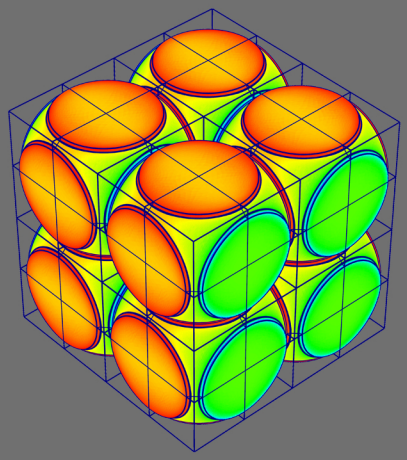
ISSN 2309-3684



Математическое моделирование и численные методы

Белов В.Ф., Гаврюшин С.С. Феноменологическая модель системы проектирования инноваций в машиностроении. Математическое моделирование и численные методы, 2026, № 1, с. 66–86

Источник: https://mmcm.bmstu.ru/articles/399/

Параметры загрузки:
IP: 216.73.216.175
02.11.2026 03:28:03

УДК 004.942 DOI: 10.18698/2309-3684-2026-1-6686

Феноменологическая модель системы проектирования инноваций в машиностроении

© В.Ф. Белов[1], С.С. Гаврюшин[2]

[1]МГУ им. Н.П. Огарева, Саранск, 430005, Россия
[2]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Структурная сложность и многопредметность современных систем проектирования инноваций в машиностроении существенно ограничивает возможности классического анализа их динамики с помощью теоретических моделей, описывающих процессы самоорганизации и имеющих форму дифференциальных уравнений. Для практического контроля динамических характеристик системы проектирования актуальна разработка модели, согласующейся с фундаментальной теорией, но не являющейся прямой производной от теории. Такие модели принято называть феноменологическими. В качестве основы для макроскопического описания системы проектирования инноваций в статье рассматривается синергетическая теория самоорганизации систем, оперирующая категориями: притягивающий аттрактор-цель, параметр порядка и эволюционные уравнения. Для более строгого представления модели использован язык теории инвариантных многообразий. На этих основаниях разработан алгоритм, обеспечивающий адаптацию системы проектирования на инвариантных многообразиях и реализующий принцип одновременности конструирования системы и разработки объекта проектирования. Полученные результаты нашли своё подтверждение при создании и промышленном тестировании прототипа цифрового планировщика для оптимизации архитектуры системы проектирования в темпе разработки проекта.

Ключевые слова: *система проектирования, динамика, модель, адаптация, самоорганизация, параметры порядка, инвариантные многообразия*

Введение. Современные методологии проектирования сложных систем в машиностроении сводятся главным образом к компьютеризации зарекомендовавших себя на практике инженерных методов чертёжного проектирования и принципов организации проектной деятельности. Однако их эффективность становится недостаточной при разработке инновационных проектов, успешность которых напрямую зависит от скорости преобразования новых знаний в продукты инновационного рынка. При этом существенным фактором, влияющим на скорость проектирования инноваций, является несогласованность функционирования элементов системы проектирования в режиме реального времени.

Определим систему проектирования S как множество

$$S = (S_1, S_2, S_3), \tag{1}$$

где S_1 — технологическая, S_2 — менеджерская и S_3 — энергоинформационная подсистемы.

Целью F_1 технологической подсистемы S_1 является достижение системой требуемых выходных параметров объекта проектирования, а целью F_2 менеджерской подсистемы S_2 — удержание системы в рамках допустимых изменений «управленческого треугольника», выражающего взаимосвязи качества, сроков и стоимости проектирования. Цель F_3 подсистемы S_3 заключается в обеспечении системы необходимыми энергетическими, вычислительными, информационными и программными ресурсами.

Тогда

$$F = (F_1, F_2, F_3), \tag{2}$$

есть аттрактор-цель, или финишное многообразие, системы (1).

Для синхронизации целей сложных многопредметных систем, к разряду которых относятся и системы проектирования, теоретически допустимо применение метода управляемой самоорганизации, развиваемого на основе постулатов синергетики для открытых систем. При этом обязательными условиями применения такого подхода является, с одной стороны наличие исходных уравнений для выделенных элементов системы на микроскопическом уровне, а с другой стороны - сохранение высокого потенциала физической интуиции участников процесса проектирования [1].

Практическая реализация этих условий затруднена из-за отсутствия в теории управления проектами даже основ анализа организационно-технических процессов строгими математическими методами [2]**.**

Как следствие, актуальной является разработка такой модели системы проектирования, которая согласуется с фундаментальной теорией, но не являющейся прямой производной от теории. Такие модели нашли применение для анализа кооперативных (когерентных) процессов в синергетических системах и называются феноменологическими [3].

Целью статьи являются теоретическое обоснование и практическая разработка феноменологической модели системы проектирования инноваций, а так же численного метода синхронизации целей функционирования её элементов для улучшения динамических и качественных характеристик процесса трансформаций инноваций в конечные продукты.

Постановка задачи. В качестве теоретической основы для построения феноменологической модели системы проектирования, воспользуемся синергетическим подходом Г. Хакена к

моделированию диссипативных структур, устойчивость которых зависит от внешних потоков энергии и информации. При определённых условиях к классу открытых систем можно отнести систему проектирования инноваций, полностью зависящую от энерго-информационного окружения. При рассмотрении открытых систем, по определению, оперируют тремя основными категориями - параметры порядка, принцип подчинения и циклическая причинность [4].

Рассмотрим эти категории в приложении к системе проектирования.

Пусть имеем некоторую неуправляемую систему проектирования, которая может быть представлена дифференциальным уравнением

$$\dot{x}(t) = f(x), \tag{3}$$

где $x(x_1, x_2, ..., x_n)$ — вектор состояния системы с компонентами $x_1, x_2, ..., x_n$ [1,2,6].

Основываясь на знаниях внутренних свойств системы проектирования, разобьём компоненты $x_1, x_2, ..., x_n$ на две группы: медленные $z(t)$ размерности η, определяющие эволюцию системы при её переходе из одного состояния в другое, и оставшиеся $v(t)$. Тогда систему (3) можно представить в виде двух дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= f_1(z, v), \\ \dot{v}(t) &= f_2(z, v). \end{aligned} \tag{4}$$

Допустим, что существует некоторое положительно инвариантное множество

$$v = \Phi(z), \tag{5}$$

такое, что на нем удовлетворяется второе уравнение системы (4), т.е.

$$\frac{d}{dt}\Phi(z) - f_2(z, v) \equiv 0. \tag{6}$$

При указанных условиях исходная *n*-размерная система дифференциальная уравнений (5) станет эквивалентной дифференциальной системе

$$\dot{z}(x) = F_1(z, \Phi(z)) \tag{7}$$

и $(n - \eta)$ алгебраическим уравнениям (5). Переменные $z(t)$ в этой системе *называются параметрами порядка*. При этом движение

системы проектирования на аттракторе (7), определяющим её устойчивое состояние, значительно проще по сравнению с общим случаем (3), поскольку из описания исключаются $(n-\eta)$ дифференциальных уравнений для быстрых переменных. Таким образом, выделенные параметры порядка формируют *макроскопическую структуру* нелинейной системы и определяют её поведение.

