

**УПРАВЛЕНИЕ**

УДК 681.3.07

**О.Р. Никитин, П.А. Полушин, В.А. Матюха, Д.В. Леммле**  
**СОСТАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕДАЧЕЙ РАЗНЕСЕННЫХ СИГНАЛОВ**

*Предложен метод, объединяющий свойства комбинирования разнесенных сигналов и дополнительного кодирования передаваемого сигнала с отдельной передачей информационной и проверочной частей по различным каналам разнесения. Исследованы области преимущества одного и другого вариантов обработки.*

**Ключевые слова:** комбинирование, кодирование, разнесенный прием, вероятность ошибки.

**Постановка задачи.** Для повышения помехоустойчивости и борьбы с замираниями в современных системах передачи цифровых сигналов различного назначения широко используются разнесенные сигналы. Несколько идентичных копий одного информационного сигнала одновременно передаются по различным каналам, а на приемной стороне комбинируются тем или иным способом. Если разнесенные каналы организованы так, что замирания сигнала в них происходят независимо, то удастся избавиться от большинства из них. Кроме того, наблюдается повышение отношения «сигнал/шум» из-за того, что полезные составляющие комбинируемых сигналов складываются синфазно, а независимые шумовые компоненты – случайным образом. Степень выигрыша при этом зависит от применяемого метода комбинирования.

Широко распространен метод частотного разнесения, не требующий дополнительного антенного оборудования. Однако, как отмечалось в [1,2], при этом не всегда используются возможности, заключающиеся в избыточности частотного ресурса, когда в распоряжении передатчика имеется спектральная полоса тракта передачи, в несколько раз большая, чем ширина спектра исходного передаваемого сигнала. При использовании кодирования (речь идет не о кодировании информационной последовательности при формировании исходного передаваемого сигнала, а о дополнительном кодировании при организации разнесения) возможно получение дополнительного выигрыша в помехо-

устойчивости. В то же время известно, что выигрыш от применения кодирования незначителен при малых уровнях сигналов, а выигрыш от применения «классического» разнесения возможен при любых их уровнях.

Из-за подобных «конкурирующих» свойств возникает необходимость определения областей, где один из этих методов имеет преимущества перед другим, а также изучения возможностей их совместного использования. Этим вопросам посвящена данная статья.

**Определение сравнительной помехоустойчивости методов комбинирования и разнесенного кодирования.** Как известно [3,4], при комбинировании в основном используются три метода объединения принимаемых сигналов. При автовыборе из всех принятых сигналов выбирается по определенному признаку наилучший сигнал, при линейном сложении осуществляется синфазное суммирование всех принятых сигналов с одинаковыми весовыми коэффициентами, при оптимальном сложении весовые коэффициенты пропорциональны уровням принятых сигналов.

Если уровни принимаемых полезных сигналов равны  $u_1 \div u_N$ , где  $N$  – кратность частотного разнесения, то отношение «сигнал/шум» при одинаковой мощности шумов во всех каналах разнесения, равной  $P_n = \sigma^2$ , после комбинирования будет определяться выражениями соответственно для методов автовыбора, линейного и оптимального сложения:

$$\rho_{AB} = \max_i \{u_i\} / \sigma, \quad (1)$$

$$\rho_{ЛС} = \sqrt{N} \left( \sum_{i=1}^N u_i \right) / \sigma, \quad (2)$$

$$\rho_{ОС} = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2} / \sigma. \quad (3)$$

Будем рассматривать различные виды цифровой модуляции, в частности: бинарную фазовую манипуляцию (BPSK); дифференциальную бинарную фазовую манипуляцию (DPSK); ортогональную бинарную частотную манипуляцию при когерентном (FSK1) и некогерентном (FSK2) детектировании. Вероятность ошибки  $P_C$  при приеме сигнала с использованием этих видов модуляции в соответствии с [3] в зависимости от текущего отношения «сигнал/шум»  $\rho$  будет равна:

$$\text{- для BPSK : } P_C = 0,5[1 - \operatorname{erf}(\rho/\sqrt{2})], \quad (4)$$

$$\text{- для DPSK : } P_C = 0,5 \exp[-\rho^2/2], \quad (5)$$

$$\text{- для FSK1 : } P_C = 0,5[1 - \operatorname{erf}(\rho/2)], \quad (6)$$

$$\text{- для FSK2 : } P_C = 0,5 \exp[-\rho^2/4]. \quad (7)$$

Для определения вероятности ошибки при различных типах модуляции и методах комбинирования необходимо выражения из (1) – (3) подставить в соответствующую формулу (4) – (7).

