

УДК 658.5.011.46:621

С. Г. СЕЛИВАНОВ, А. А. НУРГАЛИЕВ, О. Ю. ПАНЬШИНА, А. Н. ПЕТРОВ

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СМЕНЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УКЛАДОВ
СРЕДСТВАМИ КРИТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Рассматриваются системотехнические принципы инновационного развития технологических систем. Приводится математическая модель для обоснования смены технологических укладов. В целях обеспечения смены технологических укладов проанализированы закономерности развития мехатронных металлорежущих станков, разработан метод технологического форсайта для смены поколений технологий, разработаны методы искусственного интеллекта для выбора критических технологий в машиностроении. *Технологические уклады; высокие и критические технологии; математическое моделирование технологий; искусственный интеллект; искусственные нейронные сети; технологическое перевооружение производства*

Известно, что целью политики Российской Федерации [1] в области развития науки и технологий является переход к инновационному пути развития страны, обеспечение конкурентоспособности результатов отечественных научных исследований и экспериментальных разработок, ускорение их использования в интересах развития экономики, поддержания необходимого уровня обороны и безопасности личности, общества и государства.

Первоочередные задачи, которые решают при организации научно-технической деятельности в данном направлении, предусматривают реализацию важнейших инновационных проектов и осуществление технологического перевооружения наукоемких производств.

Рассмотренная научно-техническая политика государства родилась не на пустом месте. Она является следствием исследования научных закономерностей смены технологических укладов в современной инновационной экономике. В частности, американскими экономистами было доказано, что значение технологических сдвигов (87,5%) для экономического роста США существенно выше, чем капитала и труда (12,5%) [2].

Эти закономерности интенсивного экономического роста уже освоены многими быстро развивающимися странами: Китаем, Кореей, Сингапуром, Тайванем, Мексикой. Они стремятся обеспечить свой экономический рост за счет быстрого развития пятого технологического уклада: производства телекомму-

никационного оборудования, создания компьютерных технологий, выпуска оптических инструментов и приборов, разработки электроэнергетического оборудования и приборов, производства автотранспортных средств, медицинской техники и освоения других наиболее динамично развивающихся рынков.

Наша страна в настоящее время также осуществляет переход к становлению современной инновационной экономики, обеспечивающей высокие темпы роста на основе решения задач управления технологическими сдвигами в промышленности на различных иерархических уровнях их реализации от технологических укладов до локальных технологий.

**1. СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ
ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Для описания этапов развития любой технологической системы: зарождения, интенсивного развития до точки перегиба на восходящей ветви логистической кривой, дефлирующего развития после названной точки перегиба до стадии ее стагнации и гибели, — можно использовать S-образные кривые развития технологической системы, которые характеризуются улучшением главных параметров целевой функции (F) во времени (T) (рис. 1). Такое математическое моделирование позволяет утверждать, что после прохождения точки перегиба S-образной закономерности, т. е. после перехода от стадии интенсивного развития в стадию дефлирую-

шего развития, желательнее приступить к началу научно-исследовательских работ для перехода к новой S -образной кривой развития, основанной на применении в анализируемой технологической системе нового принципа действия. Данное решение позволяет осуществить профилактические меры, которые не допускают перехода технологической системы в стадии стагнации, последующей деградации и гибели, т. е. обеспечивает устойчивое ее развитие на основе смены технологических укладов, поколений техники, освоения новых высоких и критических технологий.

Закон гомеостазиса (устойчивости) позволяет сформулировать граничные условия существования технологической системы (целесообразного единства целостности, устойчивости состава и свойств системы, их динамического постоянства). Способность технологической системы оставаться в названной области значений параметров состояния нередко называют *живучестью*, а приспособляемость к изменениям во внешней среде на основе изменения структуры или функции системы называется *адаптацией*. Адаптация – это один из критериев самосохранения, в том числе в случае потери устойчивости. Формой приспособления технологической системы к изменению условий ее функционирования во внешней среде является развитие как процесс целенаправленного изменения структуры и функции анализируемой технологической системы. Критерий адаптации (от лат. *adaptatio* – приспособление) развивающейся технологической системы характеризуют не только ее приспособленность к изменению своей структуры или функционирования в изменяющихся условиях, но также наличие резервов и инвестиционных ресурсов для таких перестроек. Использование резерва предполагает:

- различные способы модификации технологических систем в целях улучшения главных параметров конкурентоспособности, качества или технического уровня в рамках постоянного принципа действия такой системы;
- использование более прогрессивных принципов действия технологических систем, которые основаны на новых физических, химических и других эффектах.

Модификация технологической системы в рамках постоянного принципа действия, как правило, вызывает ее продвижение вверх по S -образной кривой, а изменение принципа действия – смену S -образной кривой развития (рис. 1). Если такие изменения не выхо-

дят за пределы определенной «трубки траекторий», то мы вправе констатировать устойчивое развитие технологической системы за счет инновационной деятельности и смены поколений техники и технологии.

