

Воронина Юлия Павловна

магистрант, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Россия, г. Москва

Шаповал Сергей Николаевич

магистрант, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Россия, г. Москва

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Целью исследования является разработка универсального алгоритма принятия решений для киберфизических систем, основанного на анализе эксплуатационных данных и допускающего адаптацию к различным предметным областям без изменения базовой алгоритмической структуры. В работе использованы методы системного анализа, математического и параметрического моделирования, а также методы оптимизации. Предложен универсальный алгоритмический подход, архитектура которого основана на разделении алгоритмического ядра и предметно-ориентированных компонентов. Выполнена апробация разработанного подхода на примере интеллектуального управления системой «умный дом» и параметрического проектирования шатуна двигателя внутреннего сгорания по эксплуатационным параметрам. Полученные результаты подтверждают универсальность предлагаемого решения и его эффективность при решении задач управления и автоматизированного проектирования в киберфизических системах.

The aim of the study is to develop a universal decision-making algorithm for cyber-physical systems based on the analysis of operational data and allowing

adaptation to various subject areas without changing the basic algorithmic structure. The work uses methods of system analysis, mathematical and parametric modelling, as well as optimisation methods. A universal algorithmic approach is proposed, the architecture of which is based on the separation of the algorithmic core and subject-oriented components. The developed approach was tested using the example of intelligent control of a smart home system and parametric design of an internal combustion engine connecting rod based on operational parameters. The results confirm the versatility of the proposed solution and its effectiveness in solving control and automated design tasks in cyber-physical systems.

Ключевые слова: автоматизированное принятие решений; киберфизические системы; эксплуатационные данные; универсальный алгоритм; параметрическая оптимизация.

Keywords: automated decision-making; cyber-physical systems; operational data; universal algorithm; parametric optimisation.

Введение

Развитие современных информационных и инженерных технологий обусловило широкое распространение киберфизических систем, в которых физические процессы тесно интегрированы с вычислительными и информационными компонентами [11, 12]. К таким киберфизическим комплексам относятся интеллектуальные системы управления инженерной инфраструктурой зданий, а также автоматизированные комплексы проектирования технических объектов, функционирующих в условиях сложных и изменяющихся эксплуатационных нагрузок [6]. Повышение сложности подобных систем сопровождается ростом объёмов эксплуатационных данных, формируемых в процессе их функционирования.

Эксплуатационные данные отражают текущее состояние объекта, условия его работы и результаты управляющих или проектных воздействий. Использование данной информации при формировании алгоритмических решений позволяет повысить эффективность функционирования киберфизических систем, однако требует разработки методов, способных обрабатывать разнородные данные и обеспечивать автоматизированное формирование обоснованных решений.

В настоящее время разработано значительное количество методов автоматизированного принятия решений, применяемых в системах управления и автоматизированного проектирования. Однако большинство существующих подходов ориентировано на решение узкоспециализированных задач и разрабатывается с учётом особенностей конкретных объектов [1, 2]. Это приводит к необходимости существенной переработки алгоритмов при переносе их на системы иной физической природы или функционального назначения, что ограничивает возможность создания универсальных интеллектуальных алгоритмических подходов.

В условиях интеграции разнородных киберфизических систем актуальной научной задачей является разработка универсальных алгоритмов принятия решений, основанных на анализе эксплуатационных данных и допускающих адаптацию к различным предметным областям без изменения базовой алгоритмической структуры. Такой подход позволяет использовать единый методологический аппарат для задач управления и проектирования, различающихся по физической природе, но обладающих сходной логикой алгоритмической обработки информации.

Целью настоящей работы является разработка универсального алгоритма принятия решений для киберфизических систем и исследование возможности его применения на примере интеллектуального управления системой «умный дом» и задачи автоматизированного проектирования шатуна двигателя внутреннего сгорания по эксплуатационным параметрам.

Рассмотрение разнородных прикладных задач в рамках единого алгоритмического подхода позволяет обосновать универсальность предлагаемого решения и подтвердить его научную и практическую значимость.

Формализация задачи принятия решений в киберфизических системах

Киберфизические системы представляют собой класс сложных технических систем, в которых процессы физического мира, вычислительные модели и информационные потоки функционируют во взаимосвязи. Существенной особенностью таких систем является наличие значительного объёма эксплуатационных данных, формируемых в процессе их функционирования и отражающих состояние объекта, условия эксплуатации и результаты принятых управляющих или проектных решений.

