификации (классификации) состояний" [5, 6]. Важнейшей задачей в данном случае является выбор средств математического описания процессов идентификации состояний и создание соответствующих адекватных моделей. Используемые на практике модели процессов идентификации состояний отличаются разнообразием форм, глубиной детализации совокупностей исходных параметров и их представлением в виде информационных образов. Конкретные модели "управляемой конструкции" могут иметь различный уровень формализации, который определяется информационными потребностями решаемых исследовательских задач.

Различные методы и приемы идентификации состояний применяются как на стадии создания интеллектуальной модели "управляемой конструкции", так и на этапе ее эксплуатации. В качестве указанных методов может рассматриваться формализация структурных схем, различные системные соотношения в форме операторных, алгебраических, дифференциальных, интегральных и иных уравнений, передаточные и весовые функции, графы. Эти методы позволяют функционально связать входные переменные, отображающие внешние воздействия, с выходными переменными и параметрами внутренних состояний "управляемой конструкции". В частности, один из возможных вариантов построения экспертных логико-вероятностных связей в интеллектуальной системе для подобных случаев управления рассмотрен в работе [1].

Наиболее результативным эффектом обладают методы, основанные на хорошо известной технологии структурно-функциональной декомпозиции изучаемой системы. При этом моделируемая система представляется в виде наборов составных частей, свойства и математические описания которых известны из ранее накопленного опыта системного анализа и практических наблюдений. Корректное объе-

динение указанных математических описаний определяет аналитическую модель процесса идентификации системы в целом [7, 8]. В ряде случаев из-за отсутствия достаточного количества необходимых сведений построение аналитического описания нуждается в привлечении дополнительного экспериментального материала и экспертных сведений [9—11]. Адаптивная модель процессов идентификации состояний и циклов функционирования "управляемой конструкции" в виде интеллектуальной мехатронной системы показана на рис. 1.

Процессы идентификации состояний могут рассматриваться как некоторая совокупность правил и операторов, в соответствии с которыми на основании отдельных параметров информационного образа "управляемой конструкции" устанавливается ее текущее системное состояние [12—14]. Информационные образы системотехнической ситуации в каждом цикле управления естественно оценивать текущими значениями моделируемых параметров, которые входят в состав фазовых координат, образующих текущие информационные векторы X_t интеллектуальной цифровой мехатронной системы:

$$X_t^T = (x_{t1}, x_{t2}, x_{t3}, \dots, x_{ti}, \dots, x_{tn}),$$

где T — операция транспонирования; n — число параметров; t — указатель времени.

Мгновенные значения отдельных координат x_{ti} характеризуют соответствующие микросостояния информационного образа системы,

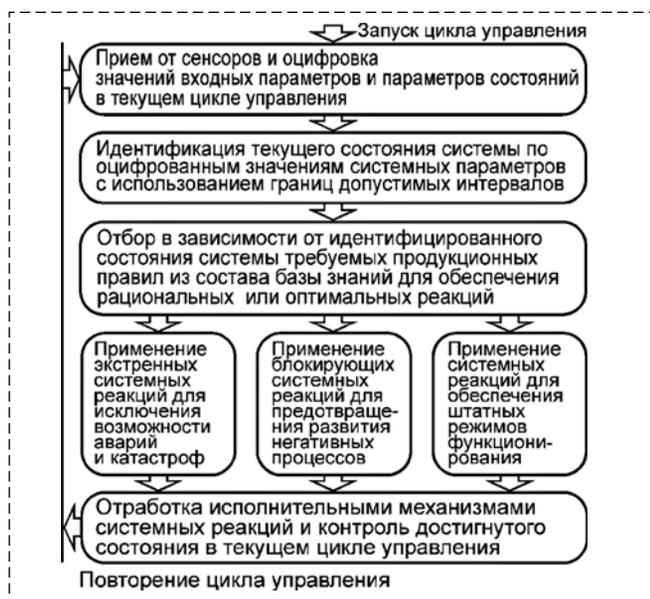


Рис. 1. Адаптивная модель "управляемой конструкции" в виде интеллектуальной мехатронной системы

Fig. 1. The adaptive model of "controlled mechanical construction" in the form of an intellectual mechatronic system

которые имеют существенную системную значимость, в связи с чем их называют признаками идентификации или классификации [8]. В состав векторов X_t^T (в терминологии Р. Эшби) должны включаться только "главные параметры", число которых необходимо и достаточно для решения требуемого набора задач логико-программного управления. На стадии системного анализа для построения векторов X_t^T целесообразно применять реальные параметры, которые фактически могут быть измерены и зафиксированы с помощью сенсорной аппаратуры и вычислительного оборудования, или надсистемные параметры, которые могут быть рассчитаны на основе описаний системы.