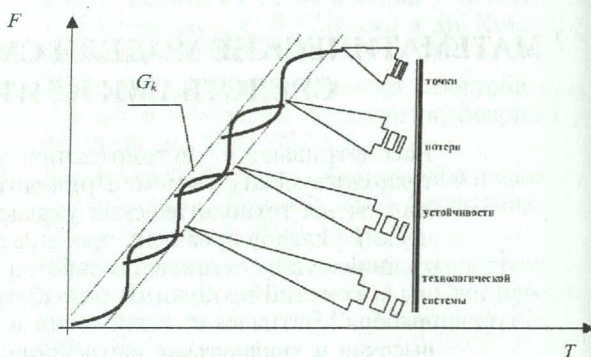


Рис. 1. Трубка траекторий устойчивого развития технологической системы

Критерий устойчивости любой системы можно аналитически определить по Ляпунову следующим образом: «Если хотя бы одно движение системы (изменение ее параметров состояния – x_i) с течением времени выходит за пределы некоторой окрестности G_k , то система неустойчива». В нашем случае окрестность G_k – это трубка траекторий, а параметры состояния (x_i) – это векторы главной целевой функции развивающейся технической системы F в виде параметров ее технического уровня и качества. Анализ изменения целевой функции технической системы в границах «трубки траекторий», ее устойчивого развития характеризует волновую динамику ее роста.

Рассмотренные выше принципы технологической инноватики можно исследовать на различных иерархических уровнях развития технологических систем от технологических укладов до уровня отдельных технологий.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СМЕНЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УКЛАДОВ

Научные исследования инновационной экономики основываются на волновой динамике экономического роста, длинных «К-волнах» Н. Д. Кондратьева, которые позволили в конце XX века сформулировать теорию технологических укладов. Технологические уклады – это целостные комплексы технологически сопряженных производств, периодический процесс последовательного замещения которых определяет «длинноволновой» ритм современного экономического

роста [4]. Смена инновационными средствами доминирующих технологических укладов сопровождалась серьезными сдвигами в международном разделении труда, в изменении конкурентоспособности государств, обновлением состава наиболее преуспевающих стран (лидеров).

Каждая из длинных экономических волн формировала свой технологический уклад [3, 4]:

1. *Новых текстильных технологий* и появления паровой энергетики (1770–1830 годы).

2. *Технологий паровой энергетики* (1830–1880 годы) и развития в данном технологическом укладе связанного с ней машиностроения (паровых двигателей, пароходов и паровозов, станков).

3. *Технологий электроэнергетики* (1880–1930 годы) и зарождения в этом укладе радиосвязи и телеграфа, нефтехимии, автомобилестроения и самолетостроения.

4. *Нефтехимических технологий и энергетики двигателей внутреннего сгорания* (1930–1980 годы), в этом укладе впервые появились компьютерные информационные технологии и атомная энергетика.

5. *Технологий информатики и микроэлектроники* (от 1980–1990 до 2030–2040-х годов), в данном технологическом укладе появились биотехнологии, геновая инженерия, технологии освоения космического пространства, которые должны стать доминирующими в следующем технологическом укладе.

Для исследования закономерностей и разработки моделей смены технологических укладов можно воспользоваться математическими моделями «производственных функций» [5, 6]. Производственная функция (Production Function) устанавливает зависимость между количеством применяемых ресурсов и максимально возможным объемом выпускаемой продукции в единицу времени, она обобщенно описывает всю совокупность технически эффективных способов производства (технологий).

Производственные функции описывают различными математическими моделями: Кобба–Дугласа, Солоу, Солтера, ПЭЗ, Леонтьева [6]. Рассмотрим возможности использования производственных функций для математического моделирования процесса смены технологических укладов ($4 \rightarrow 5$ или $5 \rightarrow 6$), для чего целесообразно использовать производственную функцию Солоу, которая, в отличие от функции Кобба–Дугласа, учитывает научно-технический прогресс (НТП). Произ-

водственную функцию Солоу с трудосберегающим НТП можно определить по следующему соотношению:

$$X = F(K, A(t)L), \quad (1)$$

где K — объем основных фондов; $A(t)$ — функция, отражающая влияние научно-технического прогресса на эффективность трудовых ресурсов, определяемая как $A(t) = Ae^{jt}$; A — константа по объекту анализа; j — вклад НТП; L — число занятых людей (число человеко-дней).

Особенностью производственной функции Солоу является предположение, что эффективность использования трудовых ресурсов растет с течением времени, а эффективность использования капитала остается неизменной после внедрения в производство электроприборов, автоматических линий, компьютеров и других средств технологического оснащения. Вместе с тем данная модель не учитывает влияния научно-технического прогресса на качество рабочей силы, связанное с формированием «интеллектуального капитала» работников, накоплением и применением полученных знаний.

На основании изложенных предпосылок производственная функция может быть модифицирована следующим образом:

$$F(K, L) = K^\alpha \times H^\beta \times (Ae^{jt} \times L)^{1-\alpha-\beta}, \quad (2)$$

где H — высокопрофессиональная рабочая сила с учетом вложений в интеллектуальный капитал за счет формирования систем профессионального образования, основанных на креативной педагогике и инновационных образовательных технологиях; α — коэффициент эластичности производства по K ; β — коэффициент эластичности производства по L .

Функцию изменения интеллектуального капитала можно представить в виде

$$H = e^{\phi(t)} \times L, \quad (3)$$

где $e^{\phi(t)}$ — эффективность единицы рабочей силы, имеющей τ лет профессионального образования, по сравнению с единицей рабочей силы, имеющей общее образование. Данную функцию $hpi(t)$ можно описать с помощью линейных, показательных, логарифмических и других зависимостей.