Рассмотрим случай, когда система проектирования, функционирующая по уравнениям (5) и (7), состоит из нескольких подсистем, поведение каждой из которых определяется на своём аттракторе, т.е. каждая подсистема имеет собственную цель функционирования. Тогда вступает в силу принцип подчинения, отражающий связь между параметрами порядка и отдельными подсистемами системы. Параметр порядка в данном случае — это проектное решение или функция, а подсистема — это объект, на который это решение или функция воздействуют.

«Погружение» аттракторов подсистем в аттрактор-цель системы реализуется исходя из принципа круговой причинности, утверждающего, что существуют функции, обратные тем, которые задают параметры порядка.

Таким образом, чтобы создать *теоретическую модель* системы проектирования, необходимо описать её аттрактор в виде системы дифференциальных уравнений, формально выразить связи между параметрами порядка и подсистемами системы, а так же подобрать функции обратных связей.

Введём в дальнейшее рассмотрение элементы языка теории инвариантов, принимая во внимание, что аттрактор по определению является притягивающим инвариантным многообразием, образуя эффективную малоразмерную (редуцированную) модель динамики. Заметим так же, что понятия «инвариант» и «инвариантное многообразие» строго не являются синонимами. Первое означает *свойство объекта*, которое остаётся неизменным при определённом преобразовании, а второе — *топологическое многообразие*, которое остаётся инвариантным под действием динамической системы. В техническом аспекте концепция «топологического многообразия» отражает физическое или логическое соединение элементов (структуру).

Тогда, оперируя тремя основными категориями синергетики и учитывая лексикон теории инвариантов, можно утверждать, что самоорганизация осуществляется на основе такой совокупности обратных связей, которые переводят систему из произвольного исходного состояния сначала в окрестность желаемых многообразий (аттракторов), а затем обеспечивают асимптотически устойчивое движение внутри этих многообразий.

Реализация этого теоретического алгоритма без опоры на естественные свойства системы проектирования не представляется возможной. Выявление этих свойств и их представление в форме инвариантов и инвариантных многообразий лежит в основе синергетической теории управляемой самоорганизации – подхода, при котором система самостоятельно формирует свою структуру и поведение, *но под воздействием внешних целей и ограничений*, направляя процесс на основе оптимального распределения внутренних ресурсов. В инженерной практике этот подход реализуется как метод адаптивного управления, предполагающего, что система автоматически изменяет свои параметры или структуру регулятора в ответ на изменения в объекте управления или во внешней среде [5,6].

Таким образом, постановку задачи моделирования динамики системы проектирования инноваций можно свести к задаче адаптации системы проектирования на инвариантных многообразиях, т.е. синтезу таких управлений, которые обеспечивают перевод изображающей точки объекта из произвольного начального состояния в заданное состояние, определяемое желаемым инвариантным многообразием (целью проектирования).

Математическая модель. Зададим механизм образования нелинейных обратных связей в исходной постановке (3) с помощью уравнения

$$\dot{x}(t) = F(x, u, q, a, M). \tag{8}$$

Кроме координаты состояния $x(t)$ системы проектирования в это уравнение входят внешние воздействия $u(t)$, $q(t)$, $a(t)$, $M(t)$, представляющие собой искомые управления, а так же задающие, параметрические и внешние возмущающие воздействия соответственно.

Для формирования *уравнений самоорганизации* необходимо исключить внешние воздействия, то есть расширить исходные уравнения системы (8) таким образом, чтобы внешние воздействия стали для нее внутренними. Представим $q(t)$, $a(t)$ и $M(t)$ в (8) как частные решения некоторых дополнительных дифференциальных уравнений, описывающих информационную модель, и тем самым осуществим их «погружение» в общую структуру расширенной системы. Тогда проблема управления проектированием сводится к синтезу соответствующих законов управления $u(x_1,..., x_n, y_1,..., y_n)$ в функции координат состояния расширенной системы, где $y_1,..., y_n$ — координаты информационных моделей задающих, внешних и параметрических возмущающих воздействий.

Координаты $y_1,..., y_n$ связаны дополнительным

дифференциальным уравнением

$$\dot{z}(t) = \varphi(x, y), \tag{9}$$

где y — оценки соответствующих возмущающих воздействий.

Система (8), (9) представляет собой теоретическую модель синергетического синтеза процесса проектирования. Из неё следует, что увеличивая внешние потоки энергии и информации, наращивая, например, электрические мощности и объёмы хранилищ центров обработки данных, теоретически возможно создание неравновесных ситуаций, необходимых для спонтанного возникновения направленных процессов самоорганизации в системе проектирования. Изучение таких процессов – задача будущих исследований. В данной работе теоретическая модель (8), (9) рассматривается в качестве методологической основы для конструирования численного метода адаптации системы проектирования на инвариантных многообразиях.

Инварианты системы проектирования. Задача определения инвариантов в каждой прикладной области решается по-своему, большей частью основываясь на естественных свойствах объектов анализа [7, 8, 9,10].

По отношению к произвольному множеству элементов $\mathrm{A}=\{A_i\}$ инвариант, как неизменная характеристика класса относительно однородных объектов, формально представляется семантической конструкцией вида

$$\mathrm{A} = \mathrm{I}\{a_i\}, i = 1, 2, 3, \ldots \tag{10}$$

Здесь I — инвариант множества A; a_i — элементы множества с выделенными инвариантами. Для иерархической структуры может быть построена иерархия инвариантов.

Рассмотрим инварианты технологического процесса, соответствующие подсистеме S_1 системы $S = (S_1, S_2, S_3)$. На рис. 1-а показан алгоритм разработки блока объекта проектирования [11]. Он включает работы по заданию его структуры (1), определению параметров элементов (2), генерации компьютерной модели блока (3), решению задач анализа (4), принятию решений (5). Эти работы образуют циклы процессов параметрического (*a*) и структурного (*b*) синтеза блока. По результатам структурного синтеза работа (6) формирует документацию на блок и, если это необходимо, техническое задание на разработку блоков следующего иерархического уровня, или управление передаётся на предыдущий иерархический уровень процесса проектирования (утолщённая линия *c*). Этот алгоритм, реализуемый для каждого блока на заданном уровне иерархии, является инвариантным по отношению к природе объекта проектирования.