Значения виртуальных параметров и характеристик рассчитываются на основе реальных параметров непосредственно в процессе функционирования системы. Если ошибками определения значений некоторого параметра можно пренебречь, то параметр может считаться детерминированным. Вероятностные параметры имеют случайные значения, и их оценка проводится с такими ошибками, что по результатам этих операций невозможно определенно сказать, какое истинное числовое значение приняла данная величина.

Будем полагать, что первая группа из q линейно независимых координат x_{ti} вектора X_t^T с номерами $i = 1, 2, 3, \dots, q$ образует подмножество координат вектора входных переменных:

$$X_{t \text{ вх}}^T = (x_{t1}, x_{t2}, x_{t3}, \dots, x_{tq}).$$

Вторая группа из r координат x_{ti} вектора X_t^T с номерами $i = q + 1, q + 2, q + 3, \dots, q + r$ образует подмножество координат вектора выходных переменных системы

$$X_{t \text{ вых}}^T = (x_{t(q+1)}, x_{t(q+2)}, x_{t(q+3)}, \dots, x_{t(q+r)}).$$

Третья группа из s координат x_{ti} вектора X_t^T с номерами $i = q + r + 1, q + r + 2, q + r + 3, \dots, q + r + s$ отображает подмножество координат вектора переменных внутренних состояний:

$$X_{t \text{ сост}}^T = (x_{t(q+r+1)}, x_{t(q+r+2)}, x_{t(q+r+3)}, \dots, x_{t(q+r+s)}).$$

В данном случае очевидно выполнение следующего условия:

$$X_{t \text{ вх}}^T \cup X_{t \text{ вых}}^T \cup X_{t \text{ сост}}^T = X_t^T,$$

где \cup — операция объединения указанных координатных множеств.

Процесс идентификации предполагает сопоставление текущих значений контролируемых параметров, соответствующих микросостояниям информационного образа, с классификационными параметрами некоторого заранее выделенного множества таксонов микросостояний $\{S_{ij}; i = 1, 2, \dots, q, q + 1, q + 2, \dots, q + r, q + r + 1, \dots, n\}$. Здесь $(n - q + 1)$ — число выходных параметров и параметров внутренних состояний, входящих в информационный образ, $j = 1, 2, \dots, m$; m — число типов таксонов, применяемых для оценки микросостояний и общего текущего состояния.

Каждый из таксонов объединяет микросостояния с близкими свойствами, которые характеризуются некоторыми значениями той или иной системной фазовой координаты и требуют выработки и последующей реализации однотипных управленческих воздействий [8, 10]. Число возможных микросостояний в пределах одного таксона бесконечно.

Полноценная идентификация достигается при использовании таксономической схемы, предполагающей применение таксонов пяти основных видов ($m = 5$), которым может быть приписан следующий системотехнический смысл:

- таксоны $\{S_{i1}\}, \{S_{i5}\}, i = 1, 2, \dots, n$, соответствуют выработке экстренных управленческих решений и воздействий по каждому из контролируемых параметров i -го типа при достижении этим параметром соответствующей ему верхней или нижней аварийной границы;
- таксоны $\{S_{i2}\}, \{S_{i4}\}$ предусматривают выработку штатных предупредительных управленческих решений и воздействий по каждому из контролируемых параметров i -го типа при достижении этим параметром соответствующей ему верхней или нижней предупредительной границы;
- таксоны $\{S_{i3}\}$ являются таксонами предпочтительных системотехнических микросостояний, в которых предполагается принятие штатных управленческих решений и формирование воздействий по контролируемому параметру i -го типа либо в целях обеспечения требуемых законов его изменения, либо в целях сохранения его текущего значения.

Общее число возможных идентифицируемых системных состояний интеллектуальной цифровой мехатронной системы при использовании этой таксономической схемы равно 5^n . Возможно дополнительное введение иных по смыслу таксонов, представляющих системотехнический интерес для выработки решений

в условиях различных комбинаций параметров состояния. Расширение состава таксонов, как правило, обеспечивает уменьшение уровней рисков и выработку системой более обоснованных и адекватных решений, но сопровождается естественным возрастанием размерности требуемых для этого базовых информационно-логических условий.

