

УДК 378.147

**А. Н. Данилов**, канд. техн. наук, доц., dan@pstu.ru,

**В. Ю. Столбов**, д-р техн. наук, декан факультета прикладной математики и механики, ck@pstu.ru,  
Пермский национальный исследовательский политехнический университет

## Об одном алгоритме управления синергетической открытостью организационно-технических систем

*Рассматривается задача управления синергетической открытостью организационно-технических систем в условиях рыночной экономики. В качестве параметров управления выступают периоды перепланирования на каждом иерархическом уровне принятия решений. Показано, что повышение открытости системы требует согласованности структурных параметров на различных уровнях планирования. Приводится пример применения алгоритма при управлении открытостью системы планирования крупного промышленного предприятия.*

**Ключевые слова:** синергетическая открытость, параметры порядка, степень открытости, управление

### Введение

В критические моменты развития общества, как отмечено в работе [1], чрезвычайно важно иметь возможность прогнозирования развития ситуации. Такую возможность предоставляет синергетика, разработавшая методы нелинейного моделирования и прогноза развития сложных систем различной природы. Отличительным свойством синергетического моделирования является то, что в отличие от кибернетических и математических моделей [1], предполагающих учет, возможно, большего числа параметров и воздействий, синергетические модели оперируют одним или несколькими так называемыми параметрами порядка системы, определяющими ее поведение и развитие. При этом идея целостности модели преобладает над идеей ее полноты.

Синергетический подход применим к моделированию нелинейных процессов (планирования, организации, производства, контроля и т. д.), протекающих в организационно-технических (производственных, информационных, образовательных и т. д.) системах в переходные периоды времени. Вопросы самоорганизации сложных систем на основе синергетического подхода занимались многие зарубежные и отечественные ученые, такие как И. Пригожин [2], Г. Хакен [3], И. Стенгерс [2], Д. И. Трубецков [4], Ю. М. Горский [5], В. И. Шаповалов [6] и другие. Однако исследования этих авторов в основном посвящались физическим, социальным или информационным системам. Работ, посвященных решению важной научно-технической проблемы — развитию синергетического подхода к управлению системами масштаба крупного промышленного предприятия, практически нет, что обуславливает актуальность данных исследований.

Считается, что в условиях рыночных отношений основным критерием эффективности функционирования системы является ее конкурентоспособность на рынке товаров и услуг, определяемая соотношением между качеством и ценой продукции. Поэтому необходимо учитывать взаимосвязь между качеством и затратами на его достижение. Другими словами, лучшим является то качество, которое, с одной стороны, является приемлемым для потребителя, а с другой стороны, достигается при минимальных затратах. Это связано с тем, что рынок товаров и услуг постепенно достигает своего насыщения, и конкурентная борьба за потребителя будет продолжаться не только за счет повышения качества продукции или услуг, но и за счет одновременного уменьшения затрат на его достижение. При этом следует отметить, что под качеством здесь понимается системное свойство, включающее как качество процессов, протекающих в системе, так и качество результата функционирования системы.

Будем считать, что конкурентоспособность системы является некоторым функционалом, зависящим от ее параметров порядка. Следует отметить, что каждая система характеризуется своим набором параметров порядка на определенном промежутке времени. При этом каждый параметр порядка является некоторой агрегирующей величиной, определяющей желательное состояние системы или новое ее системное свойство.

Остановимся на тех параметрах порядка, которые, на наш взгляд, являются характерными для любой организационно-технической системы. Одним из них является гарантированное качество, понимаемое в широком смысле в рамках концепции TQM [7], направленной на удовлетворение требований потребителей товаров и услуг. Другим параметром

порядка является синергетическая открытость системы, под которой понимается способность системы быстро реагировать на внешние воздействия (запросы общества, государства и рынка) путем инновационных механизмов организации и самоорганизации. При этом надо понимать, что оба этих параметра нелинейным образом влияют на конкурентоспособность системы, причем в условиях перехода на новую парадигму развития общества эта нелинейность может быть очень существенной. Кажется, что чем выше гарантированное качество и синергетическая открытость системы, тем выше ее конкурентоспособность. Однако это далеко не всегда так. Например, известно [6], что при переходе от закрытой системы к открытой одновременно происходят процессы организации, самоорганизации и дезорганизации. Поэтому при резком повышении открытости системы процесс дезорганизации может стать доминирующим, что приведет к потере устойчивости и разрушению системы (поз. 1 на рис. 1). Наоборот, при медленном росте синергетической открытости конкурентоспособность системы можно значительно повысить за счет успешной структурной модернизации и адаптации к внешним воздействиям (поз. 2 на рис. 1). Однако оптимальная скорость повышения открытости в значительной мере зависит от особенностей системы и выделяемых ресурсов на ее модернизацию.

Поэтому возникает необходимость постановки и решения задачи управления синергетической открытостью системы на определенном периоде ее развития.