В общем виде задача автоматизированного принятия решений в киберфизических системах заключается в определении оптимального решения на основе анализа эксплуатационных данных с учётом заданных целей и ограничений. Характер принимаемых решений определяется назначением системы: в задачах управления решения представляют собой управляющие воздействия, направленные на изменение режима работы системы, тогда как в задачах автоматизированного проектирования — выбор конструктивных и геометрических параметров объекта.

Несмотря на различие предметных областей, процесс принятия решений в киберфизических системах может быть описан с использованием единой абстрактной модели. В рамках данной модели эксплуатационные данные формируют вектор состояния системы

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1),$$

определяемый на основе измерений, наблюдений и результатов анализа [7, 11]. Вектор состояния x характеризует текущее или прогнозируемое состояние объекта и служит исходной информацией для формирования решения.

Процесс принятия решений может быть представлен в виде отображения пространства состояний системы X в пространство допустимых решений U [2, 3]. Такое отображение реализуется с использованием параметрической модели объекта и приводит к формированию вектора решений

$$u = (u_1, u_2, \dots, u_m) \quad (2),$$

включающего управляемые или проектируемые параметры. Формирование решения осуществляется с учётом критериев оптимальности

$$f_i(x, u), i = 1, \dots, k \quad (3),$$

и системы ограничений

$$(x, u) \leq 0, j = 1, \dots, l \quad (4),$$

отражающих физические, технологические и эксплуатационные требования.

Существующие подходы к автоматизированному принятию решений, как правило, используют специализированные модели и алгоритмы, ориентированные на конкретные классы задач и объектов [1, 5]. Это приводит к необходимости разработки отдельных алгоритмических решений для каждой предметной области и существенно затрудняет перенос методов на киберфизические системы иной физической природы. В условиях роста сложности и многообразия таких систем данный подход оказывается недостаточно эффективным.

В настоящей работе задача автоматизированного принятия решений рассматривается с позиции универсального алгоритмического подхода, основанного на разделении алгоритмического ядра и предметно-

ориентированных компонентов. Алгоритмическое ядро реализует инвариантную процедуру обработки вектора состояния x и поиска оптимального решения u^* , тогда как специфика конкретной предметной области инкапсулируется в параметрической модели объекта, системе критериев и ограничений, а также параметрах адаптации θ . Такой подход позволяет формализовать процесс принятия решений в обобщённом виде и создать основу для разработки универсального алгоритма, применимого к широкому классу задач управления и автоматизированного проектирования без изменения базовой алгоритмической структуры.

Архитектура и алгоритмическая реализация универсального алгоритма принятия решений

В рамках настоящего исследования разработан универсальный алгоритм принятия решений для киберфизических систем, основанный на анализе эксплуатационных данных и предназначенный для решения задач управления и автоматизированного проектирования. Ключевым принципом разработки алгоритма является обеспечение его применимости к различным предметным областям без изменения базовой алгоритмической структуры.

Архитектура алгоритма построена по модульному принципу и включает алгоритмическое ядро и набор предметно-ориентированных компонентов [1, 7]. Алгоритмическое ядро реализует универсальную процедуру обработки информации и поиска оптимального решения и не зависит от физической природы объекта. Предметно-ориентированные компоненты задают структуру эксплуатационных данных, параметрическую модель объекта, систему критериев и ограничений, а также параметры адаптации θ , отражающие специфику конкретной задачи.

Входная информация формируется в виде вектора состояния системы

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1),$$

компоненты которого определяются эксплуатационными параметрами объекта и условиями его функционирования. На основе вектора состояния формируется вектор решений

$$u = (u_1, u_2, \dots, u_m) \quad (2),$$

включающий управляемые или проектируемые параметры системы.

Параметрическая модель объекта устанавливает зависимость между векторами x и u , может быть представлена в аналитической, табличной или имитационной форме. Выбор конкретного вида модели определяется сложностью объекта и доступностью исходных данных и не влияет на структуру алгоритмического ядра, что обеспечивает адаптацию алгоритма к различным предметным областям.

Ключевым этапом алгоритма является формализация задачи принятия решений в виде задачи оптимизации. В обобщённом виде она записывается следующим образом:

$$u^* = \arg \min_{u \in U} F(x, u, \theta) \quad (5),$$

где $F(x, u, \theta)$ — универсальная целевая функция,

U — множество допустимых решений,

θ — вектор параметров адаптации, включающий веса критериев, параметры моделей и ограничения предметной области.

Целевая функция представляется в виде:

$$F(x, u, \theta) = \sum_{i=1}^k \omega_i(\theta) f_i(x, u) + \lambda \sum_{j=1}^l \psi(g_j(x, u)) \quad (6),$$

где $f_i(x, u)$ — частные критерии оптимальности,

$g_j(x, u)$ — ограничения,

$\omega_i(\theta)$ — весовые коэффициенты,

$\psi(\cdot)$ — штрафная функция.