Если признаки идентификации имеют количественные выражения, то для описания таксонов микросостояний с помощью знаний и опыта экспертов предварительно для каждого параметра i -го типа требуется установить диапазоны значений, соответствующие таксонам $\{S_{ij}\}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, 3, 4, 5$:

$$\{(\alpha_{i1 \min}, \alpha_{i1 \max}); (\alpha_{i2 \min}, \alpha_{i2 \max}); (\alpha_{i3 \min}, \alpha_{i3 \max}); (\alpha_{i4 \min}, \alpha_{i4 \max}); (\alpha_{i5 \min}, \alpha_{i5 \max})\}.$$

В общем случае эти диапазоны значений могут перекрываться, создавая зоны дополнительной неопределенности.

При вероятностном подходе обычно на основе предварительного исследования изучаемых процессов и по результатам анализа экспериментальных данных оцениваются функции $f_{ij}(x)$ плотности распределения значений параметров x_{ii} в обобщенных диапазонах $(\alpha_{i1 \min}, \alpha_{i5 \max})$. В этом случае могут быть рассчитаны точки $\alpha_{ij \text{ med}}$ абсцисс медианы распределения значений параметров x_i внутри диапазона таксонов соответствующих микросостояний:

$$\int_{\alpha_{ij \min}}^{\alpha_{ij \text{ med}}} f_{ij}(x) dx = \int_{\alpha_{ij \text{ med}}}^{\alpha_{ij \max}} f_{ij}(x) dx = 0,5.$$

При использовании в процессе моделирования алгоритмов нечеткой логики на основе знаний экспертов оцениваются функции $\phi_{ij}(x)$ принадлежности значений параметров x_{ii} к координатным диапазонам. Принадлежность значения параметра x_{ii} таксону микросостояния S_{ij} устанавливается исходя из следующего условия:

$$\alpha_{i1 \min} \leq x_{ii} \leq \alpha_{i5 \max}.$$

В алгоритмах классификации в качестве меры близости результатов измерения значений параметра x_{ii} таксону микросостояний S_{ij} возможно применение метрики квадратов расстояния до абсцисс медиан интервалов [10]:

$$x_{ii}(\rho_{ij}) \cup S_{ij}, \text{ если } \rho_{ij} = \min\{(\alpha_{ij \text{ med}} - x_{ii})^2\}.$$

Таким образом, каждому измеренному или рассчитанному текущему значению параметра x_{ij} может быть поставлен в соответствие один из пяти таксонов микросостояния S_{ij} или один из трехпозиционных битовых номеров логического кодирования таксонов $LC_{ii} = 001; 010; 011; 100; 101$. Значение $LC_{ii} = 000$ чаще всего используется для указания факта потери достоверности (системной значимости) результата текущего измерения параметра x_{ij} и невозможности его отнесения к тому или иному таксону S_{ij} . При попадании результатов измерений в равноудаленные точки перекрывающихся диапазонов 001; 010; 011 предпочтение следует отдавать диапазону с меньшим номером, а при попадании результатов в равноудаленные точки перекрывающихся диапазонов 011; 100; 101 предпочтение отдается диапазону с большим номером.

Номера логического кодирования таксонов позволяют составить конкатенацию длиной в $3n$ бит. Эта конкатенация может рассматриваться как ключевой код текущего состояния интеллектуальной мехатронной системы:

$$LC_i = LC_{i1} LC_{i2} LC_{i3} \dots LC_{in} \dots LC_{im}$$

Формирование множества конкатенаций в пространстве таксонов на логико-алгебраической основе соответствует построению границ разбиений возможных состояний интеллектуальной цифровой мехатронной системы и, следовательно, схем рационального или оптимального системного поведения и требуемых сценариев реализации управленческих операций. Обычно эти границы называются решающими границами системотехнических состояний.

В объеме поставленной задачи значительный интерес представляет вопрос о применяемом сценарии управления в интеллектуальной мехатронной системе, который отображает переходы между оптимальными состояниями "управляемой конструкции" под действием внешних факторов. С учетом этого рассмотрен пример выполнения интеллектуальной модели "управляемой конструкции" в виде импульсного регулятора для управления исполнительным механизмом системных реакций.