### Постановка задачи управления синергетической открытостью системы

Конкурентоспособность системы обозначим  $K$ . Тогда в момент времени  $\tau = t$  значение вектора конкурентоспособности системы  $K(t)$  в рамках основного вида деятельности можно определить как некоторый функционал  $F$  вектора процессов  $\Pi(\tau)$  в виде:

$$K(t) = F[t; \Pi(\tau), t_0 \leq \tau \leq t], \quad (1)$$

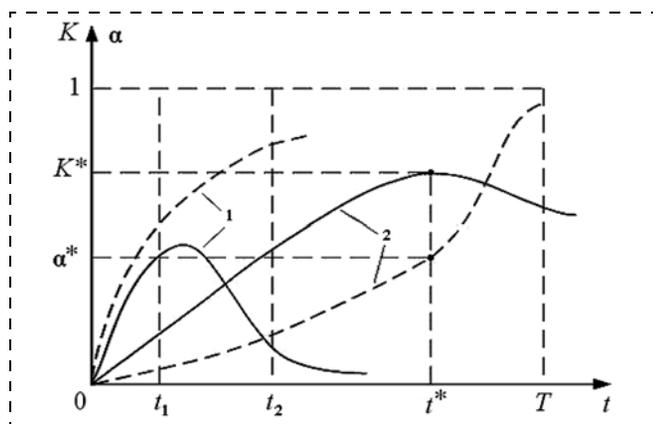


Рис. 1. Зависимости конкурентоспособности ( $K$ ) и синергетической открытости системы ( $\alpha$ ) от времени (— — —  $K$ ; — — —  $\alpha$ )

где  $\Pi(\tau)$  — бизнес-процесс, определяющий вид деятельности и включающий набор основных процессов (планирования, организации, производства, сбыта и т. д.), протекающих в системе в рассматриваемый период времени.

Построение конкретных видов функционала  $F$  для различных видов систем представляет собой сложную проблему теории управления организационно-техническими системами. Поэтому на практике пытаются упростить эту задачу различными способами. Например, вместо функционала (1) устанавливаются функциональные отношения между комплексными показателями конкурентоспособности и параметрами основных процессов.

Следует отметить, что в простейшем случае значение вектора показателей  $K(t)$  в момент времени  $t$  является просто аналитической вектор-функцией параметров процесса  $\Pi(t)$  в этот же момент времени. Тогда можно записать:

$$K(t) = f(\Pi(t)). \quad (2)$$

Введем вектор параметров порядка  $x = (x_1(t), \dots, x_n(t))$ , который в общем случае является  $n$ -мерным и описывает все протекающие процессы с системной точки зрения в некоторый период времени  $[0, T]$ . Будем считать, что на заданном отрезке времени конкурентоспособность рассматриваемой системы  $K(t)$  есть некоторая скалярная функция вида

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

где  $\dot{x}(t) = \frac{dx}{dt}$ .

Очевидно, что каждая система стремится повысить свою конкурентоспособность, т. е. устремить введенный функционал к максимуму.

Однако для повышения конкурентоспособности системы необходимы ресурсы  $R$  (материальные, финансовые и т. п.), которые являются ограниченными. Поэтому каждая система на определенный период времени  $[0, T]$  должна решать соответствующую оптимизационную задачу, которую в общем виде можно сформулировать следующим образом:

найти такие кусочно-непрерывные функции  $x^*(\cdot) \in KC([0, T]; R^n)$ , доставляющие максимум функционалу конкурентоспособности

$$K = K(x(\cdot)) \rightarrow \max \quad (4)$$

при следующих ограничениях на ресурсы:

$$R_j(x(\cdot)) \leq R_j^*, j = 1, \dots, m, \quad (5)$$

и ограничениях на параметры управления:

$$x(t) \in X, t \in [0, T], \quad (6)$$

где  $R_j^*$  — заданные ограничения на ресурсы,  $X$  — множество допустимых значений параметров управления.

Следует отметить, что задача управления производственным процессом организационно-технической системы (4)–(6) в общем случае в настоящее

время решена быть не может. Это связано с тем, что, во-первых, общий аналитический вид функционала  $K$  неизвестен, во-вторых, искомые функции могут терпеть разрывы на отрезке  $[0, T]$  (особенно в период смены парадигмы развития и перехода на инновационные технологии) и, в-третьих, размерность данной задачи в общем случае может быть очень большой, что затрудняет ее численное решение.

Поэтому предлагается провести декомпозицию данной задачи, т. е. разбить ее на частные задачи оптимизации. При этом следует отметить, что для части параметров порядка рассматриваемых систем существуют единые методики их определения, и связь этих параметров с конкурентоспособностью достаточно очевидна (считается, чем выше эти показатели, тем выше эффективность производственной деятельности системы). Примеры таких параметров порядка приведены, например, в работе [1].

В то же время два из оставшихся параметров — степень открытости системы и уровень гарантированного качества, которые являются достаточно новыми, появившимися в связи с новой парадигмой развития общества, — требуют дополнительных исследований. Это связано с тем, что эти параметры не только не умеют вычислять, но и часто не знают, как качество и открытость влияют на конкурентоспособность системы. Однако в связи с переходом на новую парадигму они являются не менее значимыми для эффективного развития системы.

Следует отметить, что все частные задачи, получаемые при декомпозиции общей задачи управления, являются связанными между собой. Другими словами, решение одной из частных задач не должно ухудшать параметры состояния всей организационно-технической системы в рассматриваемые моменты времени. Например, рассмотрим задачу повышения открытости системы на некоторый период времени. Очевидно, что повышение степени открытости системы в начальный момент времени приведет к повышению конкурентоспособности. Однако если скорость повышения степени открытости будет достаточно большой и в системе не успеют пройти необходимые процессы организации и самоорганизации, то качество всех процессов жизненного цикла продукции будет снижаться, что приведет и к снижению конкурентоспособности системы (рис. 2). Поэтому важно при повышении степени открытости системы уметь оценивать не только показатели ее эффективности, но и качество системы через уровень организации протекающих в ней основных процессов. В связи с тем что зависимость конкурентоспособности системы от степени ее открытости неизвестна, предлагается использовать пошаговый алгоритм управления. На каждом шаге устанавливается некоторый заданный уровень открытости систем и определяется оптимальное время его достижения с учетом имеющихся ресурсов и рисков разрушения системы.