На основе указанных выше условий можно построить математическую модель в при-

ложении к исследованию смены технологических укладов по S -образной закономерности, где инвестиции в смену технологических укладов можно осуществить в отношении следующих этапов (рис. 1):

- накопления за счет сокращения удельного потребления до минимально допустимого уровня c , отдачи от вложений в новый способ еще нет, поэтому в этих условиях действует только старый способ;

- отдачи накоплений, когда накопления старого способа, инвестированные в новый, начинают давать отдачу, старый способ при этом постепенно прекращает накопления для нового, а новый способ осуществляет накопления для себя (без лага);

- завершения переходного процесса, когда полностью закончен ввод фондов нового способа (технологического уклада) за счет накопления средств старого способа (предшествующего технологического уклада), далее новый способ производства развивается за счет собственных инвестиций.

Переходный процесс заканчивается, как только фонды нового способа (технологического уклада) смогут поглотить все трудовые ресурсы L .

Пятый технологический уклад, как выше уже было отмечено, в первую очередь связан с широким использованием в производстве компьютерной техники, обеспечивающей переработку производственной информации и выработку необходимых регулирующих воздействий в реальном времени, задаваемом физическими, химическими или биологическими особенностями технологического процесса создания продукции. При этом уровень развития компьютерных технологий определяется степенью сопряженности звеньев переработки вещества, энергии и информации в непрерывном технологическом процессе.

Пятый технологический уклад активно генерирует создание и непрерывное совершенствование не только компьютеров и информационных технологий, но и

- новых машин и оборудования на их основе (мехатронного оборудования, промышленных роботов, обрабатывающих центров нового поколения, различного рода контроллеров, автоматов и т. п.),

- информационных систем (баз данных, локальных и интегральных вычислительных систем, информационных языков и программных средств переработки информации), содержащих описание продуктов и алгоритмов реализации многочисленных технологи-

ческих процессов и выражающих семантическую (обозначающую) функцию информации.

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СМЕНЫ ПОКОЛЕНИЙ ТЕХНИКИ В РАМКАХ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УКЛАДОВ

Проиллюстрируем сказанное о смене поколений техники и технологий при переходе к новому технологическому укладу путем построения закономерностей развития металлообрабатывающих станков (рис. 2–4) и смены их поколений при переходе от четвертого к пятому технологическим укладам [7]. На этих S -образных зависимостях (рис. 1) F приобретает смысл наибольшей производительности, которая в свою очередь зависит от максимальных допускаемых скоростей обработки и частоты вращения шпинделя станка (n_{\max}).

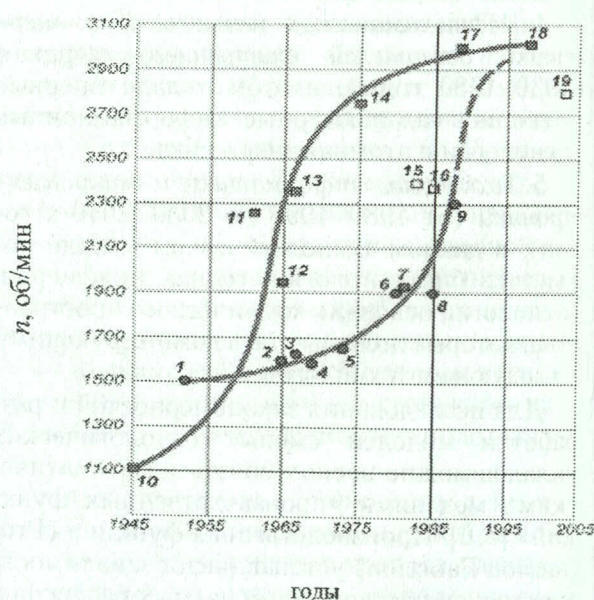


Рис. 2. S -образные закономерности развития шлифовальных станков (Модельный ряд шлифовальных станков 5-го типоразмера: 3153; 3E153; 3B153Y; 3M152B; 3B153Y; 3M153; 3M153Y; 3M153A; 3M153E; 2-го типоразмера: 3B12; 3E12; 3B12; 3K12; 3K12M; 3Y12YA; 3Y12BPF11; ВШ-152PB; BNKK)

Из рис. 2 можно сделать выводы о том, что рассматриваемые шлифовальные станки 5-го типоразмера на нижней линии регрессии (\circ) по показателю максимальной частоты вращения шпинделя (n_{\max} , об/мин), который характеризует предельно возможные скоростные характеристики станка, пока еще не достигли уровня высоких технологий (пунктирный участок линии), а станки 2-го типоразмера (\square) находятся в верхней части S -образной

кривой, что требует выполнения НИОКР, направленных на разработку «критических технологий» шлифования и смены на этой основе поколений таких шлифовальных станков.