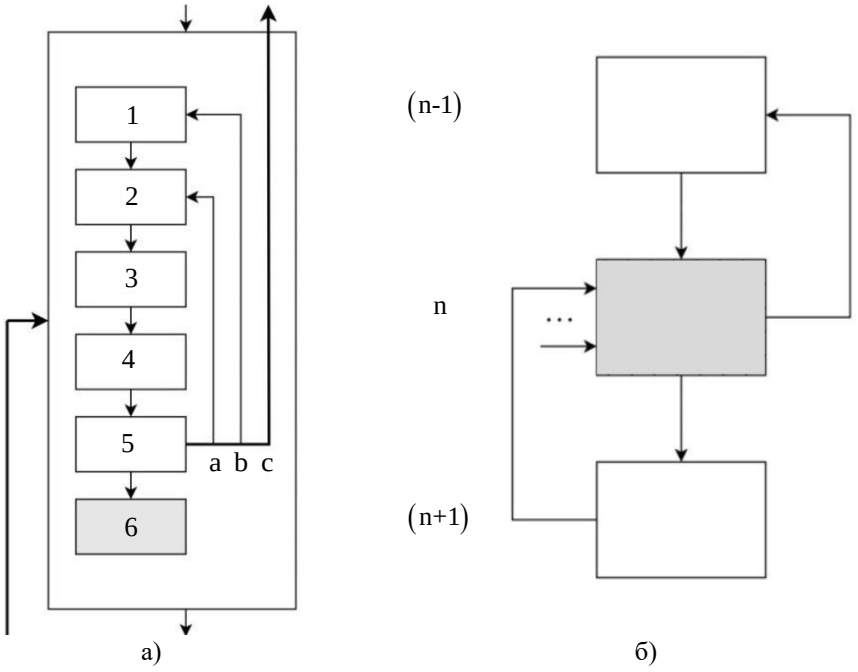


Рис. 1. Технологические инварианты процесса проектирования
а) — процесс проектирования блока на иерархическом уровне; б) — связи между иерархическими уровнями

Иерархический уровень (инвариантное многообразие) процесса проектирования можно трактовать как структуру, удалённую от точки динамического равновесия - аттрактора $F = (F_1, F_2, F_3)$. Формирование иерархического уровня проектирования, т.е. возникновение нового качества системы проектирования по горизонтали, представляет собой рождение параметров порядка в ходе взаимодействия минимум трех иерархических уровней [1]. Таким способом реализуется известный в синергетике принцип динамической иерархичности, описывающий перестройку и инверсию иерархии во время становления нового порядка. Поэтому, в качестве следующего инварианта введём в рассмотрение 3-х уровневый шаблон (рис.1-б), отражающий межуровневые взаимодействия параметров порядка системы проектирования. Каждый блок на рис. 1-б реализуется по алгоритму, представленному на рис. 1-а.

Выделим инварианты подсистемы S_2 менеджерского (проектного) управления. Классическая модель функционирования подсистемы S_2 предполагает последовательное определение целей управления проектом, построение иерархической структуры целей и работ, конструирование на этой базе управленческих артефактов (матрица ответственности, организационная структура исполнителей, базовое расписание проекта и др.) и, далее, разработку укрупнённого

плана управления проектом – системы управления проектом, и его реализацию. С помощью системы проектного управления, объединяющей в себе базовые представления о структуре процесса и продукта проектирования, осуществляется контроль изменений в проекте. При этом возможна визуализация динамических характеристик в виде управленческого треугольника, вершинам которого соответствуют параметры порядка. К ним относятся сроки, стоимость и качество проекта (требования ТЗ).

Инварианты энерго-информационной подсистемы S_3 представляют собой функциональные элементы, которые постоянно содержатся внутри экосистемы проектирования. Они являются основой для архитектурного представление системы проектирования *S*. Примеры энергоинформационных инвариантов и параметров порядка подсистемы S_3 приведены в табл.1 [12,13].

Таблица 1

Энерго-информационные инварианты

Инвариант	Свойства	Параметр порядка (характеристика)	Мера
Центр обработки данных (ЦОД)	Площадка для размещения серверного и сетевого оборудования и подключения их к интернету, предназначенная для обслуживания корпоративных клиентов	• стоимость аренды • максимальная нагрузка • тарифный план • скорость канала связи	тыс. руб. кВт кВт/час Мб/сек
Ситуационный центр	Площадка, оснащённая средствами коммуникаций и анализа данных, предназначенных для оперативного принятия управленческих решений в процессе проектирования	• количество и разнообразие источников информации • количества окон, блоков и категорий при отображении контента на видеостене • мощность аналитических возможностей	шт., % шт. тыс. руб. /мес.
Телекоммуникационная сеть	Сети электросвязи общего и ограниченного пользования на территории РФ с возможностью обслуживания международного трафика	• пропускная способность • надежность • живучесть	Эрл вероятность вероятность
CAD/CAE/ CAM/ PLM	Информационные системы автоматизации и интеграции процессов проектирования	• содержание • доступность • производительность • уровень	% час FLOPS час

Численный алгоритм адаптации системы проектирования на инвариантных многообразиях. Важнейшей особенностью системы проектирования, во многом определяющей её динамические характеристики, является то, что она конструируется параллельно с объектом проектирования. Процесс проектирования можно сравнить с одновременным созданием головоломки и её решением. Сложная взаимозависимость жизненных циклов системы проектирования и объекта проектирования является важным фактором, существенно влияющим на динамику разработки проектов.

Рассмотрим особенности взаимодействия целей (параметров порядка) $F = (F_1, F_2, F_3)$ системы проектирования S. Доминирующее положение в системе занимает подсистема S_1, формирующая представления объекта проектирования на основе анализа его естественных свойств. При этом аттрактор F_1 оказывает влияние на поведение подсистемы S_2 для достижения своей цели F_2. Можно говорить о «поглощении» цели F_2 аттрактором F_1 и об образовании нового аттрактора

$$F_{12} = F_1 + F_2. \tag{11}$$

Адаптация параметров порядка подсистемы S_3 на инвариантном многообразии (11) формирует аттрактор

$$F = F_{12} + F_3. \tag{12}$$

Иллюстрация процесса адаптации системы проектирования $S = (S_1, S_2, S_3)$ на инвариантных многообразиях F_i, $i = 1, 2, 3$ приведена на рис. 2.