При использовании метода разнесенного кодирования по разнесенным каналам передаются не одинаковые копии информационного сигнала, а части блока символов, предварительно полученного из информационного сигнала дополнительным блочным кодированием. Например, для  $N=2$  символы исходной цифровой последовательности предварительно разбиваются на группы по  $k$  символов. Далее осуществляется блочное кодирование каждой группы, в результате чего формируются  $b$  дополнительных проверочных символов, для  $N=2$  их количество  $b=k$ .

Разные части сформированного таким образом блока закодированного сигнала размером  $n=k+b$  передаются одновременно, но по отдельности – по разным каналам разнесения. В простейшем случае по одному каналу передается  $k$  информационных символов блока, а по другому каналу в этот же интервал времени передается  $b=k$  проверочных символов этого же блока. Таким образом, передача целиком информационного блока по каналу связи занимает интервал времени  $T_B = nT_C/2$ , где  $T_C$  – длительность одного символа. На приемной стороне из двух принятых частей составляется целиком информационный блок, и после его декодирования выделяется собственно информационная часть.

Текущий уровень сигналов в каждом канале разнесения независимо меняется по времени, соответственно меняются текущие вероятности ошибки ( $P_k$  и  $P_b$ ) в передаваемых информационной и проверочной частях блока, определяемые формулами (4) – (7). Поскольку эти значения пропорциональны среднему количеству ошибок в соответствующих частях блока, то вероятность ошибки по блоку в целом, определяющаяся средним количеством ошибок в нем, будет равна  $P_1 = (P_k + P_b)/2$ .

При «жестком» декодировании блочные коды могут исправлять число ошибок до половины размера проверочной части блока. В результате декодирования блочного кода средняя по блоку вероятность ошибки за счет исправления их части уменьшается с  $P_1$  до  $P_D$  и становится равной:

$$P_D = \frac{1}{b+k} \sum_{i=b/2+1}^{b+k} i \frac{(b+k)!}{i!(b+k-i)!} P_1^i (1-P_1)^{b+k-i}. \quad (8)$$

При  $N > 2$  общий информационный блок составляется из  $N$  частей, размеры проверочной части  $b = (N-1)k$ . В простейшем случае в одном канале разнесения передается информационная часть блока, а в остальных каналах разнесения одновременно с этим передаются «порции» проверочной части, каждая размером  $k$ . Общая вероятность ошибки по блоку будет равна среднему от вероятностей ошибки в каждом канале разнесения, определяемом текущим отношением «сигнал/шум» в нем. Таким образом, сравнение текущих величин  $P_C$  и  $P_D$  позволит определить, какой из методов в текущий момент имеет преимущество в помехоустойчивости.

Величина  $P_D$  определяется также выбранным размером группы, в которую объединяются последовательно расположенные символы информационной последовательности. Для кратности разнесения  $N=2$  для различных методов комбинирования и видов модуляции были произведены расчеты сравнительной помехоустойчивости комбинирования и разнесенного кодирования и получены «границы», определяющие, где преимущества имеет один или другой метод.

Результаты расчетов для размеров информационной части  $k=4$  приведены на рисунках 1 и 2.

В координатах  $u_1-u_2$  построены линии, по одну сторону которых имеет преимущество метод комбинирования, по другую – метод разнесенного кодирования. На всех рисунках цифрами обозначены графики, соответствующие следующим методам комбинирования: 1 – оптимальное сложение; 2 – линейное сложение;

3 – автовыбор. Поскольку все графики симметричны относительно биссектрисы первого квадранта этой системы координат, то верхняя и нижняя половины первого квадранта на обоих рисунках отведена графикам, относящимся к разным видам модуляции. На рисунке 1 в верхней половине квадранта помещены графики для BPSK, в нижней половине – для DPSK. На рисунке 2 в верхней половине квадранта помещены графики для FSK1, в нижней половине квадранта – для FSK2.