Алгоритмическое ядро, оперируя выражениями (5) – (6), осуществляет поиск оптимального вектора решений u^* с использованием выбранного метода оптимизации. Выбор метода определяется свойствами параметрической модели и требованиями к вычислительной эффективности, при этом структура алгоритма остаётся неизменной.

Заключительным этапом является формирование выходного результата. В задачах управления результатом являются управляющие воздействия, передаваемые исполнительным устройствам, в задачах автоматизированного проектирования — набор оптимальных параметров объекта. Таким образом, алгоритм реализует полный цикл автоматизированного принятия решений на основе эксплуатационных данных.

Отличительной особенностью разработанного универсального алгоритма является возможность его применения к разнородным киберфизическим системам в рамках единого методологического подхода, что позволяет использовать единое алгоритмическое ядро для задач управления и параметрической оптимизации технических объектов.

Адаптация универсального алгоритма принятия решений к задаче интеллектуального управления умным домом

Интеллектуальные системы управления умным домом относятся к классу киберфизических систем, в которых взаимодействуют программные средства, инженерное оборудование и физическая среда жилого здания. Для таких систем характерна необходимость автоматизированного формирования управляющих воздействий в условиях изменяющихся эксплуатационных параметров, обусловленных как внешними факторами, так и поведением пользователей.

В рамках рассматриваемой задачи универсальный алгоритм принятия решений применяется для управления инженерными системами умного дома, включая отопление, вентиляцию, кондиционирование и освещение [6].

Вектор состояния системы формируется на основе эксплуатационных данных и имеет вид:

$$x = (T_{in}, H_{in}, L_{in}, P, E) \quad (7),$$

где T_{in} — температура воздуха в помещениях,

H_{in} — относительная влажность,

L_{in} — уровень освещённости,

P — информация о присутствии пользователей,

E — текущее энергопотребление.

Вектор решений определяется режимами работы инженерного оборудования:

$$u = (u_{heat}, u_{vent}, u_{cond}, u_{light}) \quad (8),$$

где компоненты вектора u задают управляющие воздействия на соответствующие инженерные подсистемы.

Параметрическая модель объекта описывает зависимость изменения параметров микроклимата и энергопотребления от управляющих воздействий

с учётом тепловой инерционности здания и динамических характеристик оборудования.

Критерии оптимальности в задаче интеллектуального управления умным домом задаются следующим образом:

1. Минимизация энергопотребления

$$f_1(x, u) = E(x, u) \quad (9);$$

2. Минимизация отклонений параметров микроклимата от комфортных значений

$$f_2(x, u) = \sum_i |T_{in}^{(i)} - T_{opt}^{(i)}| \quad (10).$$

Ограничения определяются допустимыми диапазонами эксплуатационных параметров и техническими характеристиками оборудования:

$$T_{min} \leq T_{in} \leq T_{max}, H_{min} \leq H_{in} \leq H_{max} \quad (11),$$

а также предельными режимами работы инженерных систем.

В рамках универсального алгоритма задача интеллектуального управления умным домом формализуется как частный случай обобщённой оптимизационной постановки:

$$u^* = \arg \min_{u \in U} F(x, u, \theta) \quad (5),$$

где параметры адаптации θ включают веса критериев, допустимые диапазоны параметров и настройки оборудования. Алгоритмическое ядро при этом остаётся неизменным, а специфика предметной области определяется структурой векторов x , u и параметров θ .

Применение универсального алгоритма обеспечивает автоматизированное формирование согласованных управляющих воздействий при изменении эксплуатационных условий и подтверждает возможность

использования единого алгоритмического ядра для интеллектуального управления инженерными системами жилых зданий.

Использование универсального алгоритма принятия решений в задаче параметрического проектирования шатуна двигателя внутреннего сгорания

Автоматизированное проектирование деталей машин по эксплуатационным параметрам является важным направлением развития современных систем инженерной разработки [8, 9]. В отличие от задач управления, где решения формируются в виде управляющих воздействий в процессе функционирования объекта, в задачах проектирования принятие решений направлено на определение конструктивных и геометрических характеристик изделия, определяющих его эксплуатационные свойства. Это обуславливает необходимость применения формализованного алгоритмического выбора, способного учитывать условия работы объекта и требования к его надёжности и ресурсу.