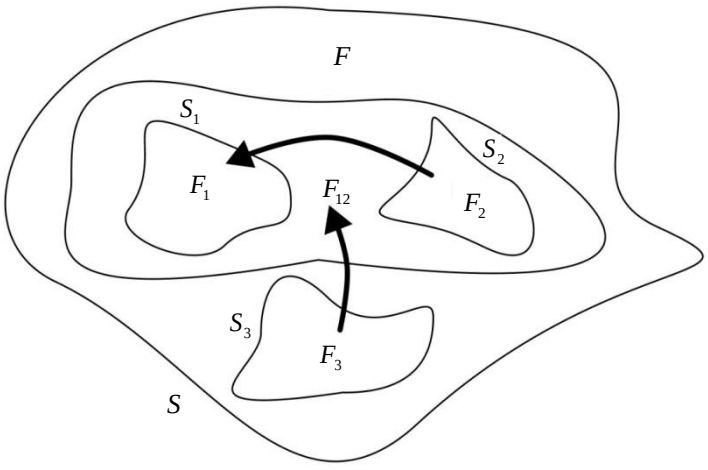


Рис. 2. Иллюстрация процесса поглощения аттракторов-целей

В результате синергетического синтеза каждая из подсистем (или групп подсистем) «погружается» на пересечение соответствующих локальных аттракторов (инвариантных многообразий), а вся система «погружается» на глобальный аттрактор $F=\left(F_1,\ F_2,\ F_3\right)$.

Разработаем численный метод динамического конструирования децентрализованного процесса проектирования с учётом структуры подчинения инвариантных многообразий в соответствии с рис. 2.

Каркас метода составляет алгоритм, приведённый на рис. 3. Движение S_1 на аттракторе F_1 представляется последовательной сменой слоёв, каждый из которых формируется в соответствии с технологическими инвариантами (рис. 1). Формула для набора уровней k-го слоя: $\left(k,k+1,k+2\right)$, где k — номер слоя ($k=1,2,3,\ldots$). Например, при $k=3$ имеем состояние подсистемы S_1, прошедшей путь эволюции, двигаясь последовательно от аттрактора к аттрактору, $n=1,2,3,4,5$.

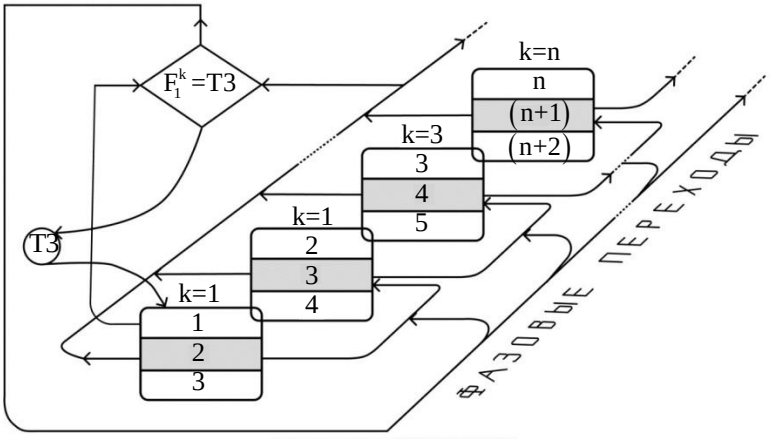


Рис. 3. Алгоритм движения подсистемы S_1 на инвариантном многообразии F_1

На каждом аттракторе n осуществляется преобразование сгенерированных на $(n-1)$ уровне параметров порядка в параметры порядка уровня с номером $(n+1)$. Таким образом, формируется множество локальных аттракторов — целей

$$F_1^n=(f_1^n)_j, \tag{13}$$

где n, ($n=1,2,3,\ldots$) — уровень состояния подсистемы S_1; ($j=1,2,3,\ldots$) — количество блоков объекта проектирования (подцелей, локальных аттракторов) на уровне.

Множество (13) представляет собой топологическое

многообразие. Генерация параметров порядка выполняется по схеме процесса разработки блока подсистемы S_1 (рис. 1,а) с помощью подходящих для конкретных условий применения методов, например, последовательного анализа вариантов систем [15], циклического анализа частотных характеристик [16], аналитического конструирования агрегированных регуляторов [17] и других, разработанных для проектирования систем в различных предметных областях.

Синхронизация подцелей уровня n осуществляется на основе его взаимодействия с предыдущим уровнем в соответствии с технологическими инвариантами, представленными на рис. 1. Если не удаётся синхронизировать параметры порядка, то аттрактор подсистемы S_1 погибает и фазовый переход системы $S = (S_1,\ S_2,\ S_3)$ не реализуется.

Работа «машины проектирования» успешно завершается, когда на k-м слое её функционирования достигаются требуемые значения параметров порядка системы $S = (S_1,\ S_2,\ S_3)$.

Рассмотрим задачу последовательной адаптации аттракторов F_2 и F_3 на топологическом многообразии (13), решение которой должно обеспечить синхронизацию целей F_i, $i = 1,2,3$, в соответствии с рис. 2. Это сложная задача, требующая применения эмпирических методов и анализа данных.

На первом этапе, в соответствии с иерархией целей, осуществим «погружение» цели F_2 на аттракторе F_1. Для этого необходимо иметь метод, связывающий результат (13) с характеристиками стоимости, сроков и качества проекта. Универсальные решения в этой области отсутствуют, поэтому конструирование модели «погружения» осуществляется с помощью построения диаграммы расписания проекта и анализа его финансового состояния с помощью упрощённых дифференциальных уравнений [18, 19]. На этом этапе могут быть эффективны методы экспертных оценок Wideband Delphi [20], прототипирования объекта проектирования с помощью CAD/CAE/CAM – систем [12]. Инновационным подходом при определении параметров порядка в промышленности и проектировании считается применение алгоритмов искусственного интеллекта [21].

На втором этапе «погружения» целей осуществляется адаптацию F_3 на многообразии $F_1 + F_2$. В соответствии с принятой в ИТ-отрасли терминологией, эта процедура представляет собой «развёртывание» задач на имеющейся инфраструктуре проектирования, характеризуемой, например, приведёнными в табл. 1 инвариантами.

Реализация цели F_3 для S предполагает объединение различных инструментов проектирования и сервисов на единой цифровой платформе, интеграцию данных, наличие единого интерфейса для взаимодействия со всеми сервисами через общую точку входа, территориальную распределённость компонентов подсистемы S_3, работающих несинхронно и независимо друг от друга со своим внутренним временем. При выполнении этих условий возможно построение диаграммы (модели) развёртывания задач подсистем S_1 и S_2 на элементах распределённой инфраструктуры. Эта диаграмма отражает архитектурное представление системы S, которое изменяется при каждом фазовом переходе. В работе [22] изучены возможности применения метода клеточных сетей Петри для построения динамической модели развёртывания частных технических заданий внутри экосистемы проектирования. Показано, что метод позволяет контролировать, какие из узлов системы распределённого проектирования в данный момент находятся в активном режиме и какую работу они выполняют, а так же подстраивать архитектуру подсистемы S_3 под изменения, происходящие в S_1 и S_2.

