

УДК 620.16.001.76

С. П. ПАВЛИНИЧ, С. Н. ПОЕЗЖАЛОВА, С. Г. СЕЛИВАНОВ

МЕТОД СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ РАЗВИТИЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Разработаны методы системного анализа и управления жизненным циклом развития, позволяющие в аналитическом виде объяснить закон смены поколений техники и технологий. Сформулирован закон гомеостазиса и рассмотрены статистические применения этого закона к анализу устойчивости развития систем. Установлены S -образные закономерности, объясняющие известные логистические зависимости распространения инноваций. Также приведен перечень критических технологий машино- и приборостроения. *Системный анализ ; авиационная техника и технологии ; инновации ; анализ устойчивости развития систем*

Известно, что инноватика изучает научные законы, закономерности, зависимости, взаимосвязи, факты и явления, связанные с формированием и распространением новшеств на основе целенаправленной организации инновационной деятельности, использования научных методов, средств моделирования и технологий. Инноватика — это не только особая отрасль науки, но и ее инструмент, который обеспечивает превращение всех фундаментальных и прикладных наук в действенную производительную силу общества.

С помощью инноватики наука оказывает прямое воздействие на все сферы человеческой деятельности в единой цепочке преобразования научных знаний в определенные ценности: фундаментальные исследования → поисковые научно-исследовательские работы (НИР) → прикладные НИР → прикладные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР) → технологии → производство → рыночная реализация.

Сущность таких новых свойств, создаваемых человеком систем (новаций), можно пояснить путем описания жизненного цикла развития (онтогенеза) любой технологической (технической) системы (рис. 1).

Для описания этапов развития: Z_t — зарождения технической системы; $P_{и,t}$ — интенсивного развития технической системы до точки перегиба на восходящей ветви кривой; $P_{д,t}$ — дефлирующего развития технической системы после названной точки перегиба до стадии ее стагнации — C_t , можно использовать S -образные кривые развития технической системы, которые характеризуют

улучшение главных параметров технического уровня и/или качества (F). Такое математическое моделирование позволяет утверждать, что в точке перегиба S -образной закономерности при переходе от стадии интенсивного развития в стадию дефлирующего развития желательно приступить к началу научно-исследовательских работ (НИОКР) по переходу к новой S -образной кривой развития, основанной на применении в анализируемой технической (технологической) системе нового принципа действия. Данное решение позволяет осуществить профилактические меры, которые не допускают переход технической системы в стадии стагнации — C_t , последующей деградации — D_t и гибели — Γ_t .

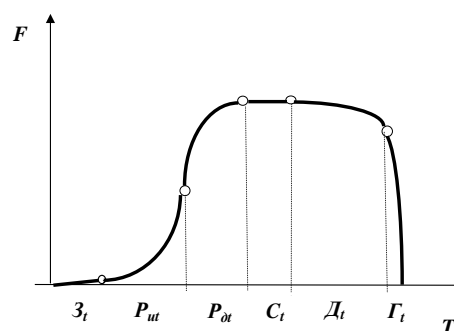


Рис. 1. Этапы и стадии жизненного цикла системы. T — системное время; F — главный параметр целевой функции

Для описания заключительного этапа жизненного цикла — деградации и гибели системы — может быть использована математическая теория катастроф. Катастрофами в их математическом представлении принято называть скачкообразные изменения главного параметра системы F в ответ на плав-

ные, малозаметные изменения критерия целевой функции или параметров функционирования. Примерами катастроф могут быть не только гибель кораблей из-за потери устойчивости, разрушение зданий при землетрясениях, но также банкротство предприятия из-за низкой конкурентоспособности производимой продукции или существенного уменьшения объемов ее производства и продаж.

Таким образом, воспользовавшись вытекающими из естественнонаучного закона онтогенеза S -образными кривыми развития технологических систем для разработки системотехнических принципов инноватики, можно осуществить проекцию их действия на проявление закона гомеостазиса (устойчивости) систем. Закон гомеостазиса формулирует граничные условия существования системы (целесообразного единства целостности, устойчивости состава и свойств, их динамического постоянства).