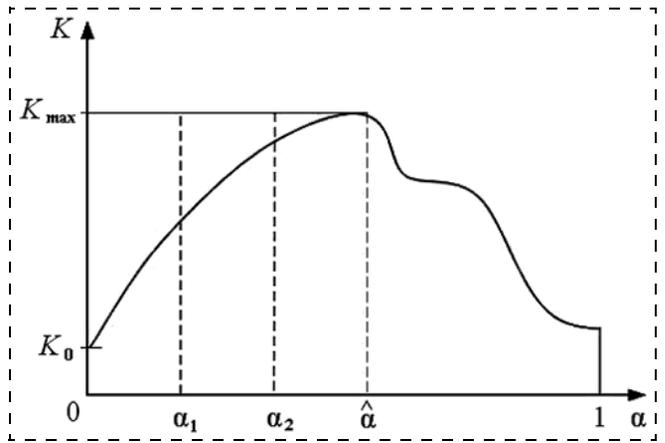


Рис. 2. Зависимость конкурентоспособности системы от ее синергетической открытости

Теперь общую задачу управления производственным процессом можно свести к последовательности следующих частных задач оптимизации:

найти такое оптимальное время  $t^*$ ,  $t^* \in [0, T]$ , при котором

$$t^* \rightarrow \min \quad (7)$$

и выполняются ограничения

$$\dot{\alpha}(t) \leq \dot{\alpha}_{\text{крит}}, t \in [0, T], \quad (8)$$

$$R_j(\alpha(\cdot)) \leq R_j^*, j = 1, \dots, m, \quad (9)$$

$$\alpha(0) = \alpha_0, \alpha(t^*) = \alpha_1. \quad (10)$$

Здесь  $\dot{\alpha}_{\text{крит}}$  — заданная максимальная скорость повышения открытости системы;  $R_j^*$  — заданные ресурсы;  $\alpha_1$  — заданный уровень открытости системы.

Проведенная декомпозиция общей задачи управления (4)–(6) позволяет свести ее решение к последовательности частных задач (7)–(10) по следующему алгоритму:

- выбираются параметры порядка  $x(t)$  исследуемой системы и проводится их оценка в некоторый момент времени, который считается начальным;
- строится функция, описывающая зависимость степени синергетической открытости системы  $\alpha$  от параметров процессов;
- определяются необходимые ресурсы  $R_j^*$  и ограничение на скорость повышения степени синергетической открытости  $\dot{\alpha}_{\text{крит}}$ , при котором в системе успеют произойти изменения за счет организации и самоорганизации без ее разрушения;
- решается задача (7)–(10) и определяется время  $t^*$ , при котором система повысила свою синергетическую открытость до заданного уровня;
- оцениваются параметры порядка системы в момент времени  $t^*$ .

Если остальные параметры порядка не ухудшились при новом состоянии системы, соответствующем заданной степени ее синергетической открытости, то возможно последующее повышение открытости системы путем решения задачи (7)–(10) при более высоком заданном значении  $\alpha$ .

Если хотя бы один параметр порядка ухудшился при новом состоянии системы, соответствующем заданной степени ее синергетической открытости, то необходимо заново решить задачу (7)–(10) при более низком заданном значении  $\alpha$  или повышенных значениях выделяемых ресурсов на обновление системы.

Рассмотрим применение предложенного алгоритма на примере управления синергетической открытостью производственной системы.

### **Пример управления синергетической открытостью производственной системы**

Современное промышленное предприятие может быть рассмотрено как большая и сложная производственная система, представляющая собой совокупность иерархий целей (номенклатура и объем выпускаемой продукции), иерархии принятия решений (производственное планирование и управление) и иерархии бизнес-процессов (совокупность технологических процессов, связанных в технологические маршруты производства каждого вида продукции).

Производственная система функционирует в окружении рынков продукции, сырья, труда и инноваций, взаимодействуя с этими рынками, обмениваясь информацией, материальными и трудовыми ресурсами.

Внешней средой для производственной системы также является общество, находящееся на определенном уровне развития, преследующее некоторые цели и взаимодействующее с производственной системой через политические, экономические и социальные институты.

Производственная система вынуждена постоянно адаптироваться к тем изменениям, которые происходят в окружающей ее среде, путем модификации и развития своих внутренних иерархий, которые работают в тесном взаимодействии, имеют различные интересы (часто конфликтные) и должны находиться в некотором равновесном состоянии, обеспечивающем ее функционирование и развитие.

Отметим, что производственная система является частным случаем социально-технической системы [8], в которой в качестве объекта управления выступает техническая система, непосредственно реализующая технологические операции, а в качестве субъекта управления наряду с менеджментом предприятия рассматриваются потребители продукции и все заинтересованные в успешном функционировании и развитии производственной системы социальные группы: собственники, инвесторы, персонал, поставщики, общество в целом.

Следует отметить, что система обладает определенной самостоятельностью по отношению к элементам, ее образующим. Как отмечено в работах [3, 6], наблюдая за поведением каждого элемента и зная все свойства этих элементов, невозможно предвидеть их коллективное поведение, зависящее как

от влияния внешней среды, так и от взаимодействия между элементами. Например, изучая поведение каждого рабочего, нельзя предсказать изменение организации производственной деятельности предприятия. Поэтому управление организацией сложной системы, какой, несомненно, является производственная система, более эффективно проводить на "макроуровне", а в качестве меры организованности системы выбрать энтропию [3, 6].

Энтропия является количественной мерой беспорядка в системе. Чем больше энтропия состояния системы, тем большим числом способов взаимодействия элементов системы оно может быть реализовано и тем менее оно упорядочено. Известно [6], что в абсолютно замкнутой системе все необратимые процессы сопровождаются увеличением энтропии, по окончании которых энтропия принимает максимальное значение.