Численный пример. Рассмотрим пример динамического конструирования (планирования) системы проектирования при разработке технологии электромагнитной совместимости элементов автономной электроэнергетической системы (АЭЭС). Для упрощения ограничимся случаем, когда $S = \left(S_1,\ S_3\right)$, то есть пример демонстрирует работу механизма фазовых переходов на основе естественных свойств объект проектирования (рис. 3) с одновременной адаптацией F_3 на аттракторе F_1 (рис. 2).

Пусть имеем простейшую АЭЭС (рис. 4), состоящую из трехфазного синхронного генератора номинальной мощностью 1 кВт к которому подключены полупроводниковый управляемый выпрямитель с заданными углом регулирования 15º, работающий на двигательную нагрузку мощностью 0,5 кВт. На входе управляемого выпрямителя подключен трёхфазный сетевой фильтр. Дополнительное электронное оборудование суммарной мощностью 0,1 кВт присоединено к узлу посредством собственных импульсных источников питания со встроенными электрическими фильтрами.

Допустим, что в процессе эксплуатации АЭЭС рабочая система фильтрации помех перестаёт обеспечивать заданные требования к питающему напряжению. Поэтому необходимо внести в неё изменения, то есть осуществить реинжиниринг системы.

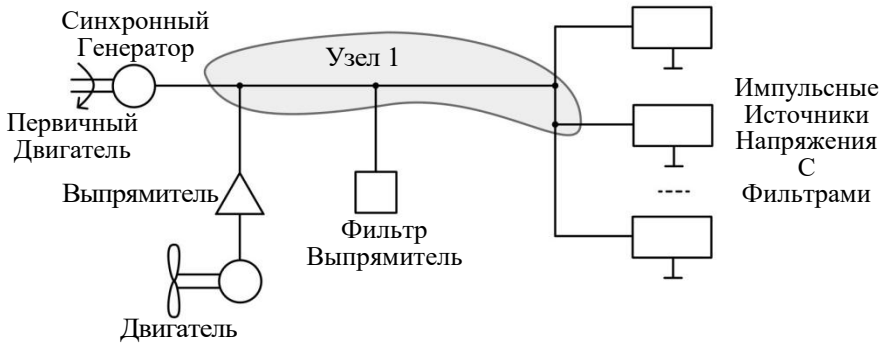


Рис. 4. Пример одноузловой АЭЭС

Воспользуемся алгоритмом, приведённым на рис. 3. В соответствии с (13) для $k=1$ имеем аттрактор-цель

$$F_1^1 = (f_1^1)_1, \tag{14}$$

представляющий собой вектор, элементами которого являются параметры порядка, характеризующие требуемое качество энергетических процессов в узле АЭЭС. К ним относятся коэффициенты несинусоидальности THD ≤ 0,05 и сдвига DPF ≈ 0,9, вычисляемые на основе анализа соответствующих токов и напряжений в узле АЭЭС методом Фурье. Этот аттрактор составляет основу технического задания (ТЗ) на проектирование фильтра.

Чтобы определить область начальных условий выполним Фурье - анализ токов и напряжений в узле заданной АЭЭС. Для этого на уровне $n=2$ реализуется технологический инвариант, представленный на рис. 1,а. Анализ кривых тока и напряжения (рис. 5,а) показал преобладание 3-й и 5-й гармоник тока в кабеле подключения ИПП, а также значительные уровни 5-й и 7-й гармоник электрического напряжения в узле АЭЭС. Полученные в результате THD = 0,126, что значительно больше, чем требуемое значение 0,05, а DPF имеет приемлемое значение. Первым экспертным решением является установка дополнительного односекционного фильтра гармоник (L1, C1) в рассматриваемом узле АЭЭС, настроенного на частоту 3-й гармоники тока. Далее осуществляется фазовый переход с уровня $n=2$ на уровень $n=3$.

Для $k=2$ имеем аттрактор-цель

$$F_1^2 = (f_1^2)_1. \tag{15}$$

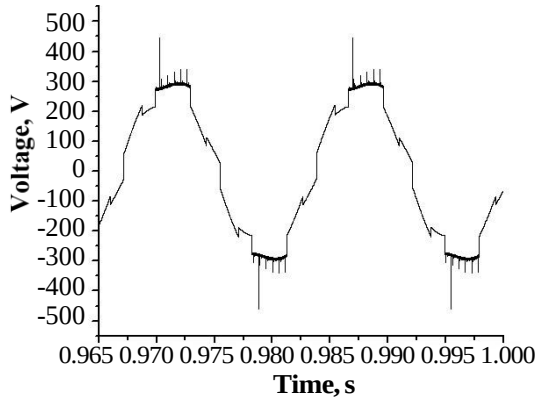
Реализуем технологический инвариант рис.1,а для изменённой схемы АЭЭС. Рассчитаем параметры дополнительного нового фильтра: CP=9,94 мкФ; C1=3,9 мкФ; L1=199,5 мГн; Q=257,7 ВАР. Выполним Фурье-анализ тока и напряжения в узле АЭЭС для определе-

ния эффективности новой системы фильтрации. Его результаты показаны на рис. 5,в. При этом DPF=0,98, что даже выше, чем DPF=0,9. Однако при этом THD=0,095. Следующим экспертным решением является ещё одно изменение структуры фильтра. К прежней схеме устройства добавляется секция (L2, C2), настроенная на 5-ю гармонику тока. Осуществляется фазовый переход с уровня $n=2$ на уровень $n=3$.

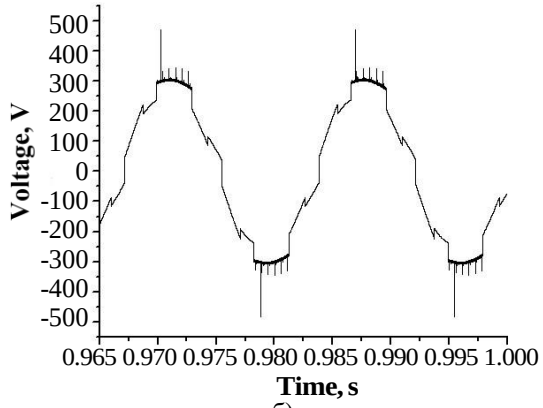
Для $k=3$ имеем аттрактор-цель

$$F_1^3=(f_1^3)_1. \tag{16}$$

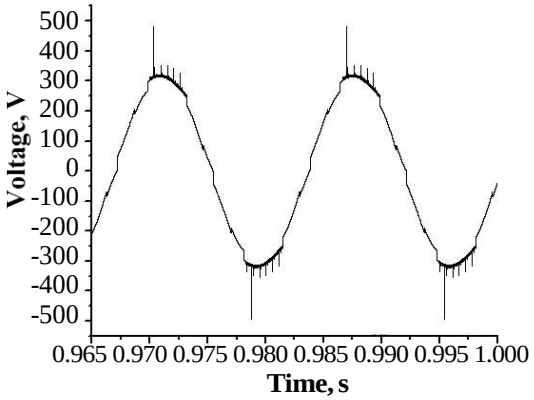
Реализуем технологический инвариант рис. 1,а для повторно изменённой схемы АЭЭС. Рассчитаем параметры нового дополнительного фильтра: $CP=3,51$ мкФ; $C1=3,87$ мкФ; $L1=201,97$ мГн; $C2=6,33$ мкФ; $L2=44,43$ мГн; $Q=264,4$ ВАР. Фурье-анализ в узле АЭЭС приведён на рис. 5,с. Параметры порядка имеют следующие значения: $THD=0,039$ и $DPF=0,95$. Таким образом, требование $F_1^3=TZ$ выполнено. Динамика изменения параметров прядка приведена в таблице 2.