Закон гомеостазиса можно сформулировать следующим образом: системы, эффективно мобилизующие свои ресурсы на поддержание равновесия или целенаправленного движения при возникновении внешних и внутренних возмущающих воздействий, — устойчивы. Способность системы оставаться в названной области значений параметров состояния нередко называют живучестью системы, а приспособляемость к изменениям во внешней среде на основе изменения структуры или функции системы называется адаптацией. Адаптация — это один из критериев самосохранения в случае потери устойчивости. Формой приспособления системы к изменению условий ее функционирования во внешней среде является развитие. Критерии адаптации развивающейся системы характеризуют не только ее приспособленность к изменению своей структуры или функционирования в изменяющихся условиях, но также наличие резервов и ресурсов для таких перестроек. Такие резервы таят в себе:

- различные способы модификации систем в целях улучшения главных параметров конкурентоспособности, технического уровня или качества в рамках постоянного принципа действия такой системы;
- более прогрессивные принципы действия систем, которые основаны на новых физических, химических и других эффектах, их использование приводит к смене поколений техники и технологий, технологических укладов, форм организации технологий и к другим масштабным инновациям.

Модификация 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. 2). Если такие изменения не выходят за пределы определенной «трубки траекторий», то мы вправе констатировать устойчивое развитие системы.

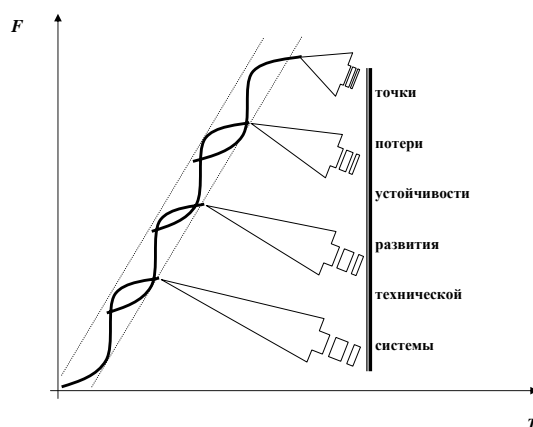


Рис. 2. Трубка траекторий устойчивого развития системы

Критерий устойчивости любой системы можно определить по Ляпунову [5] следующим образом: «Если хотя бы одно движение системы (изменение ее параметров состояния — p_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 (p_i) — это векторы главной целевой функции развивающейся технической (технологической) системы F в виде параметров, например, ее технического уровня и качества.

Анализ изменения целевой функции технологической системы в границах «трубки траекторий», ее устойчивого развития характеризует волновую динамику ее роста (рис. 2). Этот факт очевиден в рамках общей теории систем (системотехники), т. е. при использовании научного метода дедукции, когда частные положения логически выводят из общих положений научных законов или принципов. Но явления волновой динамики в прошлом веке были совершенно неочевидными в приложении к разработке методов развития технических систем, когда использовали научные методы индукции, т. е. основанные на умозаключениях выводы, которые следуют от единичных случаев к общему выводу, от отдельных фактов — к обобщениям.