В работе [6] показано, что существует такая степень незамкнутости (открытости) системы, при которой закон возрастания энтропии действует. При этом внешнее воздействие на систему ограничивает число возможных микросостояний, уменьшая ее энтропию. Однако эти утверждения выполняются при условии, что изменение энтропии системы намного больше изменения энтропии внешней среды, вызванного их взаимодействием. Такая внешняя среда называется энтропостатом, т. е. изменением энтропии энтропостата можно пренебречь по сравнению с изменением энтропии исследуемой системы.

Например, рассмотрим две производственные системы, выпускающие однотипную продукцию на разных предприятиях в рамках промышленной кооперации, т. е. комплектующие для продукции одного предприятия могут выпускаться на другом, и наоборот. Тогда имеем дело с двумя открытыми системами, которые друг для друга не являются энтропостатами. Если же предприятие выпускает на рынок продукцию, которую производит без внешних поставщиков комплектующих, то другие предприятия, производящие эту же продукцию, могут считаться энтропостатом для этого предприятия, влияющим на рассматриваемую производственную систему только как внешняя среда через формирование "спроса — предложения" на рынке сбыта данной продукции.

Все изменения, которые происходят при взаимодействии системы и энтропостата, относятся к ней самой, что позволяет сравнивать энтропию открытых систем. Для этого, следуя работе [6], введем некоторый феноменологический параметр  $\alpha$ , который назовем *степенью синергетической открытости системы* и который может изменяться от 0 до 1. Данный параметр характеризует значение всех изменений, которые произошли с системой в результате ее взаимодействия с энтропостатом (внешней средой). При  $\alpha = 1$  система считается абсолютно открытой, а при  $\alpha = 0$  — абсолютно закрытой.

Следует отметить, что в открытой системе общее приращение энтропии складывается из всегда

положительного приращения, обусловленного исключительно действием закона возрастания энтропии, и отрицательного приращения. Поэтому существует некоторый критический уровень упорядочения системы, которому однозначно соответствует степень открытости системы  $\alpha$ . Если система организована ниже критического уровня, то в ней преобладают процессы, увеличивающие порядок, если выше — преобладают процессы дезорганизации.

Отсюда следует вывод, что размыкание системы приводит к ее упорядочению и самоорганизации, а замыкание — к дезорганизации. Однако, размыкая систему в целях ее самоорганизации, необходимо следить, чтобы интенсивность размыкания (скорость возрастания степени открытости системы) не превысила некоторого порога  $\dot{\alpha}_{\text{крит}}$ , выше которого система, не успев самоорганизоваться, теряет устойчивость и разрушится.

В качестве примера управления синергетической открытостью системы рассмотрим задачу повышения открытости системы планирования крупного промышленного предприятия [9]. Известно [10], что важнейшей составляющей процесса управления производством является планирование. Его ведущая роль в принятии управленческих решений определяется тем, что в ходе планирования ставятся цели и распределяются ресурсы производственной системы. Рассматривать процесс планирования производства целиком не представляется возможным, поэтому выделяют уровни производственного планирования, которые характеризуются горизонтом планирования, периодом перепланирования и т. д. [10]. Процесс планирования может быть условно разбит на четыре уровня, характеризующихся собственным набором задач, различными периодами планирования и разными уровнями детализации [11]:

- *уровень управления предприятием (бизнес-планирование)*. Рассматриваются стратегические задачи управления предприятием, определяются стратегические цели развития направлений производственной деятельности, распределяются ресурсы и инвестиции. Горизонт планирования на данном уровне составляет от одного года до пяти лет, а минимальный период перепланирования — один год;
- *уровень стратегического планирования*. Целью данного этапа планирования является определение долгосрочных и среднесрочных целей предприятия. На данном уровне происходит сбор информации: прогнозирование, фильтрация и отбор заказов, анализ существующих мощностей и бизнес-целей производства. Результатом комплексной работы всех участников процесса является построение главного календарного плана производства (ГКПП), который регламентирует "что?", "к какому сроку?" и "в каких количествах?" будет выпускаться в плановом периоде. Горизонт планирования данного уровня — от года до двух лет. Данный уровень подлежит

дальнейшей декомпозиции на подуровни, со своими горизонтами планирования и детализацией. Ключевым моментом является тот факт, что на выходе данного этапа планирования должен быть сформирован и утвержден ГКПП с детализацией по месяцам. Минимальный период перепланирования на данном этапе составляет один месяц;

- *уровень тактического планирования*. На тактическом уровне планирования на основе составленного ГКПП с использованием более детальной информации о производственных мощностях строится детализированный календарный план производства в форме операционного плана, устанавливающий перечень, очередность и длительность технологических процессов (операций) на рабочих центрах в течение планового периода. Горизонт планирования — от одного до шести месяцев (в зависимости от длины производственного цикла предприятия и номенклатуры выпускаемой продукции). Детализация плана осуществляется по дням. Следует отметить, что используемый в стандарте MRP II<sup>1</sup> план потребности в материалах может быть получен автоматически из детализированного календарного плана производства. Минимальный период перепланирования обычно составляет одну неделю;
- *уровень оперативного планирования*. В качестве входных данных оперативное планирование использует детализированный календарный план выполнения производственных операций, полученный на тактическом уровне планирования. Затем составляется план операций на ближайшие часы или дни. Ввиду того что многие детали производственного процесса не рассматриваются или рассматриваются укрупненно на тактическом уровне планирования, а также в связи с тем, что из-за технологических или иных обстоятельств возникают отклонения от составленного календарного плана производства, необходимо проводить его корректировку и уточнение с учетом постоянно изменяющихся условий. Оперативное перепланирование плана операций также относится к данному уровню. Кроме того, к данному уровню можно отнести модели транспортных перевозок, ремонтных работ, складирования продукции и др. Горизонт планирования данного этапа — от одного дня до недели, детализация плана выполняется по часам. Минимальный период перепланирования — одна рабочая смена.