а)

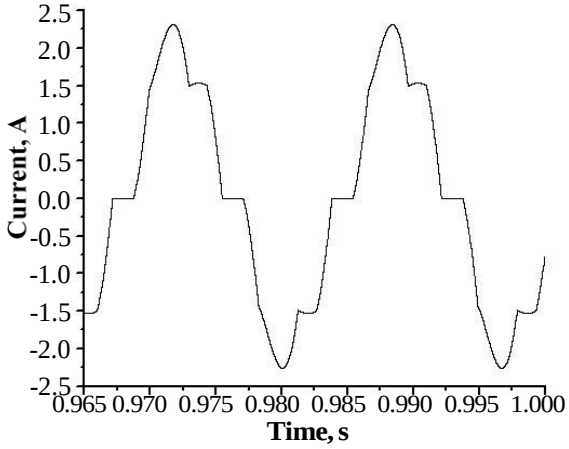


б)

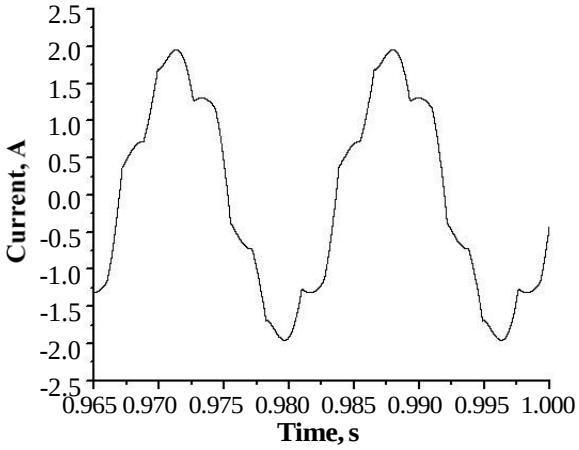


в)

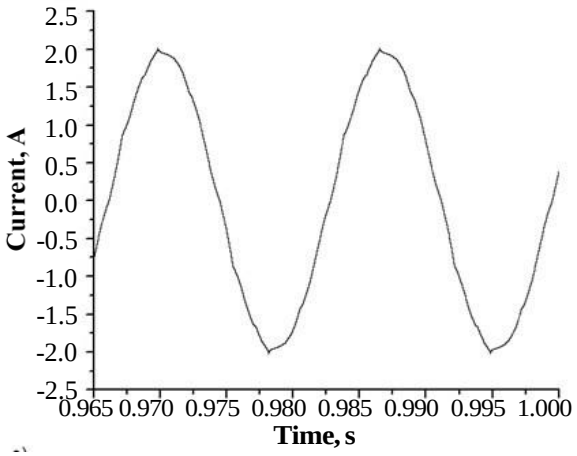
Рис. 5. Зависимости напряжения от времени:
а) — первый слой алгоритма; б) — второй слой алгоритма;
в) — третий слой алгоритма



а)

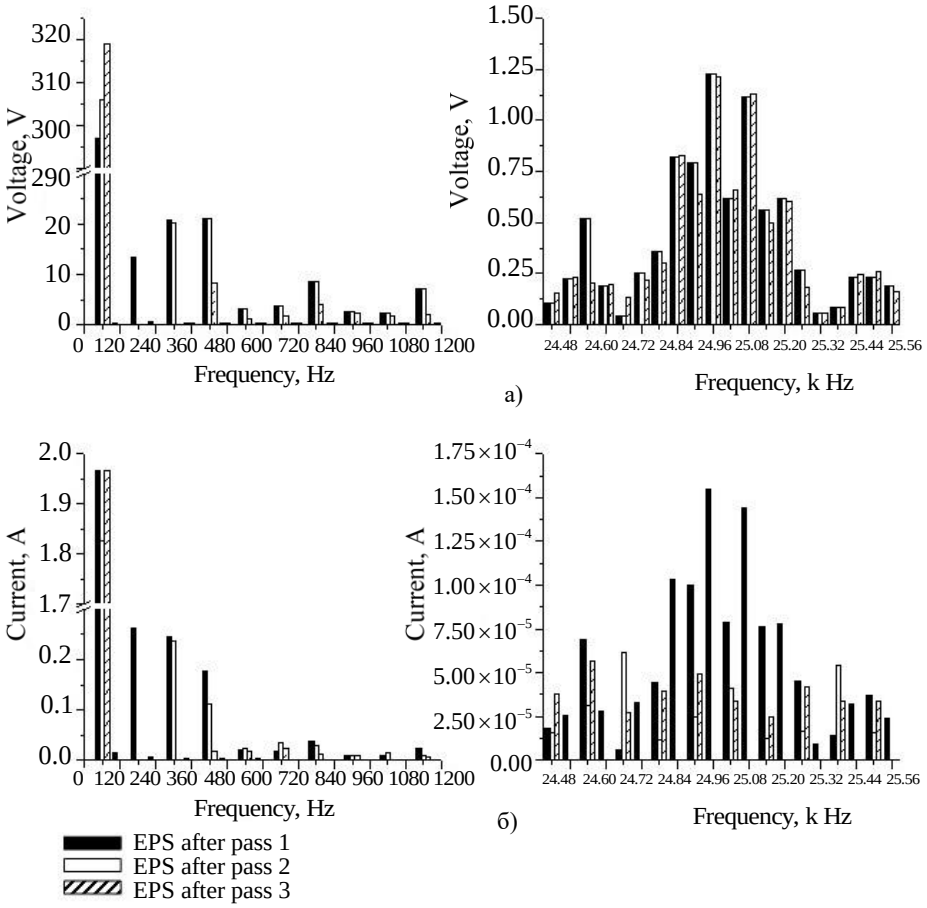


б)



в)

Рис. 6. Зависимости тока от времени:
а) — первый слой алгоритма; б) — второй слой алгоритма;
в) — третий слой алгоритма



а)

б)