В рамках настоящего исследования универсальный алгоритм принятия решений применяется для параметрического проектирования шатуна двигателя внутреннего сгорания — ответственного элемента кривошипно-шатунного механизма, работающего в условиях значительных переменных нагрузок. Эксплуатационные условия работы шатуна определяются параметрами рабочего процесса двигателя и формируют вектор состояния системы

$$x = (F_{gas}, F_{inert}, \omega, N_{req}, [\sigma]) \quad (12),$$

где F_{gas} и F_{inert} — газовые и инерционные нагрузки,

ω — угловая скорость вращения коленчатого вала,

N_{req} — требуемый ресурс (число циклов),

$[\sigma]$ — допускаемое напряжение материала.

Вектор решений в задаче параметрического проектирования определяется геометрическими параметрами шатуна:

$$u = (d_{ш}, b_{ш}, h_{ш}, l_{ш}, r_{перех}) \quad (13),$$

где $d_{ш}$ — диаметр, $b_{ш}$ и $h_{ш}$ — ширина и высота поперечного сечения,

$l_{ш}$ — длина шатуна,

$r_{перех}$ — радиус переходных участков.

Указанные параметры определяют конструктивное исполнение детали и существенно влияют на её прочностные, жёсткостные и усталостные характеристики.

Параметрическая модель объекта устанавливает зависимость между векторами x и u , позволяет оценивать напряжённо-деформированное состояние шатуна, его массу и ресурс. Расчёт прочностных характеристик может осуществляться с использованием аналитических зависимостей или конечно-элементного моделирования.

Критерии оптимальности в задаче параметрического проектирования формулируются следующим образом:

1. Минимизация массы шатуна

$$f_1(u) = \rho \cdot V(u) \quad (14),$$

где ρ — плотность материала, $V(u)$ — объём детали;

2. Обеспечение требуемого запаса прочности

$$f_2(x, u) = -S(u), \quad S(u) = \frac{[\sigma]}{\sigma_{max}(x, u)} \quad (15) (16),$$

где $\sigma_{max}(x, u)$ — максимальное эквивалентное напряжение.

Ограничения в задаче параметрического проектирования включают:

- прочностные условия

$$S(u) \geq S_{min} \quad (17),$$

- усталостные требования

$$N_{calc}(x, u) \geq N_{req} \quad (18),$$

- технологические и конструктивные ограничения

$$l_{min} \leq l_{ш} \leq l_{max}, \quad r_{перех} \geq r_{min} \quad (19) (20).$$

В рамках универсального алгоритма задача параметрического проектирования шатуна формализуется как частный случай обобщённой оптимизационной постановки:

$$u^* = \arg \min_{u \in U} F(x, u, \theta) \quad (5),$$

где параметры адаптации θ включают свойства материала, веса критериев и параметры расчётных моделей. Алгоритмическое ядро при этом остаётся неизменным, а специфика задачи учитывается через структуру векторов x, u и параметры θ .

Применение универсального алгоритма принятия решений позволяет автоматизировать поиск геометрических параметров шатуна, удовлетворяющих заданным эксплуатационным требованиям, и формировать конструктивные решения на основе анализа условий работы детали.

Заключение

В рамках выполненного исследования решена актуальная научная задача, связанная с разработкой универсального алгоритма принятия решений для киберфизических систем, функционирующих на основе анализа

эксплуатационных данных. Актуальность данной задачи обусловлена ростом сложности современных технических объектов и необходимостью автоматизации процессов управления и проектирования в условиях изменяющихся эксплуатационных параметров.

В работе предложен универсальный алгоритмический подход к принятию решений, архитектура которого основана на разделении алгоритмического ядра и предметно-ориентированных компонентов. Такой подход обеспечивает возможность адаптации метода к различным предметным областям без изменения его базовой структуры. Выполнена формализация процесса принятия решений в виде задачи оптимизации, что позволило представить разработанный алгоритм в обобщённом виде, применимом как к задачам управления, так и к задачам автоматизированного проектирования.

Разработанный алгоритм апробирован на двух разнородных прикладных примерах, относящихся к различным классам киберфизических систем. В задаче интеллектуального управления системой «умный дом» алгоритм использован для формирования управляющих воздействий на основе анализа параметров микроклимата, режима эксплуатации и энергопотребления. В задаче параметрического проектирования шатуна двигателя внутреннего сгорания алгоритм применён для выбора конструктивных и геометрических параметров детали с учётом эксплуатационных нагрузок и требований к прочности и ресурсу.