Оценка состояний "управляемой конструкции" с использованием интеллектуальной системы

Эффективная реализация управления адаптивным изменением состояний в интеллектуальной модели "управляемой конструкции" мо-

жет быть достигнута за счет предварительного синтеза и оперативного применения продукционных конструкций вида ЕСЛИ (IF) <антецедент> ТО (THEN) <консеквент>. Множество антецедентов и соответствующих им консеквентов из библиотеки продукций фактически определяет набор управленческих сценариев. Он может устанавливаться и модифицироваться в зависимости от желаемых конечных результатов функционирования интеллектуальной цифровой мехатронной системы с помощью обучающей матрицы, вводимой в систему в технологическом режиме. В основе управления выходными параметрами интеллектуальной цифровой мехатронной системы лежат программные блоки дискретного функционального преобразования входных переменных, блоки автоматического и терминального операторного регулирования, а также логико-программного управления.

Если в силу конечной надежности информационных трактов одна или несколько триад в конкатенации принимает нулевое значение $LC_{ii} = 000$, то наблюдается потеря достоверности (системной значимости) соответствующими параметрами x_{ij} . При этом все вычисления и преобразования, в которых используются эти параметры, должны блокироваться. С учетом такой ситуации в состав интеллектуальной мехатронной системы целесообразно предварительное введение таблиц параметров x_{ij} , для которых потеря значимости должна сопровождаться реализацией сценария с обязательным информированием оператора системы (исследователя) о сложившемся положении и последующим безусловным выполнением функционального контроля информационных каналов. Решение о продолжении функционирования системы возлагается на оператора.

Если одна или несколько триад в конкатенации принимают значения 001 или 101, то констатируется переход этими параметрами через установленные границы аварийной сигнализации. Все вычисления и преобразования, в которых используются указанные параметры, должны блокироваться. Сценарий функционирования системы предусматривает обязательное информирование оператора о сложившейся ситуации и принудительный плавный переход на ручной режим управления по группам заранее определенных выходных параметров, а также параметров внутренних состояний. Возвращение к автоматическому режиму управления должно выполняться в данном случае по командам оператора.

Коды 010 и 100 указывают на наличие в системе негативных тенденций с переходом тех или иных параметров через границы предупредительных диапазонов. Блокировку вычислений и преобразований в этих случаях проводить не требуется, но оператор системы оповещается о зарождении и развитии указанных тенденций. Код 011 предполагает функционирование системы с выработкой управленческих решений для обеспечения требуемых законов изменения или сохранения значений соответствующего параметра или группы параметров.

Для линейных и линеаризованных систем переход от дифференциальных уравнений к их операторной форме с использованием прямого преобразования Лапласа при нулевых начальных условиях дает следующий типовой результат [15]:

$$pX_{t \text{ сост}}(p) = AX_{t \text{ сост}}(p) + BX_{t \text{ вх}}(p);$$

$$X_{t \text{ вх}}(p) = CX_{t \text{ сост}}(p).$$

Здесь A , B , C — системные матрицы преобразования фазовых координат, получаемые аналитическим, экспериментальным или экспертным путем, в том числе методом моделирования или исследования системных аналогов.

Это позволяет преобразовать операторные уравнения в уравнения выходов и состояний:

$$X_{t \text{ вх}}(p) = G(p)X_{t \text{ вх}}(p), X_{t \text{ сост}}(p) = H(p)X_{t \text{ вх}}(p),$$

где $G(p) = CB(pI - A)^{-1}$ — операторная матрица выходов; $H(p) = B(pI - A)^{-1}$ — операторная матрица состояний; I — единичная матрица. Матрицы $G(p)$, $H(p)$ называются передаточными, так как их элементами являются передаточные функции, которые отображают уровни влияния тех или иных входных переменных на выходные параметры или на переменные внутренних состояний:

$$x_{t \text{ вх}} j(p) = G_{j1}(p)x_{t \text{ вх}} 1(p) + G_{j2}(p)x_{t \text{ вх}} 2(p) + \dots + G_{jq}(p)x_{t \text{ вх}} q(p), j = 1, 2, \dots, r;$$

$$x_{t \text{ сост}} k(p) = H_{k1}(p)x_{t \text{ вх}} 1(p) + H_{k2}(p)x_{t \text{ вх}} 2(p) + \dots + H_{kq}(p)x_{t \text{ вх}} q(p), k = 1, 2, \dots, s.$$

Внедрение цифровых методов обработки и преобразования сигналов открывает реальные перспективы практического применения математического аппарата передаточных матриц, который обеспечивает дальнейшее расширение алгоритмических возможностей по учету и реализации многопараметрических функциональных связей в интеллектуальной циф-