Рис. 7. Спектры тока и напряжения, рассчитанные при реализации проекта

Таблица 2

Динамика изменения показателей качества

Показатель / уровень k	1	2	3
THD	0,126	0,095	0,038
DPF	0,901	0,979	0,947

Продолжая рассмотрение примера, отметим особенности адаптации F_3 на аттракторе F_1. Эта задача актуальна при значительном количестве узлов в АЭЭС. Пусть их количество будет равно 100, а каждому узлу будет соответствовать схема, изображённая на рис. 4. В этом случае для каждого узла системы реализуется рассмотренный выше пример, а структура каждого аттрактора подсистемы S_1 (уровня проектирования) $n = 2,3,\ldots$ представляет собой множество локальных аттракторов - целей

$$F_1^n = (f_1^n)_j, (j = 1,2,3,...,100). \qquad (17)$$

Их распределение на инвариантах энергоинформационной подсистемы S_3 при каждом значении $n = 2,3,\ldots$ динамически формирует архитектурное представление системы проектирования S, соответствующее целям F_1. Критериями распределения могут служить заданные инварианты F_2. В [22] эта задача успешно решена с помощью метода клеточных сетей Петри.

Выводы и рекомендации. Сложность нелинейных взаимодействий жизненных циклов продукта и проекта в системах технического проектирования существенно ограничивает возможности теоретического анализа их динамики. Предложенный феноменологический подход к моделированию, основанный на принципе направленной самоорганизации, может рассматриваться в качестве одной из альтернатив решения этой проблемы. Направленная самоорганизация осуществляется на основе совокупности обратных связей. Эти связи обеспечивают асимптотически устойчивое движение системы вдоль инвариантных многообразий и формируются численным алгоритмом, каркас которого составляет механизм фазовых переходов (рис. 3), взаимодействующий с механизмом «поглощения» аттракторов (рис. 2) и базой практических методов проектирования, не исключая физическую интуицию участников процесса.

Полученные результаты рекомендуются в качестве теоретического обоснования при создании цифровых планировщиков, обеспечивающих сбалансированное многопредметное планирование проектных работ в темпе постановки задач. Такие инструментальные системы актуальны при разработке масштабных инновационных проектов, функционирующих как малые предприятия на множестве циф-

ровых платформ, объединённых в экосистему проектирования. Основные рассмотренные в статье идеи были протестированы при реализации промышленной платформы автоматизации проектирования инноваций в АУ «Технопарк-Мордовия» [23].

ЛИТЕРАТУРА

[1] Хакен Г. *Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам*. Москва, УРСС: ЛЕНАНД, 2014, 317 с.

[2] Колесников А.А. *Синергетика и проблемы теории управлени*я. Москва, Физматлит, 2004, 504 с.

[3] Лебедев С.А. Феноменологическая теория и ее структура. *Гуманитарный вестник*, 2023, № 6, с. 1-25.

[4] Haken H. *Synergetics: basic concepts*. New York, Springer, 2020, 30 p.

[5] Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. *Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами*. Санкт-Петербург, Наука, 2000, 549 с.

[6] Ioannou P.A., Sun J. *Robust adaptive control*. New York, Dover, 2012, 819 p.

[7] Байбара А. С., Пузаченко М. Ю., Сандлерский Р. Б., Кренкес А. Н.. Ландшафтные инварианты - параметры порядка динамической системы. *Известия РАН. Серия географическая*, 2023, т. 87, № 3, с. 370–390.

[8] Khan I., Wagg D., Sims, N. Nonlinear robust observer design using an invariant manifold approach. *Control Engineering Practice*, 2016, vol. 55. pp. 69-79.

[9] Jain S., Haller G. How to compute invariant manifolds and their reduced dynamics in high-dimensional finite element models. *Nonlinear Dynamics*, 2022, vol. 107, pp. 1417–1450.

[10] Gorbana A. N., Karlina I.V. Method of invariant manifold for chemical kinetics. *Chemical Engineering Science*, 2003, vol. 58, pp. 4751–4768.

[11] Норенков И.П. *Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем*. Москва, Высшая школа, 1986, 311 с.

[12] Беднаржевский, В. С. Обзор CAD/CAM/CAE-систем для моделирования и проектирования энергомашиностроительного оборудования. *Известия Алтайского государственного университета*, 2002, № S, с. 118-121.

[13] Муромцев Ю. Л., Муромцев Д. Ю., Тюрин И. В. и др. *Информационные технологии в проектировании радиоэлектронных средств: учеб. пособие для студ. высш. учебн. заведений*. Москва, Издательский центр «Академия», 2010, 384 с.

[14] Gero J. S. *Artificial intelligence in design '02*. Springer Dordrecht, 2002, pp. 642.

[15] Вязгин В.А., Федоров В.В. *Математические методы автоматизированного проектирования: учеб. Пособие для студ. высш. учебн. заведений*. Москва, Высшая школа, 1989, 184 с.

[16] Belov V., Shamaev A., Leisner P. [et al.] A simulation-based spectral technique for power quality and EMC design of an independent power system. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 2006, vol. 7, no. 1, p. 1-22.

[17] Колесников А.А. *Синергетическая теория управления*. Москва, Энергоатомиздат, 1994, 344 с.

[18] Первушин В.А. *Практика управления инновационными проектами: учеб. пособие*. Москва, Издательский дом «Дело», РАНХиГС, 2014, 208 с.

[19] Белов В.Ф., Гаврюшин С.С., Маркова Ю.Н. Неавтономная система как модель процесса производства технической инновации. *Математическое моделирование и численные методы*, 2021, № 1, с. 110–131.

[20] Boehm B.W. Software engineering economics. *Software Engineering*, 1983, 17 p.

[21] Mahboob Al B., Imtiaj Hasnain Khan. Artificial intelligence in industrial engineering a review. *International Journal of Scientific Research and Engineering Development*, 2017, vol. 2, iss. 3, p. 40-48.

[22] Белов В. Ф. Клеточно-автоматная модель развёртывания задач проектирования на распределённых ресурсах. *Автоматизация процессов управления*, 2025, № 2(80), с. 71-78.

[23] Белов В.Ф., Гаврюшин С.С., Занкин А.И. Архитектура цифровой платформы исследования и проектирования инноваций в машино- и приборостроении. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 3, с. 3–15.

Статья поступила в редакцию 18.04.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Белов В.Ф., Гаврюшин С.С. Феноменологическая модель системы проектирования инноваций в машиностроении. *Математическое моделирование и численные методы*, 2026, № 1, с. 66–86.