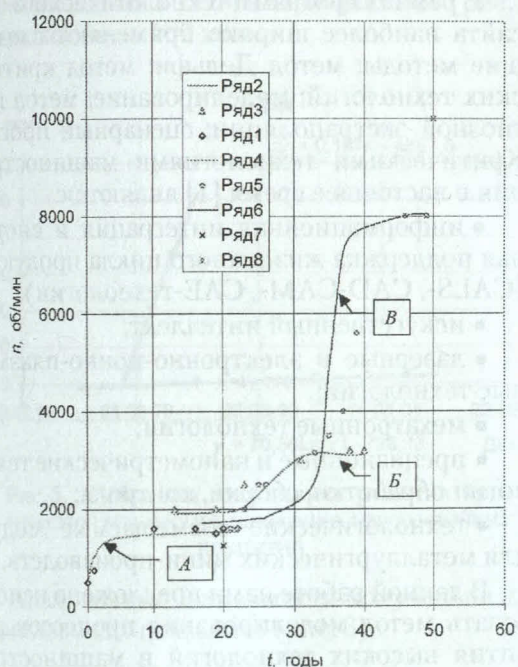


Рис. 3. S-образные закономерности смены поколений токарных мехатронных станков: А) ряд 1 – универсальные токарные станки, работающие преимущественно по силовой схеме резания (ряд 2 – функция); Б) ряд 3 – быстроходные токарные универсальные станки (ряд 4 – функция); В) ряд 5 – станки с ЧПУ и мехатронные токарные станки (ряд 6 – функция); t , годы (0 – 1950; 10 – 1960; 20 – 1970; 30 – 1980; 40 – 1990; 50 – 2000). Примечание: в 7 ряду в 2003 году появился только один станок нового поколения (ряд 8 – эмпирическую функцию по одной точке провести не представляется возможным)

S-образная кривая каждого поколения станков является внешней эмпирической огибающей линией множества точек в случае (рис. 3) появления первых моделей серийных токарных станков. Внутри этой области находятся модификации токарных станков с несущественно улучшенными показателями конкурентоспособности по показателям качества и технического уровня. Например, производными моделями от токарно-винторезного станка модели 1К62 являются: токарные станки моделей 16К20 ($n_{\max} = 1600 \text{ мин}^{-1}$), 16К20 ВФ1 ($n_{\max} = 1600 \text{ мин}^{-1}$), SN500S (Словакия, $n_{\max} = 1600 \text{ мин}^{-1}$), КА-280 («Веркон», Украина, $n_{\max} = 1600 \text{ мин}^{-1}$), «Энтерпрайз» (Индия, $n_{\max} = 1600 \text{ мин}^{-1}$) и т.д., которые производились до конца XX века. Эти станки в конце XX века вследствие их более низкой конкурентоспособности

по параметрам технического уровня и качества были ориентированы на сбыт не столько для основного производства серийных заводов, сколько для вспомогательных производств машиностроительных заводов, на ремонтные предприятия и другие производства с низким техническим уровнем. Задачи инноватики, смены технологических укладов делают такие станки малопривлекательными для технического перевооружения основного производства на современных машиностроительных заводах, которые формируют 5-й технологический уклад.

На основании данных рис. 3 можно сделать выводы о том, что в настоящее время наибольшую производительность обработки в рамках скоростной схемы резания обеспечивают мехатронные станки. К этому можно добавить, что уже появились первые мехатронные станки нового поколения, работающие в режиме высокоскоростной обработки, с использованием метода твердого точения, использующие направляющие качения, в их конструкции применяют синтегранитан, ограждение кабинетного типа, регулируемый привод главного движения и подачи, автоматическое переключение редуктора главного привода, встроенные промышленные компьютеры и другие новации.

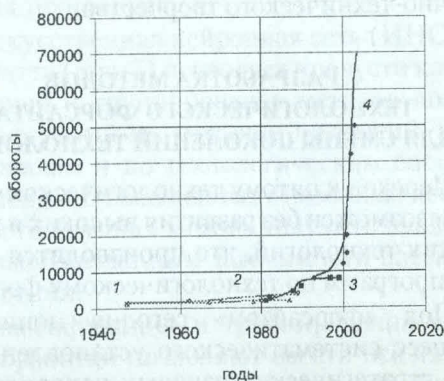


Рис. 4. Закономерности смены поколений мехатронных станков сверлильной и фрезерной групп: 1 – сверлильные станки, $n_1 = 550 \arctg(t - 1969) + 2600$; 2 – фрезерные станки, $n_2 = 200 \arctg(t - 1972) + 1800$; 3 – обрабатывающие центры 5-го поколения, $n_3 = 2100 \arctg(t - 1988) + 5000$; 4 – обрабатывающие центры 6-го поколения, $n_4 = 25000 \arctg(t - 2002) + 45000$

Аналогичные данные можно проиллюстрировать и для станков сверлильной и фрезерной групп (рис. 4), где более наглядно просматривается формирование новой S-образной кривой мехатронных сверлильно-фрезерных станочных комплексов нового поколения.

Обобщая изложенное о применении научных законов инноватики к исследованию закономерностей смены поколений металлорежущих станков, которые иллюстрируют важные преимущества мехатронных станочных систем для технического перевооружения машиностроительного производства, можно отметить следующее.

Рассмотренные эмпирические закономерности и зависимости позволяют:

- строить математические модели типа Фишера–Прая, Гомпертца, Морриса, логистические функции и другие, известные из инноватики аналитические зависимости для прогнозирования развития мехатронных станков;
- применять на этой основе методы технологического форсайта для разработки «критических технологий», в том числе кросс-ковариационные функции Парзена, Фурье-анализ и другие методы, используемые в инноватике для обеспечения непрерывного научно-технического прогресса в механообработке;
- определять пути развития мехатронных станков и технологий на их основе с использованием известных из инноватики закономерностей патентной статистики, методов решения изобретательских задач, методов научно-технического творчества.

4. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ФОРСАЙТА ДЛЯ СМЕНЫ ПОКОЛЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЙ

Переход к пятому технологическому укладу невозможен без развития высоких и критических технологий, что производится в рамках программ по технологическому форсайту.

Под «форсайтом» сегодня понимается процесс систематического установления новых стратегических научных направлений и технологических достижений, которые в долгосрочной перспективе смогут серьезно воздействовать на экономическое и социальное развитие страны.