ровой мехатронной системе. Поскольку перевод во временную область координат векторов $X_{t \text{ вх}}(p)$, $X_{t \text{ сост}}(p)$ соответствует выполнению операций суммирования результатов дискретных сверток координатных импульсных характеристик в решетчатой форме $g_{ji}(n, \Delta t)$, $h_{ki}(n, \Delta t)$ и соответствующих им отсчетов $x_{\text{вх}} i(n, \Delta t)$ фазовых координат, то с помощью программных средств возможно выполнение следующих расчетных операций:

$$x_{t \text{ вх}} j(n, \Delta t) = \sum_{i=1}^r \sum_{m=0}^n g_{ji}(n, \Delta t)x_{\text{вх}} i(n-m, \Delta t);$$

$$x_{t \text{ сост}} k(n, \Delta t) = \sum_{i=1}^r \sum_{m=0}^n h_{ki}(n, \Delta t)x_{\text{вх}} i(n-m, \Delta t).$$

Эти операции в библиотеках известных типов контроллеров, как правило, не предусматриваются, поскольку обладают сравнительно высокой вычислительной емкостью. Выполнение таких операций требует применения в составе интеллектуальных цифровых мехатронных систем вычислительного оборудования с адекватной общей производительностью, методика определения и выбора которой представлена в работе [16].

Если установлено, что некоторая координата $x_{t \text{ вх}} i$ не оказывает влияния на координаты векторов $X_{t \text{ вх}}$ или $X_{t \text{ сост}}$, то полагается $G_{ji}(p) = 0$ или $H_{ki}(p) = 0$. Численный метод перехода от передаточных функций $G_{ji}(p)$, $H_{ki}(p)$ к решетчатым оригиналам импульсных характеристик $g_{ji}[n, \Delta t]$, $h_{ki}[n, \Delta t]$ предложен в работе [17]. Этот переход целесообразно выполнять в интеллектуальной модели "управляемой конструкции" в технологическом режиме с одновременным формированием и усечением табулированных оригиналов указанных импульсных характеристик.

Одним из основных компонентов интеллектуальной модели "управляемой конструкции" является импульсный регулятор для управления исполнительным механизмом системных реакций. Построение импульсных регуляторов предполагает использование схемы формирования виртуального значения сигнала рассогласования $p_x[n, \Delta t]$ между текущим значением входного сигнала $X_i[n, \Delta t]$ и его некоторым значением X^* , которое определяется задатчиком интеллектуальной системы [15]. Рассогласование подвергается дискретной свертке с табулированным и усеченным оригиналом требуемой импульсной характеристики.

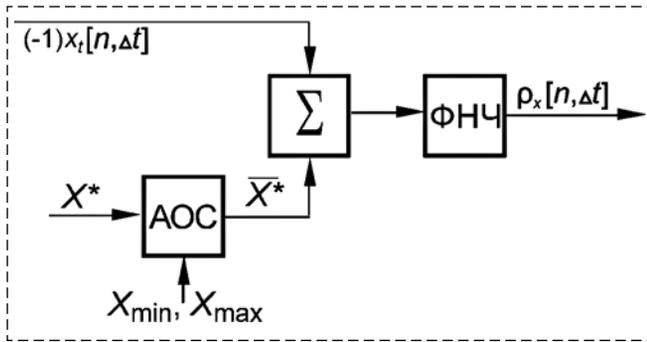


Рис. 2. Схема формирования виртуального значения сигнала рассогласования $\rho_x[n, \Delta t]$
 Fig. 2. The formation scheme of the virtual value of the error signal $\rho_x[n, \Delta t]$

Схема формирования сигнала рассогласования представлена на рис. 2. При формировании сигнала рассогласования наряду с сумматором (Σ) дополнительно применяются блоки амплитудного ограничения задающего сигнала (АОС) и фильтрации нижних частот выходного сигнала (ФНЧ). Функционирование этих блоков обеспечивается заданием параметров настройки: для блока ограничения сигнала — X_{\min} , X_{\max} (минимальное и максимальное значения сигнала); для фильтра нижних частот — k_ϕ , T_ϕ (коэффициент передачи и постоянная времени). Блок ограничения задающего сигнала реализует следующий алгоритм:

ЕСЛИ (IF) $X_{\min} \leq X^* \leq X_{\max}$ ТО (THEN) $\overline{X^*} = X^*$;

ЕСЛИ (IF) $X_{\min} < X^*$ ТО (THEN) $\overline{X^*} = X_{\min}$;

ЕСЛИ (IF) $X_{\max} > X^*$ ТО (THEN) $\overline{X^*} = X_{\max}$;