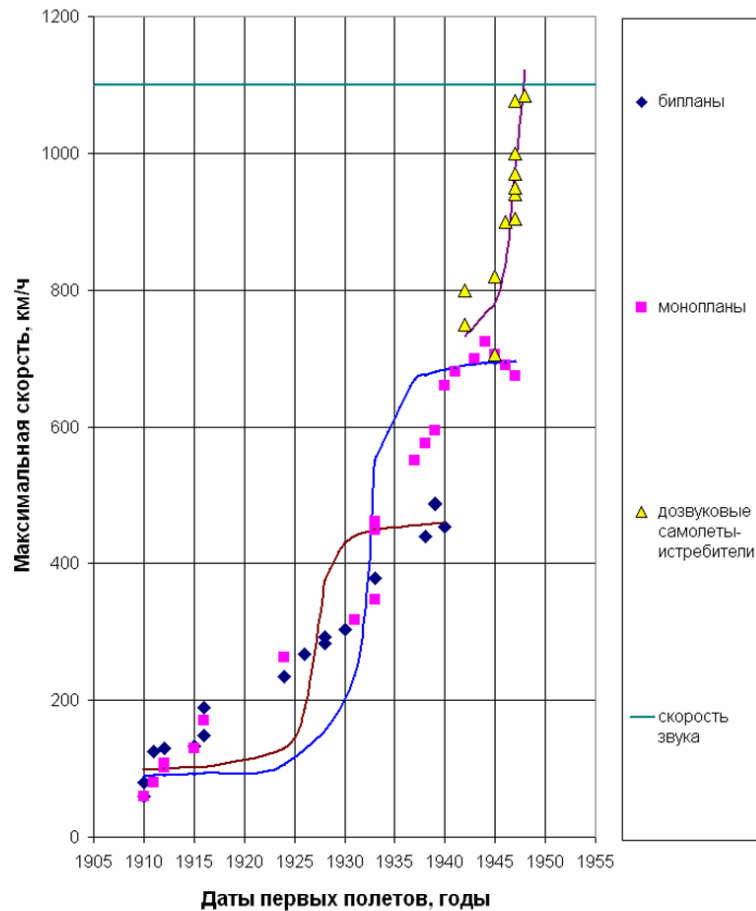


Рис. 3. Закономерности смены поколений дозвуковых самолетов-истребителей. (1 — самолеты-бипланы с поршневыми двигателями; 2 — самолеты-монопланы с поршневыми двигателями; 3 — реактивные дозвуковые самолеты-истребители)

Рассмотрим статистические применения закона гомеостазиса к анализу устойчивости развития авиационной техники и технологий (рис. 3, 4) [6].

Из анализа S-образных кривых смены поколений рассмотренной техники можно сделать выводы о необходимости начала выполнения НИОКР для разработки принципиально новой конструкции или модернизации (модификации) существующей техники, если ее научно-технический потенциал еще не исчерпан.

Для других типов изделий основными критериями технического уровня могут быть иные показатели, например, для авиационных двигателей — это тяга (рис. 5) [6].

Анализируя данные рис. 4, 5, важно отметить, что для смены поколений авиационной техники нередко требуется радикальное обновление базовых технологий ее изготовления. Базовые технологии изготовления изделий авиационной техники отличает от других важных технологий (высоких, критических, проектных, перспективных, директив-

ных, типовых и групповых, стандартных, рабочих технологических процессов) комплексная увязка не только технологических процессов основного, но и вспомогательного производства. Так, например, базовые технологии постановки на производство новой авиационной техники на основе бесплазовой увязки деталей и технологической оснастки летательных аппаратов [4] обеспечивают на основе разработки автоматизированных систем технологической подготовки производства и математического моделирования объектов и процессов производства не только многократное снижение погрешностей изготовления: формблоков с 0,8 до 0,26 мм; пуансонов с 2,2 до 0,26 мм; рубильников с 2,0 до 0,7 мм, в сравнении с плазово-шаблонным методом, но и широкое применение станков с ЧПУ путем разработки управляющих программ на основе аналитических методов задания обводов самолетов, использования координатографов и других высокоавтоматизированных средств технологической подготовки производства.