До начала 90-х годов форсайт или его элементы использовали только четыре страны — Япония, США, Германия и Австрия, к 2001 г. их число достигло 29. Сегодня этот механизм взят на вооружение не только в Западной Европе, США и Японии, но и в ряде развивающихся стран и государств с переходной экономикой (в частности, в Венгрии, Чехии, Польше). Наиболее широкое распространение он получил в странах Западной Европы с развитой культурой кооперационных связей между

субъектами НИОКР, которые поддерживает государство. В Великобритании, Германии и Венгрии инициаторами форсайта выступают правительства, в Швеции — деловые круги.

В рамках программ технологического форсайта наиболее широко применяют следующие методы: метод Дельфи; метод критических технологий; моделирование; метод прогнозной экстраполяции; сценарный прогноз. Критическими технологиями машиностроения в настоящее время [1] являются:

- информационная интеграция и системная поддержка жизненного цикла продукции (CALS-, CAD-CAM-, CAE-технологии);
- искусственный интеллект;
- лазерные и электронно-ионно-плазменные технологии;
- мехатронные технологии;
- прецизионные и нанометрические технологии обработки, сборки, контроля;
- технологические совмещаемые модули для металлургических мини-производств.

В данной работе нами предложено использовать метод моделирования процессов развития высоких технологий в машиностроении путем выделения моментов возникновения принципиально новой, «критической» технологии на эмпирическом поле данных «патентной статистики».

Сущность метода сводится к тому, что в области замены S -образных кривых (рис. 1, 3, 4) можно строить только участок их пересечения и получить X -образные кривые смены поколения технологий. По такой X -образной кривой можно, найдя точку пересечения, утверждать о большей перспективности одной технологии по отношению к другой, т. е. делать заключение о появлении «критической технологии», обеспечивающей решительный исход из старого способа производства. Рассмотрим такие зависимости развития критических технологий на примере технологии нанесения упрочняющих покрытий по данным патентной статистики для классов изобретений на новые способы: С 23 С 16/00–22/00 и С 23 С 14/00–15/00.

Получаем X -образную зависимость (рис. 5) развития принципиально различных способов нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент для условий нанесения нитрида титана (TiN) в качестве материала покрытия.

Из графика видно, что, начиная с середины 1975 года вакуумная химико-термическая обработка (■) для больших величин толщины износостойкого покрытия начинает су-

щественно превосходить ионно-плазменную технологию (◇) и становится по отношению к ней «критической». Вместе с тем ионно-плазменные технологии являются критическими по отношению к гальванопокрытиям (рис. 6) в диапазоне до 100 мкм.

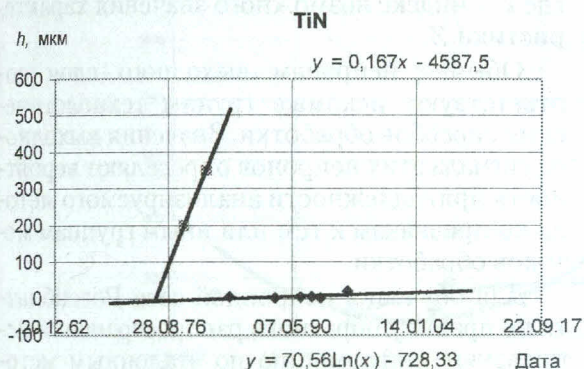


Рис. 5. X-образная зависимость развития критических технологий нанесения износостойких покрытий

Аналогичные зависимости получены и для комплексных покрытий (рис. 6).

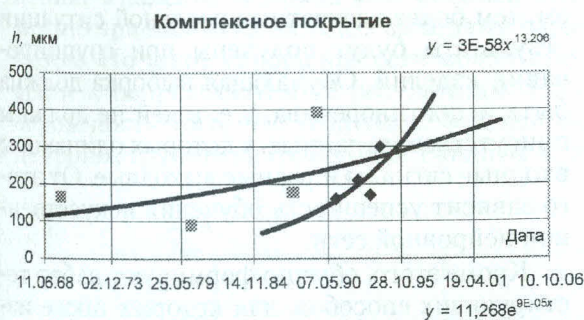


Рис. 6. X-образная зависимость получения комплексного покрытия

Новый метод выявления критических технологий на основании определения закономерностей патентной статистики отличает:

- большая достоверность в сравнении с «дельфийским методом», так как он основывается не на мнении экспертов, а на статистическом материале;
- простота в сравнении с использованием «кроссковариационных функций Парзена» и Фурье-анализа, которые требуют применения более сложного математического аппарата по полной статистике S-образных закономерностей развития технологий.

Разработанный метод можно применять к различным технологиям. Он позволяет делать адекватные выводы о принадлежности технологии к категории «критических», а также давать достаточно достоверный прогноз

развития той или иной технологии в рамках технологического форсайта.

5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И МЕТОДОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ КРИТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

В предыдущих выпусках журнала [8] мы уже публиковали результаты работ по новой нейросетевой САИР технологического перевооружения авиадвигателестроительного производства. Эти исследования, ориентированные на разработку инновационных проектов технического перевооружения производства, основаны на широком применении средств искусственного интеллекта в виде искусственных нейронных сетей оригинальной архитектуры. Они обеспечивают многокритериальную оптимизацию проектных и перспективных технологических процессов машиностроительного производства. В данной публикации в развитие названных работ продемонстрированы возможности использования искусственных нейронных сетей Розенблатта для определения основных направлений выполнения НИОКР по созданию критических технологий.