где $\overline{X^*}$ — сигнал, ограниченный по амплитуде. Передаточная функция фильтра нижних частот имеет следующий вид:

$$W_\phi(p) = k_\phi / (T_\phi p + 1).$$

Сигнал рассогласования при этом равен:

$$\rho_x^*[n, \Delta t] = \overline{X^*} + (-1)X_t[n, \Delta t];$$

$$\rho_x[n, \Delta t] = \sum_{m=0}^n \rho_x^*[n, \Delta t] W_\phi[n - m, \Delta t],$$

где $W_\phi(t) = L^{-1}\{W_\phi(p)\}$; L^{-1} — оператор обратного преобразования Лапласа.

В ряде случаев удается построить более простые и экономичные рекуррентные соотношения для выполнения расчетов по значениям рассогласований $\rho_x[n, \Delta t]$. Примером

может служить построение модели на основе цифровых пропорциональных интегрально-дифференциальных (ПИД) регуляторов. В таком случае может применяться не дискретная свертка сигнала рассогласования $\rho_x[n, \Delta t]$ и импульсной характеристики данного регулятора (последняя определяется обратным преобразованием Лапласа от передаточной функции $W(p) = K_p + K_i(T_i p)^{-1} + K_d p(T_d p + 1)^{-1}$, а следующее рекуррентное соотношение:

$$x_{ii}[n + 1, \Delta t] \approx x_{ii}[n, \Delta t] + k_1\{\rho_x[n, \Delta t] - \rho_x[n - 1, \Delta t]\} + k_2\rho_x[n, \Delta t] + k_3\{\rho_x[n, \Delta t] - 2\rho_x[n - 1, \Delta t] + \rho_x[n - 2, \Delta t]\},$$

где $k_1 = K_p$; $k_2 = K_i \Delta t T_i^{-1}$; $k_3 = K_d T_d \Delta t^{-1}$ — обобщенные константы регулятора. Здесь используются следующие условные обозначения: K_p — коэффициент передачи по постоянной составляющей; K_i , T_i — соответственно коэффициент передачи и постоянная времени интегрирующей части регулятора; K_d , T_d — соответственно коэффициент передачи и постоянная времени дифференцирующей части регулятора.

Схема возможного построения процесса выработки управленческих (выходных) значений параметров для данного случая приведена на рис. 3. Функции, реализуемые блоками цифрового ПИД регулятора, поясняются соответствующими математическими выражениями, представленными на схеме. В регуляторе используются следующие параметры настройки: σ , k_1 , k_2 , k_3 , $\bar{\rho}_x[-1, \Delta t] = \bar{\rho}_x[-2, \Delta t] = 0$. Для предотвращения "дребезга" регулятора в его состав введен блок обработки зоны нечувстви-

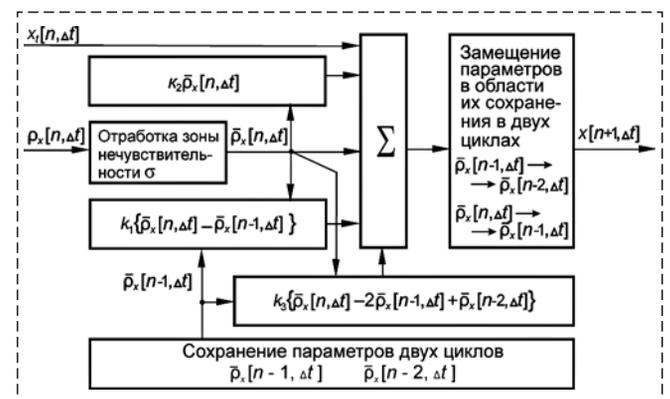


Рис. 3. Схема формирования выходного параметра $x[n + 1, \Delta t]$ цифровым пропорциональным интегрально-дифференциальным регулятором
 Fig. 3. The scheme of output parameter formation $x[n + 1, \Delta t]$ by the digital proportional integral-differential controller

тельности, который реализует следующий алгоритм:

ЕСЛИ (IF) $|\rho_x[n, \Delta t]| \leq \sigma$ ТО (THEN)
 $\bar{\rho}_x[n, \Delta t] = 0$;

ЕСЛИ (IF) $|\rho_x[n, \Delta t]| \geq \sigma$ ТО (THEN)
 $\bar{\rho}_x[n, \Delta t] = |\rho_x[n, \Delta t]| - \sigma/2 \text{sign}(\rho_x[n, \Delta t])$.