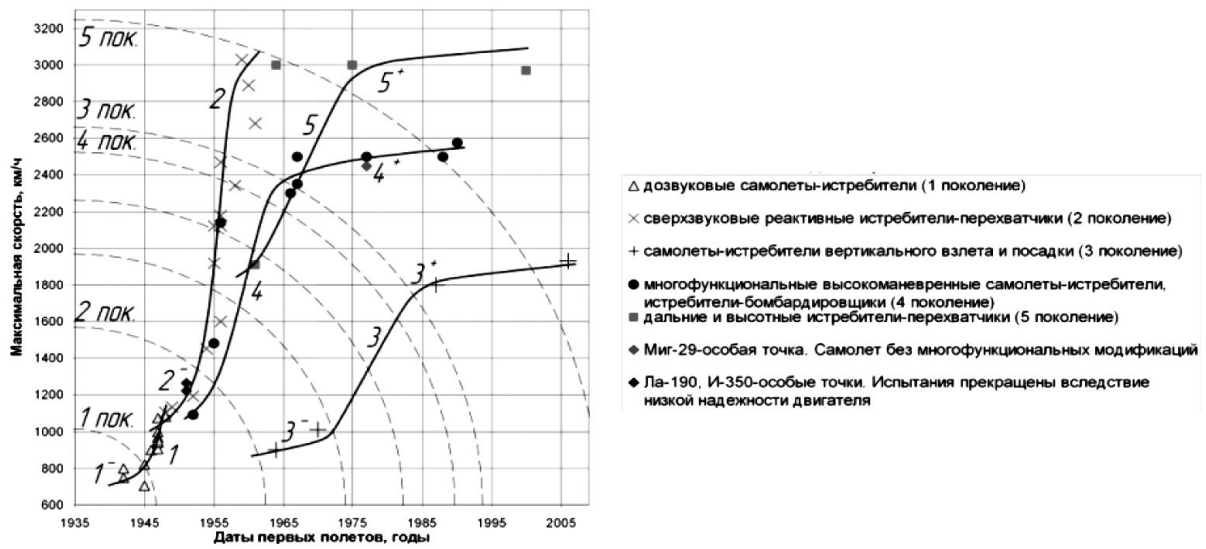


Рис. 4. Закономерности смены поколений сверхзвуковых самолетов-истребителей

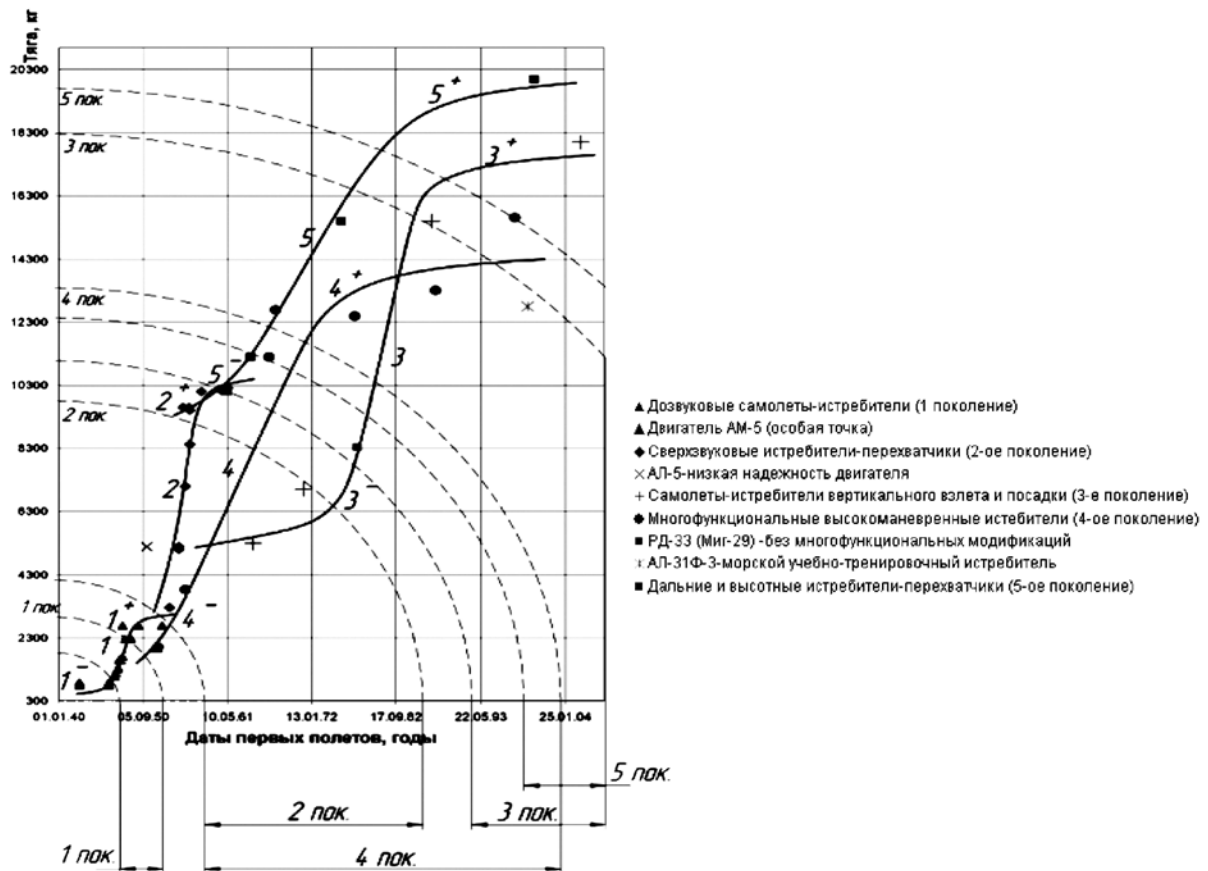


Рис. 5. S-образные закономерности развития авиационных двигателей для сверхзвуковых истребителей различных поколений в сравнении с двигателями дозвуковых самолетов-истребителей первого поколения