Белов Владимир Федорович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Анализ данных и искусственный интеллект» МГУ им. Н.П. Огарева. e-mail: belovvf@mail.ru

Гаврюшин Сергей Сергеевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерные системы автоматизации производства». МГТУ им. Н.Э. Баумана. Баумана.e-mail: gss@rk9.bmstu.ru

Phenomenological model of innovation design in mechanical engineering

© V.F. Belov[1], S.S. Gavriushin[2]

[1]Ogarev Mordovia State University, Saransk, 430005, Russia
[2]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The structural complexity and multidisciplinarity of modern innovation design systems in mechanical engineering significantly limit the possibilities of classical analysis of their dynamics using theoretical models that describe self-organization processes and take the form of differential equations. For practical control of the dynamic characteristics of the design system, it is urgent to develop a model that is consistent with the fundamental theory but is not a direct derivative of the theory. Such models are commonly referred to as phenomenological. The article considers synergetic theory of system self-organization as a basis for macroscopic description of the innovation design system. This theory operates with the following categories: attracting attractor-goal, order parameter, and evolutionary equations. For a more rigorous representation of the model, the language of invariant manifold theory is used. Based on this, an algorithm has been developed that ensures

adaptation of the design system on invariant manifolds and implements the principle of simultaneous design of both the system and the development of the design object. The obtained results were confirmed during the creation and industrial testing of a prototype digital planner for optimizing the design system architecture at the pace of project development.

***Keywords**: design system, dynamics, model, adaptation, self-organization, order parameters, invariant manifolds*

REFERENCES

[1] Haken G. *Informaciya i samoorganizaciya. Makroskopicheskij podhod k slozhnym sistemam* [Information and Self-Organization. A macroscopic approach to complex systems]. Moscow, Editorial URSS [URSS: LENAND], 2014, 317 p.

[2] Kolesnikov A.A. *Sinergetika i problemy teorii upravleniya* [Synergetics and problems of control theory]. Moscow, Fizmatlit, 2004, 504 p.

[3] Lebedev S.A. Phenomenological theory and its structure [Fenomenologicheskaya teoriya i ee struktura]. *Humanitarian Bulletin of BMSTU* [Gumanitarnyj vestnik], 2023, no. 6, pp. 1-25.

[4] Haken H. *Synergetics: basic concepts*. New York, Springer, 2020, 30 p.

[5] Miroshnik I.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. *Nelinejnoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinamicheskimi sistemami* [Nonlinear and adaptive control of complex dynamic systems]. St. Petersburg, Publishers Nauka, 2000, 549 p.

[6] Ioannou P.A., Sun J. *Robust adaptive control*. New York, Dover, 2012, 819 p.

[7] Baybara A. S., Puzachenko M. Yu., Sandlersky R. B., Krenkes A. N. Landshaftnye invarianty - parametry poryadka dinamicheskoj sistemy [Landscape invariants are order parameters of a dynamic system]. *Regional Research of Russia*, 2023, vol. 87, no. 3, p. 370–390.

[8] Khan I., Wagg D., Sims N. Nonlinear robust observer design using an invariant manifold approach. *Control Engineering Practice*, 2016, vol. 55. pp. 69-79.

[9] Jain S., Haller G. How to compute invariant manifolds and their reduced dynamics in high-dimensional finite element models. *Nonlinear Dynamics*, 2022, vol. 107, pp. 1417–1450.

[10] Gorbana A. N., Karlina I.V. Method of invariant manifold for chemical kinetics. *Chemical Engineering Science*, 2003, vol. 58, pp. 4751–4768.

[11] Norenkov I.P. *Vvedenie v avtomatizirovannoe proektirovanie tekhnicheskih ustrojstv i sistem* [Introduction to computer-aided design of technical devices and systems]. Moscow, Vysshaya Shkola Publishers, 1986, 311 p.

[12] Bednarzhevsky V. S. Obzor CAD/CAM/CAE-sistem dlya modelirovaniya i proektirovaniya energomashinostroitel'nogo oborudovaniya [Review of CAD/CAM/CAE systems for modeling and design of power engineering equipment]. *Izvestiya Altajskogo gosudarstvennogo universiteta* [News of Altai State University], 2002, no. S, p. 118-121.

[13] Muromtsev Yu. L., Muromtsev D. Yu., Tyurin I. V. et al. *Informacionnye tekhnologii v proektirovanii radioelektronnyh sredstv: ucheb. posobie dlya stud. vyssh. uchebn. zavedenij* [Information technologies in the design of radioelectronic equipment: textbook. aid for students higher textbook establishments]. Moscow, Publishing House Academia, 2010, 384 p.

[14] Gero J. S. Artificial intelligence in design ’02. *Springer Dordrecht*, 2002, pp. 642.

[15] Vyazgin V.A., Fedorov V.V. *Matematicheskie metody avtomatizirovannogo proektirovaniya: ucheb. Posobie dlya stud. vyssh. uchebn. zavedenij* [Mathematical methods of computer-aided design: textbook. A manual for students. higher textbook establishments]. Moscow, Vysshaya Shkola Publishers, 1989, 184 p.

[16] Belov V., Shamaev A., Leisner P. [et al.] A simulation-based spectral technique for power quality and EMC design of an independent power system. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 2006, vol. 7, no. 1, p. 1-22.

[17] Kolesnikov A.A. *Sinergeticheskaya teoriya upravleniya* [Synergetic management theory]. Moscow, Energoatomizdat Publishing House, 1994, 344 p.

[18] Pervushin V.A. *Praktika upravleniya innovacionnymi proektami: ucheb. posobie* [Practice of managing innovative projects: textbook. Allowance]. Moscow, Delo Publishing House, RANEPA, 2014, 208 p.

[19] Belov V.F., Gavryushin S.S., Markova Yu.N. Non-autonomous system as a model of the production process of technical innovation. *Mathematical Modeling and Computational Methods*, 2021, no. 1, pp. 110–131.

[20] Boehm B.W. Software engineering economics. *Software Engineering*, 1983, 17 p.

[21] Mahboob Al B., Imtiaj Hasnain Khan. Artificial intelligence in industrial engineering a review. *International Journal of Scientific Research and Engineering Development*,2017, vol. 2, iss. 3, p. 40-48.

[22] Belov V.F. Kletochno-avtomatnaya model' razvyortyvaniya zadach proektirovaniya na raspredelyonnyh resursah [Cellular automata model for deploying design problems on distributed resources]. *Automation of control processes*, 2025, no. 2(80), p. 71-78.

[23] Belov V.F., Gavryushin S.S., Zankin A.I. Arhitektura cifrovoj platformy issledovaniya i proektirovaniya innovacij v mashino- i priborostroenii. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij [Architecture of a digital platform for research and design of innovations in mechanical and instrument engineering]. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 3, p. 3–15.

Belov V.F., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Department of Data Analysis and Artificial Intelligence, Ogarev Mordovia State University. e-mail: belovvf@mail.ru

Gavriushin S.S., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Department of Computer Production Automation Systems, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: gss@bmstu.ru