Следует отметить, что логико-программное решение рассматриваемой задачи строится на основе технологии обхода ветвей древовидного графа, который отражает возможные варианты реализации сценариев в зависимости от заданных целей и задач функционирования интеллектуальной цифровой мехатронной системы при имитации характеристик "управляемой конструкции". Проблема представления сценариев в виде древовидного графа при исследовании объекта с помощью интеллектуальной модели требует отдельного рассмотрения.

Заключение

Изложены принципы построения интеллектуальной модели, имитирующей процессы управляемых переходов между различными состояниями "управляемой конструкции" при наличии НЕ-факторов. В основу построения интеллектуальной модели "управляемой конструкции" положен принцип циклического адаптивного управления, в каждом цикле которого реализуется технология выработки управленческого решения, обеспечивающего сохранение текущего состояния конструкции или ее перевод в более предпочтительное состояние. Проанализирован процесс идентификации состояний изучаемой конструкции, предполагающий сопоставление текущих значений ее параметров, соответствующих микросостояниям информационного образа, с классификационными параметрами заранее выделенного множества таксонов микросостояний. Для этого предложена таксономическая схема, основанная на применении таксонов пяти основных видов, которым приписан определенный системотехнический смысл. Показано, что в качестве меры близости значений параметра таксону микросостояний возможно применение метрики квадратов расстояния до абсцисс медиан выделенных интервалов.

Рассмотрен сценарий управления в интеллектуальной мехатронной системе, который отображает переходы между оптимальными

состояниями "управляемой конструкции" под действием внешних факторов. Представлен пример выполнения интеллектуальной модели механической конструкции в виде импульсного регулятора для управления исполнительным механизмом системных реакций. Построение импульсного регулятора основано на использовании схемы формирования виртуального сигнала рассогласования между текущим значением входного сигнала и его значением, определяемым задатчиком интеллектуальной системы. Указанное рассогласование подвергается дискретной свертке с табулированным и усеченным оригиналом требуемой импульсной характеристики. Показано также, что достаточно экономичные рекуррентные соотношения для выполнения расчетов по значениям рассогласований сигналов формируются при построении модели на основе цифровых ПИД регуляторов.

Список литературы

1. Гулай А. В., Зайцев В. М. Экспертная логико-вероятностная модель интеллектуальной системы управления // Наука и техника. 2014. № 1. С. 30–37.
2. Гулай А. В., Зайцев В. М. Эвристико-алгоритмические методы в интеллектуальных технологиях проектирования системотехнических комплексов // Новый университет. Серия "Технические науки". 2014. № 02 (24). С. 7–11.
3. Абовский Н. П., Овсянко В. М. Управляемая конструкция как система. Электронная модель — "мозг" системы // Архитектура и строительство Беларуси. 1994. № 5–6. С. 1–6.
4. Рыбина Г. В. Основы построения интеллектуальных систем. М.: Финансы и статистика, ИНФРА, 2010.
5. Гроп Д. Методы идентификации систем. М.: Мир, 1979.
6. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 1991.
7. Сейдж Э. П., Мелса Дж. Л. Идентификация систем управления. М.: Наука, 1974.
8. Дилигенская А. Н. Идентификация объектов управления. Самара: Самарский государственный технический университет, 2009.
9. Вентцель Е. С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. М.: Наука, 1988.
10. Кини Р. Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. М.: Радио и связь, 1981.
11. Кузнецов Е. С. Управление техническими системами. М.: МАДИ, 2003.
12. Николаев В. И., Брук В. М. Системотехника: методы и приложения. Л.: Машиностроение, 1985.
13. Красников В. С. Разработка управляющих решений. СПб.: СЗАГС, 1999.
14. Сейдж Э. П., Мелса Дж. Л. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. М.: Связь, 1976.
15. Толмачев В. А. Основы управления электромеханическими системами. СПб.: ИТМО, 2006.
16. Гулай А. В., Зайцев В. М. Особенности проектирования интеллектуальных компонентов систем оперативного управления и приборов цифровой автоматики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 7. С. 474–482.
17. Зайцев В. М., Путков В. Н. О численном обращении преобразования Лапласа // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 1977. № 2. С. 127–129.