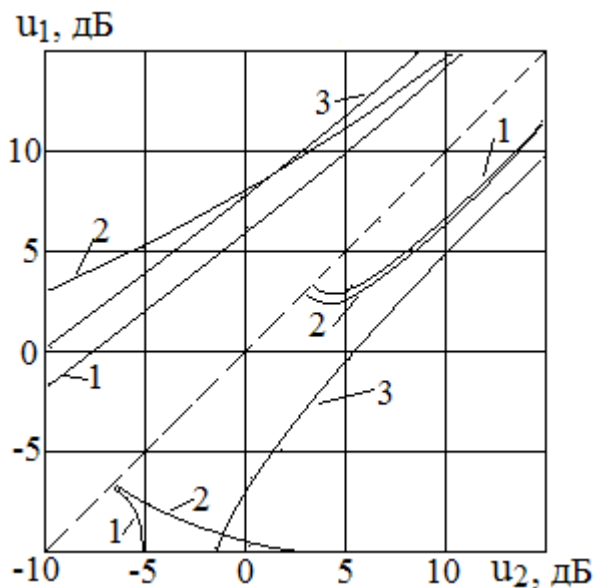


Рисунок 1 – Сравнение методов комбинирования и разнесенного кодирования для BPSK и DPSK при  $k=4$

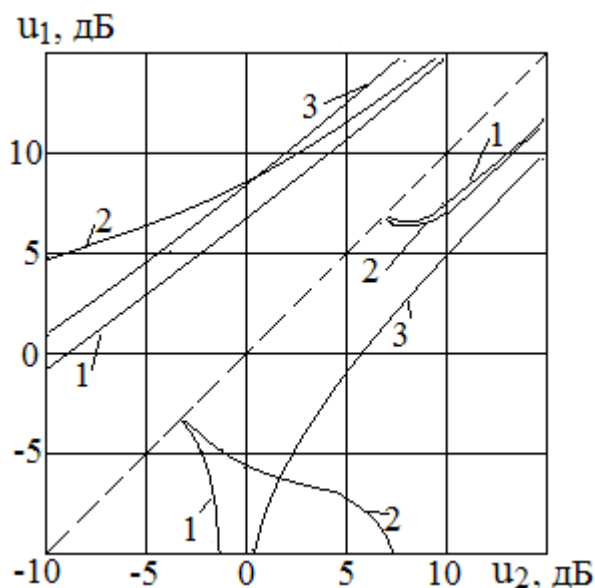


Рисунок 2 – Сравнение методов комбинирования и разнесенного кодирования для FSK при когерентном и некогерентном детектировании,  $k=4$

На рисунке 3 помещены графики для метода

BPSK при  $k=8$  (верхняя половина квадранта) и для  $k=12$  (нижняя половина квадранта).

Анализ полученных результатов позволяет сделать ожидаемые выводы, что комбинирование имеет преимущество в помехоустойчивости перед разнесенным кодированием в случае, когда принятые разнесенные сигналы относительно малы либо значительно различаются по уровню. Преимущество разнесенного кодирования наблюдается в областях, тяготеющих к биссектрисе квадранта. Имея статистику замираний уровня сигнала на различных трассах, можно рекомендовать к применению соответствующий метод.