Результаты проведённой апробации показали, что предложенный алгоритмический подход обеспечивает эффективное формирование решений в условиях вариативности эксплуатационных данных и допускает использование единого методологического аппарата для задач различной физической природы. Это подтверждает универсальность разработанного решения и его применимость к широкому классу киберфизических систем.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности использования разработанного алгоритма при создании

интеллектуальных систем управления инженерными системами зданий, а также при разработке модулей автоматизированного проектирования деталей машин, работающих в условиях переменных нагрузок. Полученные теоретические и практические результаты могут быть использованы в дальнейших научных исследованиях, направленных на развитие методов автоматизированного принятия решений и их внедрение в инженерную практику.

Introduction

The development of modern information and engineering technologies has led to the widespread use of cyber-physical systems, in which physical processes are closely integrated with computing and information components [11, 12]. Such cyber-physical complexes include intelligent building engineering infrastructure management systems, as well as automated technical facility design complexes operating under complex and changing operational loads [6]. The increasing complexity of such systems is accompanied by a growth in the volume of operational data generated during their operation.

Operational data reflects the current state of the facility, its operating conditions, and the results of control or design actions. The use of this information in the formation of algorithmic solutions allows for an increase in the efficiency of cyber-physical systems, but requires the development of methods capable of processing heterogeneous data and ensuring the automated formation of sound decisions.

Currently, a significant number of automated decision-making methods have been developed for use in control and automated design systems. However, most existing approaches are focused on solving highly specialised tasks and are developed with the characteristics of specific objects in mind [1, 2]. This leads to the need for significant reworking of algorithms when transferring them to systems of a different physical nature or functional purpose, which limits the possibility of creating universal intelligent algorithmic approaches.

In the context of integrating heterogeneous cyber-physical systems, an urgent scientific task is to develop universal decision-making algorithms based on the analysis of operational data and allowing adaptation to different subject areas without changing the basic algorithmic structure. This approach allows the use of a single methodological framework for control and design tasks that differ in physical nature but have similar logic of algorithmic information processing.

The aim of this work is to develop a universal decision-making algorithm for cyber-physical systems and to investigate its applicability using the example of intelligent control of a smart home system and the task of automated design of an internal combustion engine connecting rod based on operational parameters. The consideration of diverse applied problems within the framework of a unified algorithmic approach allows us to justify the universality of the proposed solution and confirm its scientific and practical significance.

Formalisation of the Decision-Making Problem in Cyber-Physical Systems

Cyber-physical systems are a class of complex technical systems in which physical processes, computational models and information flows function in an interconnected manner. A key feature of such systems is the presence of a significant amount of operational data generated during their operation, reflecting the state of the object, operating conditions and the results of management or design decisions.

In general terms, the task of automated decision-making in cyber-physical systems is to determine the optimal solution based on the analysis of operational data, taking into account the specified goals and constraints. The nature of the decisions made is determined by the purpose of the system: in control tasks, decisions are control actions aimed at changing the operating mode of the system, while in automated design tasks, they are the selection of structural and geometric parameters of the object.

Despite differences in subject areas, the decision-making process in cyber-physical systems can be described using a single abstract model. Within this model, operational data forms the system state vector

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1),$$

defined on the basis of measurements, observations, and analysis results [7, 11]. The state vector x characterises the current or predicted state of the object and serves as the initial information for forming a decision.

The decision-making process can be represented as a mapping of the system state space X onto the space of feasible decisions U [2, 3]. Such a mapping is implemented using a parametric model of the object and leads to the formation of a decision vector

$$u = (u_1, u_2, \dots, u_m) \quad (2),$$

including controllable or designable parameters. The decision is made taking into account the optimality criteria

$$f_i(x, u), i = 1, \dots, k \quad (3),$$

and the system of constraints

$$(x, u) \leq 0, j = 1, \dots, l \quad (4),$$

reflecting physical, technological and operational requirements.

Existing approaches to automated decision-making typically use specialised models and algorithms focused on specific classes of tasks and objects [1, 5]. This necessitates the development of separate algorithmic solutions for each subject area and significantly complicates the transfer of methods to cyber-physical systems of a different physical nature. Given the growing complexity and diversity of such systems, this approach is proving to be insufficiently effective.

In this paper, the task of automated decision-making is considered from the perspective of a universal algorithmic approach based on the separation of the algorithmic core and subject-oriented components. The algorithmic core implements an invariant procedure for processing the state vector x and searching for the optimal solution u^* , while the specifics of a particular subject area are encapsulated in a parametric model of the object, a system of criteria and constraints, and adaptation parameters θ . This approach allows formalising the decision-making process in a generalised form and creating a basis for developing a universal algorithm applicable to a wide class of control and automated design tasks without changing the basic algorithmic structure.