Искусственная нейронная сеть (ИНС) Розенблатта (рис. 7) позволяет провести классификацию и группирование методов получения покрытий по толщине покрытий, по их материалам и по технологическим способам получения. В выделенных с помощью нейронной сети группах можно получить аналогичные вышеназванным зависимости патентной статистики.

Классификация и группирование способов обработки позволяют свести все их многообразие к конечному числу групп, для которых могут быть выявлены зависимости, что необходимо для технологического прогнозирования развития новых способов обработки и выполнения НИОКР и опытно-технологических работ по их созданию. Назовем такой процесс первичным группированием. Необходимость в таких способах в данном случае упрочняющей обработки в настоящее время возросла вследствие усложнения режимов работы тяжелонагруженных деталей машин и необходимости технологического обеспечения их долговечности и надежности. На основе вышесказанного, применение большинства существующих методов обработки приведет либо к значительному увеличению трудоем-

кости, либо не даст требуемого эффекта при решении названных задач.

В данной разработке принято условное разбиение применяемых материалов покрытий по следующим категориям:

- упрочняющих покрытий,
- коррозионно-стойких покрытий,
- покрытий, работающих в условиях высоких температур.

Применение сети Розенблатта, состоящей из 4 слоев (включая 2 скрытых слоя), показало наилучшие результаты для всех элементов обучающего множества. Количество нейронов второго скрытого слоя принято равным их количеству в первом слое.

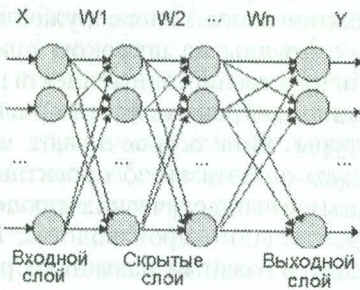


Рис. 7. Искусственная нейронная сеть Розенблатта: X — множество входных сигналов; W_i — множество весовых коэффициентов взаимосвязей между i -м и $(i + 1)$ -м слоями нейронов; Y — множество выходных сигналов

Особенностью нейронных сетей Розенблатта является то, что первый слой нейронов не производит вычислений, а только распределяет вектор входных сигналов на нейроны скрытого слоя, т. е. для нейронов входного слоя $X = Y$. При этом все компоненты множества весовых коэффициентов W_1 равны 1. Входными параметрами сети приняты такие признаки, как толщина, материал покрытия и способ обработки.

При наличии в качестве признаков классификации неколичественных характеристик при кодировании можно использовать два подхода.

1) Для каждой из характеристик во входном слое ИНС резервируют число нейронов, равное количеству возможных значений рассматриваемой характеристики. Для конкретного метода с i -м значением характеристики у таких нейронов только входной сигнал x_i будет равен 1, а остальные будут нулевыми.

2) Каждой неколичественной характеристике соответствует один нейрон. Единичный отрезок разбивается на $n-1$ частей, где n — количество возможных значений конкретной характеристики. Каждому значению характе-

ристики ставится в соответствие число в интервале $[0,1]$ по формуле

$$Z_i = \frac{i-1}{n-1}, \quad (4)$$

где i — индекс возможного значения характеристики Z .

Обычно нейронам выходного слоя соответствуют искомые группы технологических способов обработки. Значения выходного сигнала этих нейронов определяют вероятность принадлежности анализируемого метода по признакам к тем или иным группам методов обработки.

Для обучения нейронной сети Розенблатта по правилу обратного распространения используют информацию по эталонным методам, для которых априори известна принадлежность к соответствующим группам. В обучающей выборке необходимо иметь приблизительно одинаковое количество представителей всех групп. Объем обучающей выборки определяют в зависимости от конкретных условий группирования: чем больше ее объем, тем более адекватные реальной ситуации результаты будут получены при группировании изделий. Обучающая выборка должна быть непротиворечива, т. е. в ней не должны присутствовать данные, у которых одинаковы входные сигналы и разные выходные. От этого зависит успешность обучения искусственной нейронной сети.

Кроме этого, обычно формируют набор тестирующих способов, для которых также известна их принадлежность к группам методов. По результатам группирования деталей тестировочной выборки с помощью обученной искусственной нейронной сети Розенблатта осуществляется проверка адекватности выбранной модели. Обычно размер тестирующей выборки в три-четыре раза меньше обучающей.

Обучение ИНС Розенблатта означает минимизацию некоторого функционала несоответствия (ошибки) между выходными сигналами сети и сигналами, которые требуется получить. После обучения ИНС Розенблатта способна определять наиболее предпочтительное разбиение способов получения покрытий на группы по заданным признакам.

Специальная программа, которая использовалась при обучении, показала, что для данной обучающей выборки возможно сокращение числа нейронов скрытых слоев и числа связей между нейронами — синапсов. Одной