На рис. 3 представлена структурная схема системы производственного планирования, которая

<sup>1</sup> Стандарт MRP II (Manufacturing Resource Planning), разработанный в США, — это набор проверенных на практике разумных принципов, моделей и процедур управления и контроля, служащих повышению показателей экономической деятельности предприятия.



Рис. 3. Структурная схема системы производственного планирования

включает четыре уровня планирования: бизнес-планирование, стратегический, тактический и оперативный. Каждый уровень характеризуется горизонтом планирования  $\Gamma_i$  и периодом перепланирования  $\gamma_i$ ,  $i = 1, \dots, 4$ . Внешним воздействием на данную систему считается воздействие со стороны заказчиков и рынков продукции, инноваций, сырья и труда.

Внутри системы планирования производства (СПП) также осуществляется взаимодействие. На стратегическом уровне формируется ГКПП, который является основой для тактического планирования и формирования операционного плана производства (ОПП). В свою очередь, ОПП является базой для составления сменно-суточных заданий (ССЗ). Как отмечалось выше, на оперативном уровне управления происходит контроль производства продукции и ее составляющих. В связи с тем что из-за технологических или иных обстоятельств возникают отклонения от составленных календарных планов, необходимо принимать меры для устранения отклонений в оперативном режиме. Обычно это влечет изменение операционного плана производства. Поэтому на рис. 3 показано обратное воздействие со стороны оперативного уровня на тактический уровень планирования.

Отметим, что результатом решения задачи производственного планирования на верхних уровнях управления предприятием является ГКПП на планируемый период, оптимальный с точки зрения критериев, определяемых политикой предприятия, и учитывающий ограничения на производственные мощности, имеющиеся оборотные средства и основные ресурсы предприятия [12]. В общем случае ГКПП — это календарный план выпуска продукции, с указанием объемов и сроков ее выпуска, разра-

батываемый для номенклатурных позиций верхнего уровня иерархии. В качестве таковых могут выступать как готовая продукция, так и сборочные единицы и узлы высокого уровня; как реально (физически) существующие конфигурации продуктов, так и псевдоконфигурации, используемые лишь для целей планирования. ГКПП предоставляет основу для обоснованного обещания покупателям выполнения поставок в согласованные сроки, эффективного использования мощностей завода, достижения стратегических целей бизнеса в соответствии с планом производства, а также поиска компромиссов между маркетинговыми и производственными подразделениями предприятия [10]. Следует отметить, что ГКПП ориентирован в большей степени на увеличение прибыли предприятия и в меньшей степени — на комфортность производства. Он не учитывает распределение имеющихся ресурсов во времени и пространстве, возможности в поставках и хранении необходимых материалов, резервов для оперативного управления производством.

Возникающий конфликт должен быть разрешен на следующих структурных уровнях (тактическом и оперативном), на которых происходит детализация и уточнение ГКПП [13]. При этом возможные скорости внесения изменений в тактический и оперативный планы должны быть увязаны между собой и соответствовать степени открытости всей СПП. Другими словами, возможное изменение плана производства на стратегическом уровне, например, за счет включения новых заказов приводит к новому ГКПП. При этом должны произойти изменения на тактическом и оперативном уровнях планирования. Однако в силу нехватки ресурсов изменения на оперативном уровне не всегда могут быть осуществлены. Поэтому необходимо согласовать изменения календарных планов на двух последних уровнях планирования. Если эта корректировка возможна, то новый ГКПП является допустимым. В том случае, когда ресурсы на двух последних уровнях планирования не могут обеспечить новый ГКПП, необходимо пересмотреть скорость изменения этого плана. Другими словами, делая систему планирования более открытой за счет учета интересов потребителей на стратегическом уровне, необходимо следить, чтобы интенсивность размыкания (скорость возрастания степени открытости системы) не превысила некоторый порог  $\dot{\alpha}_{\text{крит}}$ , выше которого система, не успев самоорганизоваться, теряет устойчивость.

На практике степень открытости всей системы планирования на предприятии обычно подбирается эмпирически — путем введения процедуры согласования планов на трех последних уровнях. Эту процедуру согласования необходимо проводить до тех пор, пока СПП не перейдет в некоторое равновесное состояние, значение энтропии в котором будет соответствовать определенной степени открытости всей СПП, которая соответствует суще-

ствующим ресурсам предприятия и удовлетворяет его менеджмент.

Однако любая модернизация СПП, направленная на повышение открытости системы, требует первоначального обоснования допустимой скорости реализации данного процесса в соответствии с имеющимися ресурсами предприятия и возможностями их структурной реорганизации и самоорганизации.

Введем параметр, характеризующий "гибкость" планирования на каждом структурном уровне СПП:

$$\beta_i = \frac{\gamma_i}{\Gamma_i}, i = 1, \dots, 4. \quad (11)$$

Отметим, что параметр  $\beta_i$  характеризует возможную скорость внесения изменений в  $i$ -й календарный план производства. Очевидно, что  $\beta_i \in [0, 1]$ . Если  $\beta_i = 1$ , то изменений в плане нет, а если  $\beta_i = 0$ , то изменения плана происходят практически мгновенно. В том случае, когда руководство предприятия стремится к большей открытости для внешних потребителей, то  $\beta_2$  должно стремиться к нулю (как только приходит новый заказ на предприятие, так сразу корректируется ГКПП). Однако это влечет изменение в ОПП и ССЗ, т. е.  $\beta_3$  и  $\beta_4$  также должны стремиться к нулю, что обычно невозможно с позиций организации процесса производства. Другими словами, как уже отмечалось, параметры  $\beta_i$  должны быть согласованы между собой (например,  $\beta_1 \geq \beta_2 \geq \beta_3 \geq \beta_4$ ). При этом очевидно, что данные параметры целесообразно выбирать примерно равными между собой, чтобы обеспечить их согласованность, не завышая производственные затраты. Следует отметить, что любое уменьшение параметров  $\beta_i$  связано с дополнительными издержками производства. Поэтому руководство предприятия стремится сохранять эти параметры как можно ближе к 1, т. е. реже прибегать к процедуре перепланирования производства.