Architecture and Algorithmic Implementation of a Universal Decision-Making Algorithm

As part of this study, a universal decision-making algorithm for cyber-physical systems has been developed, based on the analysis of operational data and designed to solve control and automated design problems. The key principle behind the development of the algorithm is to ensure its applicability to various subject areas without changing the basic algorithmic structure.

The architecture of the algorithm is modular and includes an algorithmic core and a set of subject-oriented components [1, 7]. The algorithmic core implements a

universal procedure for processing information and searching for the optimal solution and does not depend on the physical nature of the object. Subject-oriented components define the structure of operational data, the parametric model of the object, the system of criteria and constraints, as well as the adaptation parameters θ , which reflect the specifics of a particular task.

The input information is formed as a system state vector.

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1),$$

whose components are determined by the operational parameters of the object and the conditions of its functioning. Based on the state vector, a decision vector is formed

$$u = (u_1, u_2, \dots, u_m) \quad (2),$$

which includes controllable or designable system parameters.

The parametric model of the object establishes the relationship between vectors x and u , and can be presented in analytical, tabular, or simulation form. The choice of a specific model type is determined by the complexity of the object and the availability of source data and does not affect the structure of the algorithmic core, which ensures the adaptation of the algorithm to various subject areas.

A key stage of the algorithm is the formalisation of the decision-making task as an optimisation task. In generalised form, it is written as follows:

$$u^* = \arg \min_{u \in U} F(x, u, \theta) \quad (5),$$

where $F(x, u, \theta)$ is a universal objective function, U is a set of feasible solutions, θ is a vector of adaptation parameters, including criterion weights, model parameters, and domain constraints.

The objective function is represented as:

$$F(x, u, \theta) = \sum_{i=1}^k \omega_i(\theta) f_i(x, u) + \lambda \sum_{j=1}^l \psi(g_j(x, u)) \quad (6),$$

where $f_i(x, u)$ are partial optimality criteria, $g_j(x, u)$ are constraints, $\omega_i(\theta)$ are weight coefficients, $\psi(\cdot)$ is a penalty function.

The algorithmic core, operating with expressions (5) – (6), searches for the optimal solution vector u^* using the selected optimisation method. The choice of method is determined by the properties of the parametric model and the requirements for computational efficiency, while the structure of the algorithm remains unchanged.

The final stage is the formation of the output result. In control tasks, the result is the control actions transmitted to the executive devices; in automated design tasks, it is a set of optimal object parameters. Thus, the algorithm implements a complete cycle of automated decision-making based on operational data.

A distinctive feature of the developed universal algorithm is the possibility of its application to heterogeneous cyber-physical systems within a single methodological approach, which allows the use of a single algorithmic core for control tasks and parametric optimisation of technical objects.

Adaptation of a Universal Decision-Making Algorithm to the Task of Intelligent Control of a Smart Home

Intelligent smart home control systems belong to the class of cyber-physical systems, in which software, engineering equipment and the physical environment of a residential building interact. Such systems are characterised by the need for automated control actions in conditions of changing operating parameters, caused by both external factors and user behaviour.

Within the framework of the task under consideration, a universal decision-making algorithm is applied to control the engineering systems of a smart home, including heating, ventilation, air conditioning, and lighting [6].

The system state vector is formed on the basis of operating data and has the following form:

$$x = (T_{in}, H_{in}, L_{in}, P, E) \quad (7),$$

where T_{in} is the air temperature in the rooms; H_{in} is the relative humidity; L_{in} is the lighting level; P is information about the presence of users; E is the current energy consumption.

The decision vector is determined by the operating modes of the engineering equipment:

$$u = (u_{heat}, u_{vent}, u_{cond}, u_{light}) \quad (8),$$

where the components of the vector u specify the control actions on the corresponding engineering subsystems.

The parametric model of the object describes the dependence of changes in microclimate parameters and energy consumption on control actions, taking into account the thermal inertia of the building and the dynamic characteristics of the equipment.

The optimality criteria in the task of intelligent control of a smart home are set as follows:

1. Minimisation of energy consumption

$$f_1(x, u) = E(x, u) \quad (9);$$

2. Minimisation of deviations of microclimate parameters from comfortable values

$$f_2(x, u) = \sum_i |T_{in}^{(i)} - T_{opt}^{(i)}| \quad (10).$$

The constraints are determined by the permissible ranges of operating parameters and technical characteristics of the equipment:

$$T_{min} \leq T_{in} \leq T_{max}, H_{min} \leq H_{in} \leq H_{max} \quad (11),$$

as well as the maximum operating modes of engineering systems.