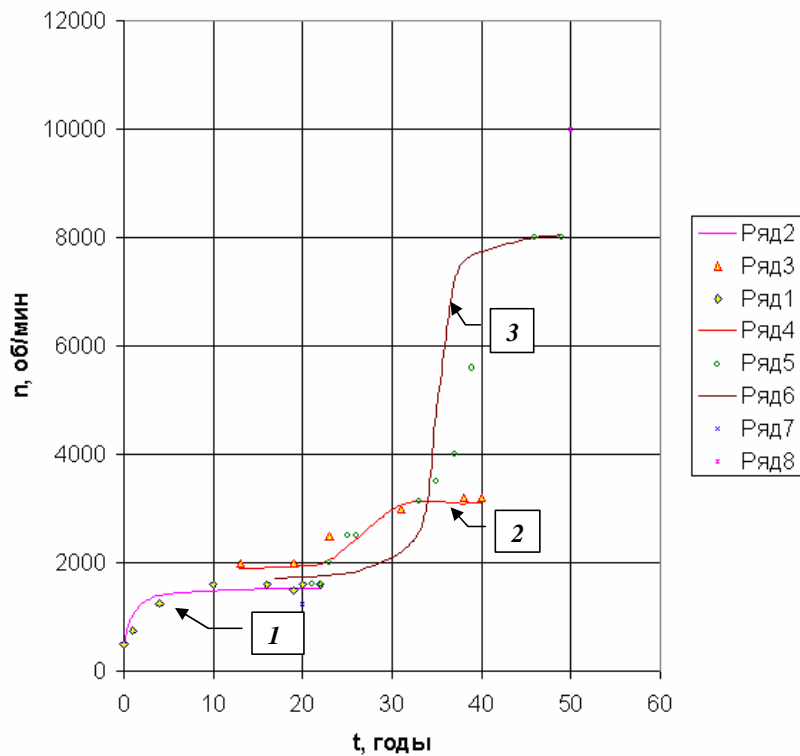


Рис. 6. S-образные закономерности смены поколений токарных станков. Условные обозначения: ряд 1 – универсальные токарные станки, работающие преимущественно по силовой схеме резания (2 ряд – функция); ряд 3 – быстроходные токарные универсальные станки (4 ряд – функция); ряд 5 – станки с ЧПУ и мехатронные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

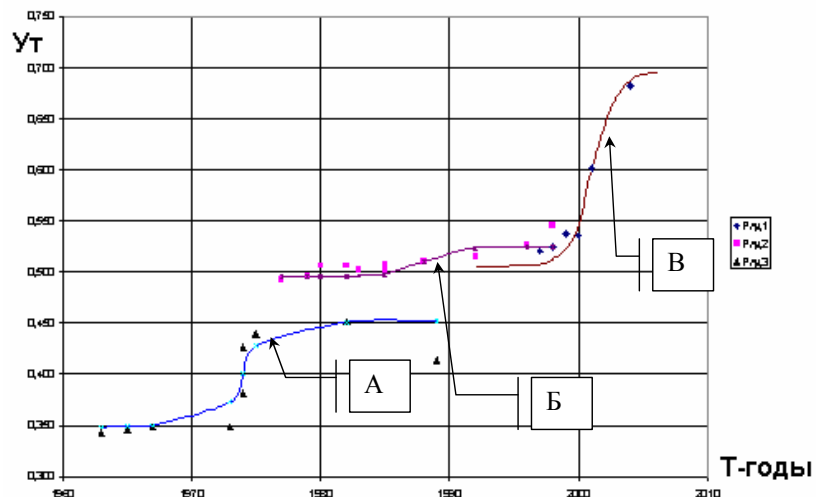


Рис. 7. S-образные закономерности смены поколений расточных мехатронных станков по обобщенному показателю технического уровня ($Y_T = \varepsilon_{\Sigma I}$): А) ряд 1 – универсальные расточные станки и станки с позиционной СЧПУ; Б) ряд 2 – быстроходные расточные станки с контурной СЧПУ; В) ряд 3 – расточные станки с контурной СЧПУ и мехатронные обрабатывающие центры с горизонтальной компоновкой шпинделя