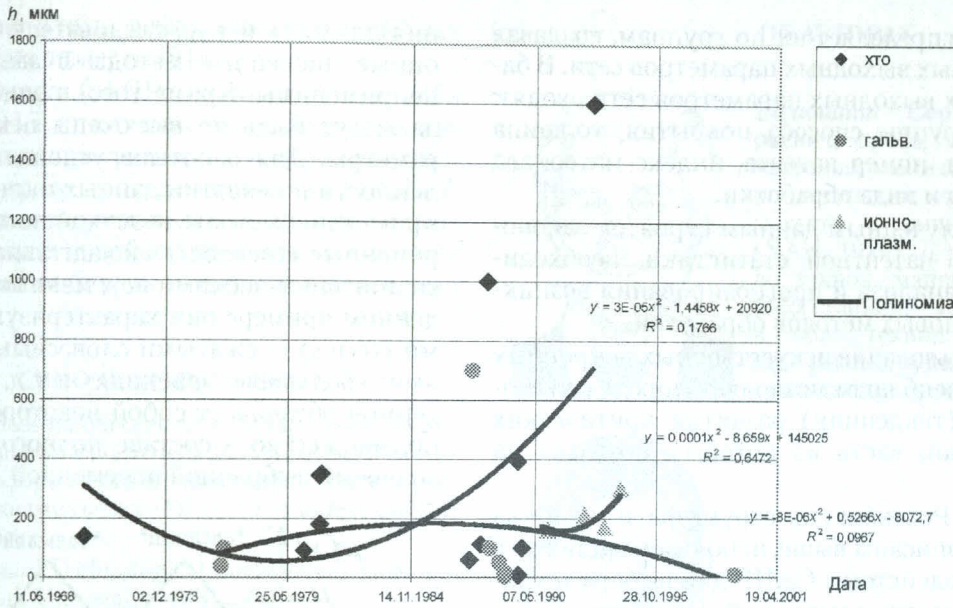


Рис. 8. Эмпирические модели закономерностей патентной статистики для методов получения покрытий из нескольких различных материалов

из целей, которые преследуются при разработке искусственных нейронных сетей, является уподобление работы сети процессу мышления. Удаление нейрона или синапса возможно при малом их вкладе в выходные параметры. Но такое упрощение сети может привести к непредсказуемым результатам. Есть вероятность того, что отдельные удаленные нейроны, группы нейронов или синапсы при

подаче на вход сети параметров, не входящих в обучающую выборку, могут значительно влиять на выходные сигналы сети. Поэтому подобное упрощение сети на данном этапе разработки нежелательно.

Нейронная сеть, описанная выше, реализована в виде программного продукта, разработанного в среде Delphi 6. Программа, использующая базу данных входных параметров ме-

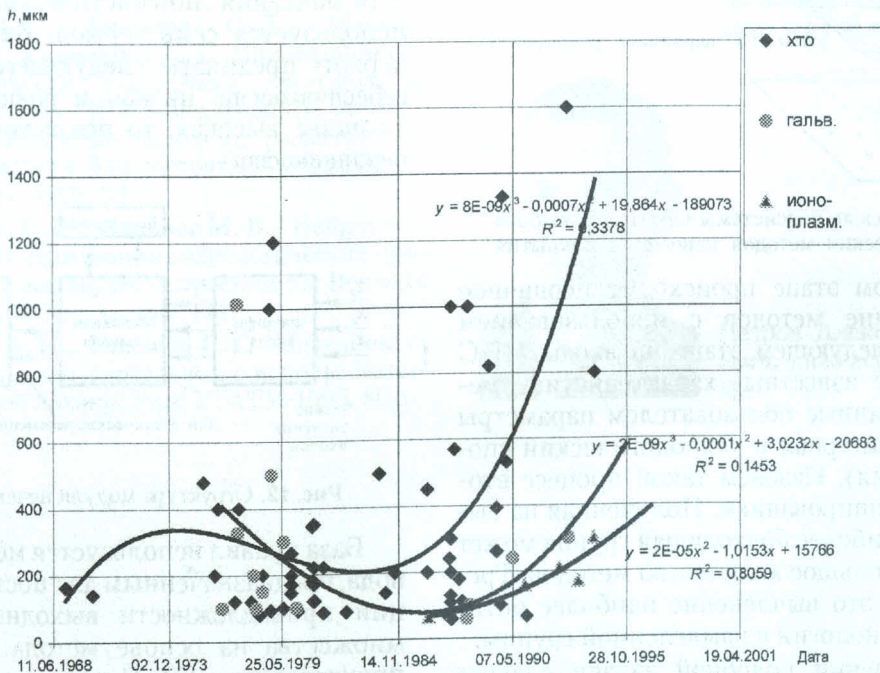


Рис. 9. Эмпирические модели закономерностей патентной статистики для методов получения покрытий толщиной свыше 100 мкм

тодов, распределяет их по группам, создавая базу данных выходных параметров сети. В базу данных выходных параметров сети входят: индекс группы способа покрытия, толщина покрытия, номер патента, индекс материала покрытия и вида обработки.

По полученным данным строятся закономерности патентной статистики, необходимые для анализа и прогнозирования возникновения новых методов обработки.

Использование искусственных нейронных сетей Розенблатта позволяет определять поведение (тенденции) развития критических технологий, часть из которых показана на рис. 8, 9.

ИНС Розенблатта, структура и свойства которой описаны выше, использована также в рамках подсистемы САПР для выбора технологии нанесения покрытий. Подобная задача решается поэтапно и может быть представлена в виде модели, изображенной на рис. 10.