Within the framework of a universal algorithm, the task of intelligent control of a smart home is formalised as a special case of a generalised optimisation problem:

$$u^* = \arg \min_{u \in U} F(x, u, \theta) \quad (5),$$

where the adaptation parameters θ include criterion weights, acceptable parameter ranges, and equipment settings. The algorithmic core remains unchanged, and the specifics of the subject area are determined by the structure of vectors x , u , and parameters θ .

The application of a universal algorithm ensures the automated formation of coordinated control actions when operating conditions change and confirms the possibility of using a single algorithmic core for the intelligent control of engineering systems in residential buildings.

Use of a Universal Decision-Making Algorithm in the Parametric Design of an Internal Combustion Engine Connecting Rod

Automated design of machine parts based on operational parameters is an important area of development for modern engineering design systems [8, 9]. Unlike control tasks, where decisions are formed in the form of control actions during the operation of an object, in design tasks, decision-making is aimed at determining the structural and geometric characteristics of a product that determine its operational properties. This necessitates the use of a formalised algorithmic selection capable of taking into account the operating conditions of the object and the requirements for its reliability and service life.

Within the framework of this study, a universal decision-making algorithm is applied to the parametric design of an internal combustion engine connecting rod, a

critical element of the crank-connecting rod mechanism operating under conditions of significant variable loads. The operating conditions of the connecting rod are determined by the parameters of the engine's working process and form the state vector of the system.

$$x = (F_{gas}, F_{inert}, \omega, N_{req}, [\sigma]) \quad (12),$$

where F_{gas} and F_{inert} are gas and inertial loads, ω is the angular velocity of the crankshaft, N_{req} is the required resource (number of cycles), $[\sigma]$ is the permissible stress of the material.

The solution vector in the parametric design problem is determined by the geometric parameters of the connecting rod:

$$u = (d_{sh}, b_{sh}, h_{sh}, l_{sh}, r_{tr}) \quad (13),$$

where d_{sh} is the diameter, b_{sh} and h_{sh} are the width and height of the cross-section, l_{sh} is the length of the connecting rod, r_{tr} is the radius of the transition sections.

These parameters determine the design of the part and significantly affect its strength, stiffness and fatigue characteristics.

The parametric model of the object establishes the relationship between vectors x and u , allowing the stress-strain state of the connecting rod, its mass and service life to be assessed. The strength characteristics can be calculated using analytical relationships or finite element modelling.

The optimisation criteria in the parametric design problem are formulated as follows:

1. Minimisation of the connecting rod mass

$$f_1(u) = \rho \cdot V(u) \quad (14),$$

where ρ is the material density, $V(u)$ is the volume of the part;

2. Ensuring the required safety margin

$$f_2(x, u) = -S(u), \quad S(u) = \frac{[\sigma]}{\sigma_{max}(x, u)} \quad (15) (16),$$

where $\sigma_{max}(x, u)$ is the maximum equivalent stress.

The constraints in the parametric design problem include:

- strength conditions

$$S(u) \geq S_{min} \quad (17),$$

- fatigue requirements

$$N_{calc}(x, u) \geq N_{req} \quad (18),$$

- technological and design constraints

$$l_{min} \leq l_{sh} \leq l_{max}, \quad r_{tr} \geq r_{min} \quad (19) (20).$$

Within the framework of a universal algorithm, the task of parametric design of a connecting rod is formalised as a special case of a generalised optimisation problem:

$$u^* = \arg \min_{u \in U} F(x, u, \theta) \quad (5),$$

where the adaptation parameters θ include material properties, weight criteria, and calculation model parameters. The algorithmic core remains unchanged, and the specifics of the task are taken into account through the structure of vectors x , u , and parameters θ .

The application of a universal decision-making algorithm allows automating the search for connecting rod geometric parameters that satisfy the specified operational requirements and forming design solutions based on the analysis of the operating conditions of the part.

Conclusion

The study addresses a pressing scientific issue related to the development of a universal decision-making algorithm for cyber-physical systems operating on the basis of operational data analysis. The relevance of this issue stems from the growing complexity of modern technical objects and the need to automate management and design processes in conditions of changing operational parameters.

The paper proposes a universal algorithmic approach to decision-making, the architecture of which is based on the separation of the algorithmic core and subject-oriented components. This approach makes it possible to adapt the method to different subject areas without changing its basic structure. The decision-making process has been formalised as an optimisation problem, which has made it possible to present the developed algorithm in a generalised form applicable to both control and automated design tasks.