Таблица 1

Перечень критических технологий машино- и приборостроения

Кластеры	Основной перечень критических технологий
Информационно-телекоммуникационные технологии управления	а) общие информационные технологии автоматизированного управления (высокопроизводительные вычислительные системы, компьютерное моделирование, искусственный интеллект, информационная интеграция и системная поддержка жизненного цикла продукции (CAD-, CAM-, CAE-, CALS-технологии), информационно-телекоммуникационные системы, распознавание образов и анализ изображений); б) технологии создания интеллектуальных систем навигации и управления; технологии распределенных вычислений и систем; технологии производства программного обеспечения; биоинформационные технологии.
Космические технологии	авиационная и ракетно-космическая техника с использованием новых технических решений, технологии высокоточной навигации и управления движением, космические технологии.
Критические производственные технологии общего назначения для инновационного проектирования	а) прецизионные и нанометрические технологии обработки, сборки, контроля, технологии на основе сверхпроводимости, мехатронные технологии, лазерные и электронно-ионно-плазменные технологии; б) технологии элементной базы микроэлектроники, наноэлектроники и квантовых компьютеров, опто-, радио- и акустоэлектроники, оптической и СВЧ-связи; в) технологии новых материалов — технологии керамических и стекломатериалов, полимеров и композитов, металлов и сплавов со специальными свойствами, синтетических сверхтвердых материалов, материалов для микро- и наноэлектроники, технологические совмещаемые модули для металлургических мини-производств, нанотехнологии и наноматериалы; технологии создания и обработки полимеров и эластомеров; технологии создания и обработки кристаллических материалов со специальными свойствами, технологии создания композиционных и керамических материалов; г) технологии атомной и водородной энергетики; технологии возобновляемых источников энергии; технологии создания энергоэффективных двигателей и движителей для транспортных систем; технологии создания энергосберегающих систем
Специальные критические промышленные технологии для инвестиционного и инновационного проектирования технического перевооружения предприятий	а) <i>технологии композиционных материалов</i> — технологии биметаллов, термодиффузионного сращивания деталей, изготовления углерод-углеродных композиционных материалов, композитов на основе стекловолокна и полипропилена и т. д.; б) <i>технологии литейного производства</i> (литья под низким давлением, получения высокоточных отливок в формы на основе электрокорунда, литья под регулируемым давлением, технологии жидкой штамповки, технологии литья в графитовые и керамические формы, литья под электромагнитным давлением, литья методом направленной кристаллизации, литья выжиманием, литья в вакуумированные пресс-формы, плазменно-индукционной плавки, электронно-лучевой плавки, литья в вакуумно-пленочные формы, литья в замороженные формы и т. д.); в) <i>технологии обработки давлением</i> (взрывная штамповка, электровысадка, изотермическая штамповка в режиме сверхпластичности, сферодвижная штамповка обкатыванием, штамповка на термопрессах, электрогидравлическая штамповка, высокоточные порошковые технологии на пресс-автоматах и т.д.); г) <i>базовые технологии изготовления изделий</i> : проектные и директивные технологические процессы постановки на производство новой техники; технологии бесплазменной увязки деталей и технологической оснастки летательных аппаратов; технологии производства длинномерных трубных деталей на основе радиальнойковки, вакуумного ионно-плазменного азотирования, нанесения эрозионностойких покрытий магнетронным способом и т. д.; д) <i>технологии высокоскоростной обработки</i> , обеспечивающие многократное увеличение производственных мощностей предприятий (высокоскоростной: лазерной и гидроабразивной резки заготовок, обработки металлов резанием, термообработки, химико-термической обработки и гомогенизирующего отжига в условиях низкочастотных акустических воздействий, химико-термической обработки отливок в жидкофазовом состоянии, химико-термической обработки в условиях энергетической поляризации, ультразвукового и электрических полей, с использованием реагентосодержащих шаржированных материалов, лазерной химико-термической обработки; скоростного: нанесения износостойких металлоуглеродных покрытий в условиях ультразвуковых воздействий, термомодеформационного борирования, глубинного шлифования, плавки металлов и т. д.)

Таблица 2

Вид кривых замещения технологий

№	Наименование	Вид	Условные обозначения	Примечание
1.	S-образная [1] кривая Перла	$Y_t = L/1 + ae^{-(k+bt)}$	Y_t – величина переменной по временной точке t ; t – фактор времени; a, k, b – числовые параметры (константы); L – верхний предел переменной y ; e – число, основание натурального логарифма.	Черная металлургия, угольная промышленность, железнодорожный транспорт, пивоваренная промышленность Пример, для нововведения «скоростной наполнитель бутылок» $Y_t = 16/1 + e^{-(20,58+0,36t)}$
2.	Несимметричная S-образная кривая [1] Гомпертца	$y_t = k \cdot a^{b^t}$	Y_t – величина переменной по временной точке t ; t – фактор времени; a, k, b – числовые параметры (константы); e – число, основание натурального логарифма.	
3.	S-образная кривая А. Ф. Каменева [2]	$K = \frac{L}{a+e^{bc-d \cdot T}}$	L, a, b, c, d – коэффициенты, отражающие специфику изменения критерия эффективности (K) для рассматриваемого класса технологических систем; T – время в годах; e – основание натурального логарифма.	