Предположим, что на предприятии сложилась СПП, характеризующаяся некоторым распределением параметров  $\beta_i$ . Как показано выше, степень открытости системы однозначно определяет значение энтропии этой системы в равновесном состоянии. Отметим, что для абсолютно замкнутых систем значение энтропии будет максимальным, а для абсолютно открытых — минимальным. Требования рынка продукции обуславливают необходимость большей открытости и, соответственно, модернизации СПП. Для обеспечения устойчивого перехода СПП в новое равновесное состояние необходимо оценить степень открытости системы  $\alpha$ . Для оценки  $\alpha$  может быть предложена следующая формула:

$$\alpha = \beta_1(1 - \max_i \beta_i), i = 2, 3, 4. \quad (12)$$

Формула (2) показывает, что степень открытости системы определяется "гибкостью" календарного планирования, причем на самом "узком" уровне.

Введение множителя  $\beta_1$  в формулу (12) позволяет учитывать масштаб предприятия и тип производства (машиностроительное, металлургическое и т. д.), т. е. учет параметра  $\beta_1$  дает возможность учесть характер производственной деятельности предприятия при оценке степени открытости ее СПП.

При увеличении степени  $\alpha$  открытость системы возрастает за счет поступления новой полезной информации, и энтропия снижается, а упорядоченность СПП повышается. Однако, если степень открытости будет очень высокой, например, информация о перепланировании будет поступать ежедневно, то СПП не будет успевать подстраиваться, что приведет к дезорганизации всей системы управления. Поэтому для каждого конкретного производства необходимо обосновывать степень открытости СПП путем выбора оптимального значения  $\alpha$ , которое зависит от большого числа параметров, характеризующих производство: номенклатуры и масштаба производства, вида применяемого оборудования, имеющихся производственных мощностей, используемых технологий и т. д.

Если в начальный момент модернизации СПП степень ее открытости равнялась  $\alpha_0$ , а требуется обеспечить степень открытости  $\alpha_1$ , причем  $\alpha_1 > \alpha_0$ , при этом должен возрасти критический уровень упорядочения системы, т. е. в СПП должны пройти процессы организации и самоорганизации, уменьшающие энтропию системы. Например, должно произойти расширение станочного парка предприятия или повышение его универсальности для увеличения "гибкости" производства на оперативном уровне управления (ликвидация "узких" мест), повышение квалификации рабочих и т. п.

Рассмотрим пример влияния распределения параметров  $\beta_i$  на степень открытости СПП. Пусть заданы следующие исходные данные:

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= 3 \text{ года}, \gamma_1 = 1 \text{ год}, \Gamma_2 = 1 \text{ год}, \gamma_2 = 3 \text{ месяца}, \\ \Gamma_3 &= 3 \text{ месяца}, \gamma_3 = 1 \text{ неделя}, \\ \Gamma_4 &= 1 \text{ неделя}, \gamma_4 = 3 \text{ дня}. \end{aligned}$$

По формуле (11) получим:  $\beta_1 = 1/3$ ;  $\beta_2 = 1/4$ ;  $\beta_3 = 1/12$ ;  $\beta_4 = 3/7$ .

Используя формулу (12), можно оценить степень открытости данной СПП:  $\alpha = 1/3(1 - 3/7) = 0,19$ .

Видно, что рассматриваемая СПП с позиций энтропийного подхода:

1) не обладает согласованностью параметров ( $\beta_4 > \beta_3$ ,  $\beta_4 > \beta_2$ ), что обязательно вызовет конфликт между уровнем ГКПП и реализацией ССЗ, т. е. между требуемыми сроками выполнения заказов и возможностями производства;

2) степень открытости этой системы определяется гибкостью системы оперативного управления, которая в данном случае является "узким" местом системы управления производством;

3) система тактического планирования обладает чрезмерной "гибкостью", что приводит к необоснованным материальным затратам.

Для повышения степени открытости рассматриваемой СПП в целях более "гибкого" реагирования на пожелания заказчиков рассмотрим следующую оптимизационную задачу, которая является частным случаем задачи (7)—(10).

Пусть задана некоторая производственная система, характеризующаяся следующими параметрами СПП:  $\beta_1 = 1/3$ ;  $\beta_2 = 1/4$ ;  $\beta_3 = 1/12$ ;  $\beta_4 = 3/7$ ;  $\alpha = 0,19$ . Требуется найти минимальное время  $T$ , за которое можно повысить степень открытости данной системы на 50 %, при ограничениях на скорость изменения параметров  $\beta_i$ ,  $i = 2, 3, 4$ , т. е.:

$$|\dot{\beta}_i(t)| \leq \dot{\beta}_{i\text{крит}}, t \in [0, T], i = 2, 3, 4.$$

Эти ограничения связаны с ресурсами предприятия, возможностями модернизации производства и т. п. При этом желательно, чтобы в момент времени  $T$  параметры  $\beta_i$ ,  $i = 2, 3, 4$ , были приблизительно одинаковыми.

Предположим, что заданы следующие критические скорости изменения параметров системы планирования:

$$\dot{\beta}_{2\text{крит}} = 0,028; \dot{\beta}_{3\text{крит}} = 0,014; \dot{\beta}_{4\text{крит}} = 0,095,$$

которые соответствуют возможностям предприятия при модернизации системы управления за счет повышения гибкости производственного планирования.