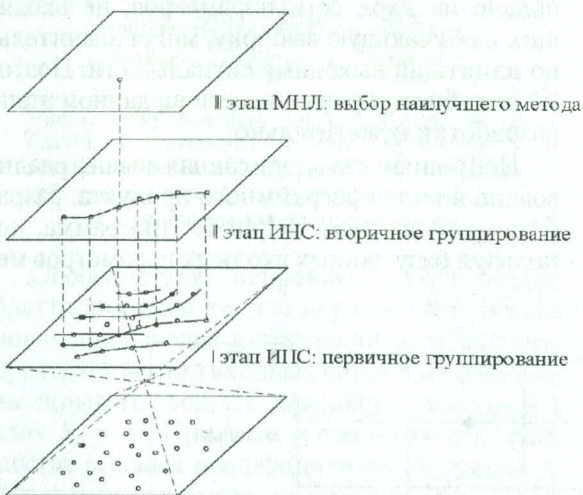


Рис. 10. Модель подсистемы САПР для выбора технологических методов нанесения покрытия

На первом этапе происходит первичное группирование методов с использованием ИНС. На следующем этапе на входы ИНС подаются не известные характеристики методов, а заданные пользователем параметры (толщина, материал и технологический способ покрытия). Назовем такой процесс вторичным группированием. Полученная на выходе сети наиболее подходящая группа может содержать большое количество методов. Третий этап — это вычленение наиболее оптимальной технологии из выделенной группы.

При решении подобной задачи следует учесть, что описание метода может содержать как численные, так и словесные характеристики, например: «большая твердость», «сред-

няя адгезия» и т. д., следовательно, традиционные численные методы в данном случае неприменимы. Кроме того, в описание метода могут быть не включены некоторые параметры. Для работы в условиях неопределенности и нехватки данных в данном случае применены методы нечеткой логики [9]. Переменные «твердость» и «адгезия» называются лингвистическими переменными. В приведенном примере они характеризуются термами (terms) — сжатыми словесными описаниями: «большая», «средняя» и т. д. Каждый из термов обозначает собой некоторое нечеткое подмножество в составе полного множества значений выбранной переменной X_i (рис. 11).



Рис. 11. Функция принадлежности нечеткого множества

Структура модуля нечеткой логики (МНЛ) представлена на рис. 12. Блок фаззификации преобразует численные входные параметры X_i в лингвистические переменные с соответствующей функцией принадлежности $\mu_i(x)$. Словесные описания принимаются с максимальной функцией принадлежности. Для описания лингвистических переменных используется семь термов. База правил содержит предикаты следующего вида: «Если себестоимость низкая и равномерность по толщине высокая, то покрытие высокой эффективностью».

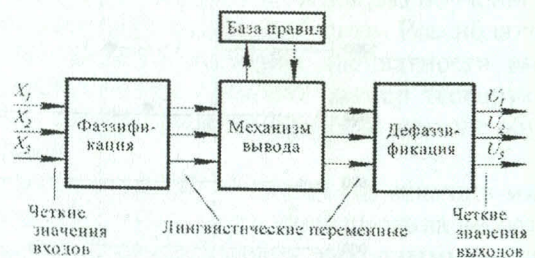


Рис. 12. Структура модуля нечеткой логики

База правил используется механизмом вывода, предназначенным для построения функции принадлежности выходного нечеткого множества на основе метода «Максимум-произведения» [9]. Переход от полученного нечеткого множества к одному четкому значению выходного параметра эффективности покрытия и называется дефаззификацией. Для

построения блока дефаззификации выбран метод центра тяжести [9].

Подсистема САПР, включающая в себя ИНС и МНЛ, описанные выше, также реализована в виде программного пакета, разработанного в среде программирования Delphi 7. Модули пакета, используя базу данных технологических способов, позволяют в диалоговом режиме выбирать технологии нанесения покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Основные** направления государственной инвестиционной политики Российской Федерации в сфере науки и технологий: Распоряжение Правительства РФ от 11 декабря 2002 г. № 1764-р.
2. **Patterns of Technological Innovation** / D. Sahal. New York University, 1981. 366 p.
3. **Эволюция** технико-экономических систем: возможности и границы централизованного регулирования / С. Ю. Глазьев, Д. С. Львов, Г. Г. Фетисов; Рос. акад. наук, Центр. экон.-мат. ин-т. М.: Наука, 1992. 207 с.
4. **Глазьев С. Ю.** Теория долгосрочного технико-экономического развития. М.: ВладДар, 1993.
5. **Клейнер Г. Б.** Производственные функции: теория, методы, применение. М.: Финансы и статистика, 1986. 239 с.
6. **Ашманов С. А.** Математические модели и методы в экономике: Учеб. пособие для вузов по спец: «Экон. кибернетика». М.: Изд-во МГУ, 1980. 199 с.
7. **Асеев В. С., Гмызова О. Л., Магасумов В. М., Селиванов С. Г.** Инновационные закономерности подготовки производства оборудования с ЧПУ и мехатронных станков // Инновационные проблемы развития машиностроения в Башкортостане: Сб. науч. тр. Уфа: Гилем, 2003. 304 с.
8. **Селиванов С. Г., Иванова М. В.** Нейросетевой метод оптимизации технологических процессов в авиадвигателестроении // Вестник УГАТУ. Т. 3, № 1. С. 134–141.
9. **Васильев В. И., Ильясов Б. Г.** Интеллектуальные системы управления с использованием нечеткой логики. Уфа: УГАТУ, 1995. 80 с.

ОБ АВТОРАХ



Селиванов Сергей Григорьевич, проф., каф. технол. машиностроения. Дипл. инж. по автоматиз. и комплексн. механиз. машиностроения (УАИ, 1970). Д-р техн. наук по технол. машиностроения (Мосстанкин, 1991). Иссл. в обл. технол. подготовки, реконструкции, теории организации производства.



Нургалиев Азат Ахатович, инженер той же кафедры.



Паньшина Ольга Юрьевна, инженер той же кафедры.



Петров Александр Николаевич, инженер той же кафедры.