В авиадвигателестроении такими базовыми технологическими процессами, в которых в концентрированной и комплексной формах обеспечиваются:

- параметры качества изделия (например, для авиационного реактивного двигателя по показателям роста температуры газа перед турбиной (T_r^*) и роста степени повышения давления в компрессоре (π_k^*));

- критерии эффективности технологической подготовки производства техники новых поколений на основе разработки новых технологических процессов как основного, так и вспомогательного производства, являются технологии изготовления лопаток газотурбинного двигателя.

В технологических процессах изготовления лопаток авиационных двигателей обеспечивается не только жаропрочность в обеспечение роста тяги двигателя за счет применения специальных легирующих элементов, охлаждения лопаток, применения жаропрочных покрытий, но также предусматривается возможности использования критических технологий (см. табл. 1):

- нанотехнологий и наноматериалов, нанометрических и прецизионных технологий обработки;

- мехатронных технологий;

- лазерных и электронно-ионно-плазменных технологий;

- технологий керамических материалов, композитов, металлов и сплавов со специальными свойствами, синтетических сверхтвердых материалов;

- технологических совмещаемых модулей для металлургических мини-производств;

- технологий биметаллов, термодиффузионного сращивания деталей, изготовления углерод-углеродных композиционных материалов;

- высоких технологий литейного производства (литья под низким давлением, получения высокоточных отливок в формы на основе электрокорунда, литья под регулируемым давлением, технологии жидкой штамповки, технологии литья в графитовые и керамические формы, литья под электромагнитным давлением, литья методом направленной кристаллизации, литья выжиманием, литья в вакуумированные пресс-формы, технологии плазменно-индукционной плавки, электронно-лучевой плавки, литья в вакуумно-пленочные формы, литья в замороженные формы и т. д.);

- высоких технологий высокоскоростной обработки, которые обеспечивают многократное увеличение производственных мощностей предприятий (например, а) высокоско-

ростной: лазерной и гидроабразивной резки заготовок, обработки металлов резанием, термообработки, химико-термической обработки и гомогенизирующего отжига в условиях низкочастотных акустических воздействий, химико-термической обработки отливок в жидкофазовом состоянии, химико-термической обработки в условиях энергетической поляризации, ультразвукового и электрических полей, с использованием реагентосодержащих шаржированных материалов, лазерной химико-термической обработки; б) скоростного: нанесения износостойких металлофторуглеродных покрытий в условиях ультразвуковых воздействий, термомодеформационного борирования, высокоскоростной плавки металлов, глубинного шлифования, и т. д.).

Каждый вид названных технологий, также как и авиационная техника, развивается по определенным закономерностям. Так, для описания закономерностей развития мехатронных технологий также как и в рассмотренных выше случаях можно использовать S -образные закономерности (рис. 6, 7). Основными отличиями таких закономерностей являются иные параметры критерия технического уровня (качества). В данном случае на рис. 6 показаны S -образные зависимости развития технологий высокоскоростной обработки на токарных мехатронных станках и станках с ЧПУ, а на рис. 7 показаны S -образные закономерности развития расточных мехатронных станков по комплексному критерию технического уровня (Y_T), который учитывает не только максимальную частоту вращения шпинделя для обеспечения наибольшей производительности обработки, но и другие показатели: точность, уровень автоматизации и количество выполняемых функций (разновидностей технологических переходов).

Аналитическое представление S -образных функций смены поколений рассматриваемых металлорежущих станков может быть осуществлено путем построения различных однофакторных линий регрессии, например, с использованием тригонометрических функций вида (1, 2, 3), которые использованы для аналитического описания смены поколений то-

карных станков (рис. 6):

$$n_2 = 680 \cdot \arctg(t) + 500, \quad (1)$$

$$n_4 = 400 \cdot \arctg(t - 25) + 2500, \quad (2)$$

$$n_6 = 2100 \cdot \arctg(t - 35) + 4900, \quad (3)$$

где t — год выпуска установочной серии, заданный в условных единицах.