Исходя из соотношения (12) можно записать:

$$\dot{\alpha}(t) = -\beta_1 \max_i |\dot{\beta}_i(t)| \text{sign} \dot{\beta}_i(t), t \in [0, T], i = 2, 3, 4. \quad (13)$$

Предполагая монотонность по времени функций  $\beta_i$ ,  $i = 2, 3, 4$ , и учитывая знак производных, из (3) следует, что  $\dot{\alpha}(t) = \beta_1 \max_i \dot{\beta}_{i\text{крит}}$ ,  $i = 2, 3, 4$ .

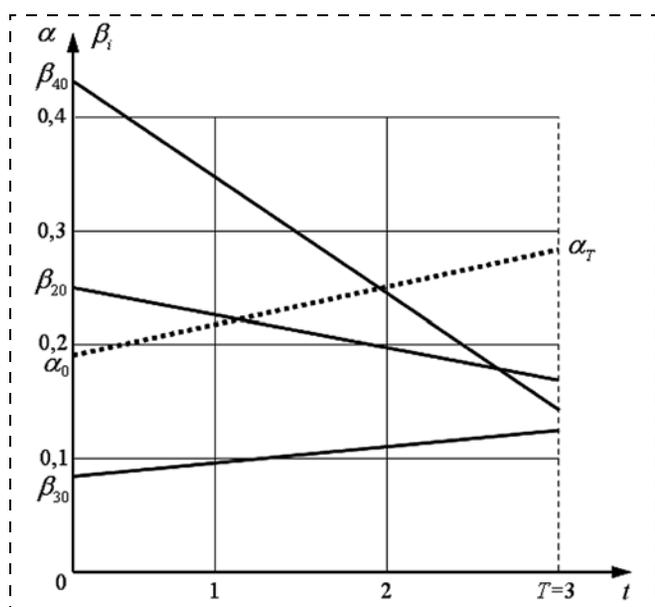


Рис. 4. Повышение степени открытости производственной системы за счет изменения параметров системы планирования

Из анализа исходных данных видно, что максимальное значение  $\dot{\beta}_{i\text{крит}}$  достигается при  $i = 4$ , т. е.  $\dot{\alpha}(t) = \beta_1 \dot{\beta}_{4\text{крит}}$ . Подставляя исходные данные, получим значение  $\dot{\alpha} = 0,031$ .

Теперь, подставляя это значение в выражение для требуемого значения параметра открытости системы в момент времени  $T$  ( $\alpha_T = \alpha(T) = 0,19 \cdot 1,5 = 0,285$ ), считая справедливым выражение  $\alpha_T = \alpha_0 + \dot{\alpha} T$ , ( $\alpha_0 = 0,19$ ), получим минимальное время  $T$ , за которое можно повысить степень открытости системы до требуемого значения  $\alpha_T$ :

$$T = (0,285 - 0,19)/0,031 = 3 \text{ (года)}.$$

Следует отметить, что при такой скорости изменения открытости системы не произойдет никаких разрушительных процессов (вследствие выполнения ограничений на ресурсы предприятия). При этом в момент времени  $T$  параметры гибкости планирования примут следующие значения:  $\beta_1 = 1/3$ ;  $\beta_2 = 1/6$ ;  $\beta_3 = 1/8$ ;  $\beta_4 = 1/7$ , которые близки к согласованным (рис. 4).

Для достижения этих параметров достаточно снизить  $\gamma_2$  до 2 месяцев, значение  $\gamma_4$  — до 1 рабочего дня и понизить горизонт планирования на тактическом уровне ( $T_3$ ) до 2 месяцев.

Отметим, что в приведенном примере после модернизации СПП "узким" местом планирования вместо оперативного уровня становится стратегический, который определяет взаимодействие с заказчиками.

Другими словами, те обязательства, которые будут включены в ГКПП, предприятие способно выполнить за счет "гибкости" перепланирования на тактическом и оперативном уровнях управления производством.

## Выводы

Рассмотренный синергетический подход к управлению организационно-техническими системами предполагает различную степень их открытости. Чем выше степень открытости системы, тем более готовой к самоорганизации должна быть эта система на всех структурных уровнях принятия управленческих решений. Предложен пошаговый алгоритм повышения синергетической открытости системы с выбором оптимального шага по времени с учетом ресурсов и рисков разрушения системы.

Приведен пример управления синергетической открытостью крупного промышленного предприятия. Показано, что одним из эффективных механизмов повышения степени открытости производственной системы является увеличение гибкости системы планирования производства. При этом структурные параметры системы на различных уровнях планирования должны быть согласованы между собой, что гарантирует возникновение нового равновесного состояния с уровнем организации производства, соответствующим стратегическим целям предприятия.

## Список литературы

1. Солодова Е. А. Новые модели в системе образования: синергетический подход. М.: Книжный дом, 2012. 344 с.
2. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: КомКнига, 2005. 296 с.
3. Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. М.: КомКнига, 2005. 248 с.
4. Трубецков Д. И. Введение в синергетику. М.: Едиториал УРСС, 2004. 240 с.
5. Горский Ю. М. Системно-информационный анализ процессов управления. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. 327 с.
6. Шаповалов В. И. Основы теории упорядочения и самоорганизации. М.: Фирма "Испо-Сервис", 2005. 296 с.
7. Федосеев С. А., Гитман М. Б., Столбов В. Ю., Вожаков А. В. Управление качеством продукции на современных промышленных предприятиях. Пермь: изд-во Перм. нац. исслед. ун-та, 2011. 229 с.