Intelligent Mechatronic System as an Adaptive Model Having "Controlled Construction"

A. V. Gulay, is@bntu.by, V. M. Zaitsev, is@bntu.by,
Belorussian National Technical University, Minsk

Corresponding author: **Gulay Anatoly V.**, Associate Professor, Chief of Department,
Belorussian National Technical University, Minsk, 220065, Republic of Belarus, e-mail: is@bntu.by

Accepted on April 15, 2019

Abstract

The authors develop an adaptive approach to synthesis of intelligent digital models, which have acquitted particular significance during the research of controlled mechanical constructions. Capacity for generation of active reactions to external functional and energy impacts is a distinctive feature, when the object automatically finds rational or optimal states by means of respective adaptation to the aforesaid impacts. The paper presents principles of intelligent model construction, which simulates the processes of controlled transitions between various states of "the controlled construction" in presence of NON-factors. The principle of cyclic adaptive control has been taken as the basis of generation of the "controlled construction" intelligent model, where in every cycle the managerial decision generation technology is implemented, which provides maintenance of the current construction state or its transition to a more preferable state. The identification process for identification of states of the studied construction has been analyzed, and it assumes comparison of the current values of its parameters corresponding to microstates of the informational image along with classification parameters of the preliminary designated multiple taxons of microstates. A taxonomic scheme was offered for this purpose based on the use of five main taxons having the definite system meaning. It has been shown that application of the squared distance metrics to median abscissa of the selected intervals is technologically sufficient as a proximity measure of the parameter value to the taxon of microstates. The management scenario has been considered in the intelligent mechatronic system, which displays transitions between the optimal states of "the controlled construction" under the influence of external factors. An example, of the intelligent model of mechanical construction is shown in the form of a pulse-type regulator for control of the executive mechanism of system reactions. Construction of the pulse-type regulator is based on the use of the virtual signal formation scheme of mismatch between the current value of the input signal and its value defined by the intelligent system setting mechanism. This mismatch is subject to discrete convolution with the tabulated and abridged original of the required pulse characteristic. It is also shown that sufficiently economical recurrent interrelations for calculations according to mismatch values are formed during construction of the model on the basis of proportional integral and differential regulators.

Keywords: "controlled construction", intelligent model, states identification, taxonomic scheme, pulse controller

For citation:

Gulay A. V., Zaitsev V. M. Intelligent Mechatronic System as an Adaptive Model Having "Controlled Construction", *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 10, pp. 600–608.

DOI: 10.17587/mau.20.600-608

References

1. **Gulaj A. V., Zajcev V. M.** *Nauka i Tehnika*, 2014, no. 1, pp. 30–37 (in Russian).
2. **Gulaj A. V., Zajcev V. M.** *Novyj universitet. Serija "Tehnicheskie nauki"*, 2014, no. 2, pp. 7–11 (in Russian).
3. **Abovskij N. P., Ovsjanko V. M.** *Arhitektura i Stroitel'stvo Belarusi*, 1994, no. 5–6, pp. 1–6 (in Russian).
4. **Rybina G. V.** Fundamentals of Intellectual System Construction, Moscow, *Finansy i Statistika*, 2010 (in Russian).
5. **Graup D.** *Identification of System*, Huntington, New York, Krieger, 1976.
6. **Ljung L.** *System Identification: Theory for the User*, New Jersey, Prentice-Hall, 1999.
7. **Sage A. P., Melsa J. L.** *System Identification*, New York, Academic Press Inc, 1971.
8. **Diligenskaja A. N.** Objects of Control Identification, Samara, *Samarskij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet*, 2009 (in Russian).
9. **Ventcel' E. S.** Investigation of Operations, Moscow, *Nauka*, 1988 (in Russian).
10. **Keene R. L., Raiffa Y. H.** *Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs*, New York, John Wiley, 1978.
11. **Kuznecov E. S.** Technical Systems Control, Moscow, *MADI*, 2003 (in Russian).
12. **Nikolaev V. I., Bruk V. M.** The Systems Engineering: Methods and Applications, Leningrad, *Mashinostroenie*, 1985 (in Russian).
13. **Krasnikov V. S.** Control Solutions Development, St. Petersburg, *SZAGS*, 1999 (in Russian).
14. **Sage A. P., Melsa J. L.** *Estimation Theory with Applications to Communications and Control*, New York, McGrawHill, 1971.
15. **Tolmachev V. A.** The Basics of Electromechanical Systems Control, St. Petersburg, *ITMO*, 2006 (in Russian).
16. **Gulaj A. V., Zajcev V. M.** *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 7, pp. 474–482 (in Russian).
17. **Zajcev V. M., Putkov V. N.** *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Jeletromehhanika*, 1977, no. 2, pp. 127–129 (in Russian).