Кроме показателей технического уровня и качества на положении новой техники и технологии относительно S -образной кривой развития сказываются и другие установленные нами ранее закономерности [3], которые обобщают научный закон смены поколений техники и технологии.

Кроме рассмотренных закономерностей развития техники, смены поколений техники и технологий инноватика использует и другие S -образные логистические¹ кривые замещения технологий, которые характеризуют распространение инноваций во времени (табл. 2).

Скорость диффузии технологии в данных случаях зависит в основном от эффективности технологической инновации: при высоких показателях эффективности на стадиях интенсивного развития диффузия происходит преимущественно на внутреннем рынке, более того, государство в этот момент может даже наложить запрет на трансферт таких технологий или экспорт высокотехнологичной продукции.

Рассмотренные выше закономерности и зависимости системного анализа и управления жизненным циклом развития авиационной техники и технологий позволяют разрабатывать специальные методы технологического форсайта² и технологического аудита³, обоснованно формировать системы научно-технологической подготовки производства новой техники, конкурентоспособной на любых рынках.

Определенные в ходе технологического форсайта различными методами технологического прогнозирования приоритеты развития технологий, результаты выполнения инновационных программ и проектов НИОКР должны как можно быстрее доходить до производства и стадий коммерциализации новых технологий. Это необходимо делать для

¹Логистика — 1) математическая логика, учение о формах мышления с применением законов математики; 2) от англ. logistics — материально-техническое снабжение.

²«Форсайт» представляет собой процесс общенационального отбора новых направлений НИОКР в целях форсирования (нагнетания) инновационной деятельности.

³Аудит от лат. *auditus* — слушание. Предусматривает независимую проверку деятельности субъекта хозяйствования, которая проводится экспертами (аудиторами) на основании контракта и/или по поручению (разрешению) государственной или другой организации, наблюдающей за хозяйственной деятельностью.

максимального сокращения инновационного цикла, быстрого занятия нового сегмента рынка в обеспечение реализации конкурентных преимуществ новой техники и/или технологий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные в данной публикации методы системного анализа и управления жизненным циклом развития авиационной техники и технологий позволяют в аналитическом виде объяснить закон смены поколений техники и технологий. Объяснение закона смены поколений техники и технологий основывается на описании отличий нескольких волн развития.

S-образные закономерности, установленные в данной публикации, позволяют объяснить известные логистические зависимости распространения инноваций, которые устанавливают, что «конкурентоспособные инновации нового поколения техники и/или технологии распространяются на рынке по логистической форме процесса коммерциализации нововведений, характеризуемого медленным стартом, последующим ускоренным распространением и завершающей фазой насыщения рынка на уровне, определяемого результативностью данной генерации новшеств».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аньшин, В. М.** Инновационный менеджмент: концепции, многоуровневые стратегии и механизмы инновационного развития : учеб. пособие / под ред. В. М. Аньшина, А. А. Дагаева. М. : Дело, 2006. 499 с.
2. **Селиванов, С. Г.** Технологическая инноватика / С. Г. Селиванов. М. : Наука, 2004.
3. **Селиванов, С. Г.** Закономерности развития мехатронных критических технологий в станкостроении / С. Г. Селиванов, А. Н. Петров,

А. А. Нургалиев // Вестник УГАТУ. 2007. Т. 9, № 1 (19). С. 67–76.

4. **Братухин, А. Г.** Современные технологии авиастроения / под ред. А. Г. Братухина, Ю. Л. Иванова. М. : Машиностроение, 1999. 832 с.
5. **Красовский, А. А.** Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. М. : Наука, 1987. С. 94–98.
6. **Баргатинов, В. А.** Крылья России. Полная иллюстрированная энциклопедия / В. А. Баргатинов. М. : Эксмо, 2007. 1072 с.

ОБ АВТОРАХ



Павлич Сергей Петрович, техн. дир. ОАО УМПО. Канд. техн. наук. Засл. машиностроитель Республики Башкортостан. Лауреат Гос. премии Республики Башкортостан в обл. науки и техники.



Поежалова Светлана Николаевна, Дипл. бак. техн. и технол. (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. высоких и критических технологий машиностроения.



Селиванов Сергей Григорьевич, проф., каф. технол. машиностр. Дипл. инж. по автоматиз. и компл. механ. машиностр. (УАИ, 1970). Д-р техн. наук по технол. машиностр. (Мосстанкин, 1991). Иссл. в обл. технол. подгот., реконстр., организ. пр-ва.