8. Гитман М. Б., Столбов В. Ю., Гилязов Р. Л. Управление социально-техническими системами с учетом нечетких предпочтений. М.: ЛЕНАНД, 2011. 272 с.
9. Pustovoit K. S., Gitman M. B., Stolbov V. Y. Widening the openness of a manufacturing system with consideration of internal and external customers' interests // Actual Problems of Economics. 2012. N. 8. P. 440–451.
10. Гаврилов Д. А. Управление производством на базе стандарта MRPII. СПб.: Питер, 2003. 352 с.
11. Евстратов С. Н., Вожаков А. В., Столбов В. Ю. Автоматизация планирования производства в рамках единой информационной системы многопрофильного предприятия // Автоматизация в промышленности. 2012. № 2. С. 13–16.
12. Производственный менеджмент: Учебник / Под ред. В. А. Козловского. М.: ИНФА-М, 2003. 574 с.
13. Федосеев С. А., Гитман М. Б., Столбов В. Ю. Математические модели управления качеством продукции на этапе планирования производства // Проблемы управления. 2011. № 4. С. 60–67.

## An Algorithm for Control of the Synergetic Openness of the Organizational and Technical Systems

A. N. Danilov, dan@pstu.ru, V. Yu. Stolbov, ck@pstu.ru,  
Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation

Received on January 27, 2015

*The article is dedicated to the problem of control of the synergetic openness of the organizational and technical systems in a market economy. The degree of the synergetic openness of a system is an order parameter, which is defined as the system's ability to respond to the external stimuli (consumer demand) by self-organization. It is believed that the system's competitiveness depends on this parameter, but the functional dependency is not defined. The authors propose an incremental algorithm for a synergetic openness for the system control and other parameters of the order and rate of growth of openness. They present an example of application of the algorithm for the control of openness in the planning system of a large industrial enterprise. The task is to ensure control of the degree of openness of the hierarchical planning systems, since the control parameters are the periods of rescheduling at each hierarchical level of the decision-making. It was demonstrated that a higher transparency of the system's structural parameters required consistency at various planning levels. This ensured emergence of a new equilibrium state in the production system, which would meet the strategic objectives of an enterprise.*

**Keywords:** synergetic openness, order parameters, degree of openness, control

For citation:

Danilov A. N., Stolbov V. Yu. An Algorithm for Control of the Synergetic Openness of the Organizational and Technical Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 6, pp. 387–395.

DOI: 10.17587/mau.16.387-395

### References

1. Solodova E. A. *Novye modeli v sisteme obrazovaniya: sinergeticheskij podhod* (New models in the education system: a synergistic approach), Moscow, Knizhnyj dom, 2012, 344 p. (in Russian).
2. Prigozhin I., Stengers I. *Porjadok iz haosa* (Order out of chaos), Moscow, KomKniga, 2005, 296 p. (in Russian).
3. Haken G. *Informacija i samoorganizacija. Makroskopicheskij podhod k slozhnym sistemam* (Information and Self-Organization. Macroscopic Approach to Complex Systems), Moscow, KomKniga, 2005, 248 p. (in Russian).
4. Trubeckov D. I. *Vvedenie v sinergetiku* (Introduction to Synergetics), Moscow, Editorial URSS, 2004, 240 p. (in Russian).
5. Gorskiy Ju. M. *Sistemno-informacionnyj analiz processov upravlenija* (Systematic analysis and information management processes), Novosibirsk, Nauka, Sib. otd-nie, 1988, 327 p. (in Russian).
6. Shapovalov V. I. *Osnovy teorii uporyadochenija i samoorganizatsii* (Fundamentals of the theory of ordering and self-organization), Moscow, Firma "Ispo-Servis", 2005, 296 p. (in Russian).
7. Fedoseev S. A., Gitman M. B., Stolbov V. Ju., Vozhakov A. V. *Upravlenie kachestvom produkcii na sovremennyh promyshlennyh predpriyatijah* (Quality management in modern enterprises), Perm', Publishing House of Perm National Research Polytechnic University, 2011, 229 p. (in Russian).

8. Gitman M. B., Stolbov V. Ju., Giljazov R. L. *Upravlenie social'no-tehnicheskimi sistemami s uchetom nechetkih predpochtenij* (Management of socio-technical systems with fuzzy preferences), Moscow, LENAND, 2011, 272 p. (in Russian).
9. Pustovoit K. S., Gitman M. B., Stolbov V. Y. Widening the openness of a manufacturing system with consideration of internal and external customers' interests, *Actual Problems of Economics*, 2012, no. 8, pp. 440–451.
10. Gavrilov D. A. *Upravlenie proizvodstvom na haze standarta MRPII* (Production management based on the standard MRPII), SPb, Piter, 2003, 352 p. (in Russian).
11. Evstratov S. N., Vozhakov A. V., Stolbov V. Ju. *Avtomatizacija planirovanija proizvodstva v ramkah edinoj informacionnoj sistemy mnogoprofil'nogo predpriyatija* (Automation of production planning within a single information system of multi-enterprise), *Avtomatizacija v Promyshlennosti*, 2012, no. 2, pp. 13–16 (in Russian).
12. Kozlovskogo V. A. ed. *Proizvodstvennyj menedzhment: Uchebnik* (Production Management: A Textbook), Moscow, INFA-M, 2003, 574 p. (in Russian).
13. Fedoseev S. A., Gitman M. B., Stolbov V. Ju. *Matematicheskie modeli upravlenija kachestvom produkcii na jetape planirovanija proizvodstva* (Mathematical models of quality management in the planning phase of production), *Problemy Upravlenija*, 2011, no. 4, pp. 60–67 (in Russian).

Corresponding author:

Danilov Alexander N., Ph. D. in Technical Sciences, Assistant Professor, Assistant of the Vice-Rector on scholastic work, Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: dan@pstu.ru