The developed algorithm has been tested on two different applied examples belonging to different classes of cyber-physical systems. In the task of intelligent control of a smart home system, the algorithm is used to form control actions based on the analysis of microclimate parameters, operating mode, and energy consumption. In the task of parametric design of an internal combustion engine connecting rod, the algorithm was applied to select the structural and geometric parameters of the part, taking into account operational loads and requirements for strength and service life.

The results of the testing showed that the proposed algorithmic approach ensures effective decision-making in conditions of variability of operating data and allows the use of a single methodological apparatus for tasks of different physical nature. This confirms the universality of the developed solution and its applicability to a wide class of cyber-physical systems.

The practical significance of the results obtained lies in the possibility of using the developed algorithm in the creation of intelligent control systems for building engineering systems, as well as in the development of automated design modules for machine parts operating under variable loads. The theoretical and practical results

obtained can be used in further scientific research aimed at developing methods of automated decision-making and their implementation in engineering practice.

Литература

1. Гаврилов А. А. Интеллектуальные системы принятия решений. — СПб.: Питер, 2018. — 256 с.
2. Сидоров В. П. Теория принятия решений. — М.: Юрайт, 2021. — 272 с.
3. Лопатин И. В. Методы многокритериальной оптимизации. — М.: Высшая школа, 2016. — 240 с.
4. Кузнецов В. И. Параметрическая оптимизация в инженерных задачах. — М.: Физматлит, 2017. — 304 с.
5. Воробьев А. А., Кузнецов С. В. Автоматизированные системы управления техническими объектами. — М.: Инфра-М, 2020. — 288 с.
6. Михайлов Ю. А., Сорокин П. Н. Системы «умный дом»: архитектура и алгоритмы управления // Информационные технологии. — 2021. — № 4. — С. 45–52.
7. Петров С. А., Иванова Е. В. Алгоритмы обработки эксплуатационных данных в киберфизических системах // Автоматизация и современные технологии. — 2019. — № 9. — С. 21–27.
8. Никитин О. Ф. Проектирование деталей машин по эксплуатационным параметрам. — М.: Машиностроение, 2015. — 368 с.
9. Рахманов Р. Р. Автоматизированное проектирование деталей двигателей внутреннего сгорания // Труды МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 2018. — № 3. — С. 78–85.
10. Добрынин А. П., Черных К. Н. Цифровые двойники в промышленности // Вестник машиностроения. — 2020. — № 6. — С. 12–18.

11. Lee E. A. Cyber-physical systems: design challenges // Proceedings of the IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing. — 2008. — P. 363–369.
12. Rajkumar R., Lee I., Sha L., Stankovic J. Cyber-physical systems: the next computing revolution // Proceedings of the Design Automation Conference. — 2010. — P. 731–736.
13. Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. — Chichester: Wiley, 2001. — 518 p.

References

1. Gavrilov, A. A. Intelligent Decision-Making Systems. — St. Petersburg: Piter, 2018. — 256 p.
2. Sidorov, V. P. Decision-Making Theory. — Moscow: Yurait, 2021. — 272 p.
3. Lopatin I. V. Methods of Multi-Criteria Optimisation. — Moscow: Higher School, 2016. — 240 p.
4. Kuznetsov V. I. Parametric Optimisation in Engineering Problems. — Moscow: Fizmatlit, 2017. — 304 p.
5. Vorobyov A. A., Kuznetsov S. V. Automated Control Systems for Technical Objects. — Moscow: Infra-M, 2020. — 288 p.
6. Mikhailov Yu. A., Sorokin P. N. Smart home systems: architecture and control algorithms // Information Technologies. — 2021. — No. 4. — P. 45–52.
7. Petrov S. A., Ivanova E. V. Algorithms for processing operational data in cyber-physical systems // Automation and Modern Technologies. — 2019. — No. 9. — Pp. 21–27.

8. Nikitin O. F. Designing machine parts based on operational parameters. — Moscow: Mechanical Engineering, 2015. — 368 p.
9. Rakhmanov R. R. Automated design of internal combustion engine parts // Proceedings of the Bauman Moscow State Technical University. — 2018. — No. 3. — P. 78–85.
10. Dobrynin A. P., Chernykh K. N. Digital twins in industry // Bulletin of Mechanical Engineering. — 2020. — No. 6. — P. 12–18.
11. Lee E. A. Cyber-physical systems: design challenges // Proceedings of the IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing. — 2008. — P. 363–369.
12. Rajkumar R., Lee I., Sha L., Stankovic J. Cyber-physical systems: the next computing revolution // Proceedings of the Design Automation Conference. — 2010. — P. 731–736.
13. Deb K. Multi-objective optimisation using evolutionary algorithms. — Chichester: Wiley, 2001. — 518 p.