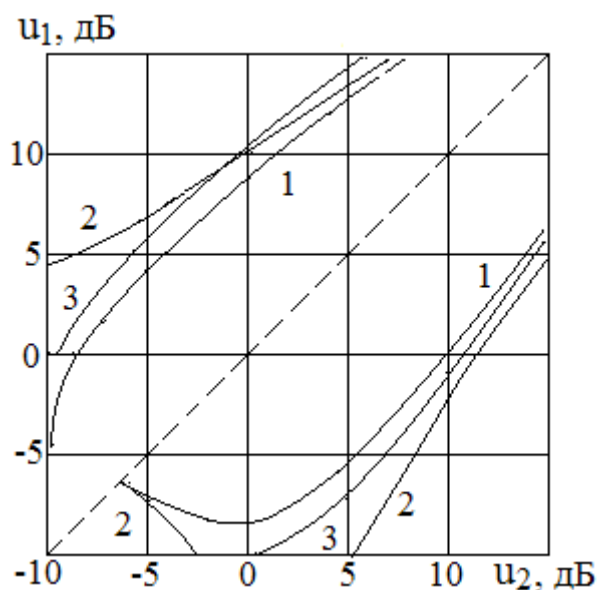


Рисунок 3 – Сравнение методов комбинирования и разнесенного кодирования для BPSK при  $k=8$  и  $k=12$

Однако более перспективным представляется подход, объединяющий преимущества обоих методов. Подход можно применить на линиях двухсторонней передачи, когда от приемника обратно к передатчику (например, по служебному каналу линии, идущей в обратном направлении) можно транслировать информацию о текущих уровнях принятых сигналов и на основе этого принимать решение о том, какой из методов необходимо применять в текущий момент.

**Пример реализации составного управления передачей разнесенных сигналов.** Возможная укрупненная структурная схема для реализации описываемого составного управления при двукратном частотном разнесении представлена на рисунке 4. Предполагается, что линия передачи – двусторонняя и подобные схемы приемопередатчиков работают на обеих сторонах. Передача ведется на несущих частотах  $f_1$  и  $f_2$ , прием – на несущих частотах  $f_3$  и  $f_4$ .

Направления передачи и приема разделяются с помощью разделительного фильтра (РФ).

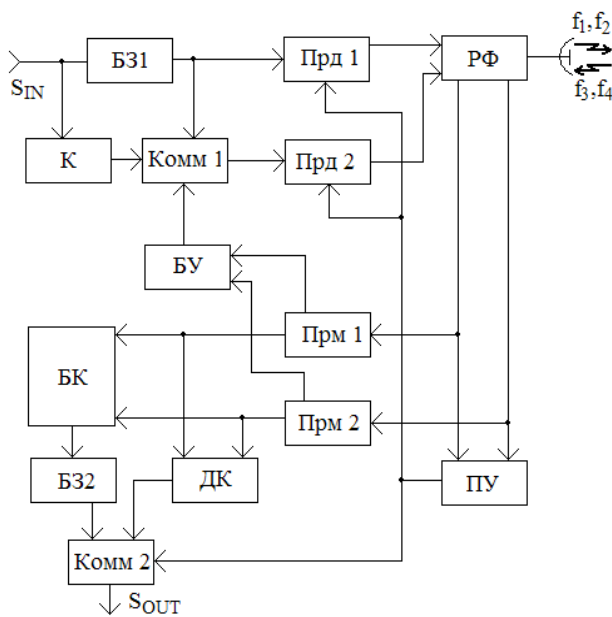


Рисунок 4 – Пример реализации составного управления передачей разнесенных сигналов

Входные информационные символы  $S_{IN}$  поступают на кодер (К), где их поток разделяется на группы по  $k$  символов и на их основе формируется блочный код одним из известных методов. На выходе кодера вырабатывается только символьная последовательность из проверочных символов длиной  $b=k$ , время ее формирования равно  $T_{F1}$ . В блоке задержки БЗ1 осуществляется задержка входной последовательности  $S_{IN}$  на время  $T_{F1}$ , и таким образом на входы коммутатора (Комм 1) одновременно поступают две последовательности символов одинаковой длины  $k=b$ , одна из них – информационная, другая – полученная на ее основе проверочная.

Передачик (Прд 1) на несущей частоте  $f_1$  с помощью антенной системы излучает в основном канале сигнал информационной последовательности  $S_{IN}$ , а другой передачик (Прд 2) на несущей частоте  $f_2$  излучает в основном канале последовательность символов, которую получает с выхода блока Комм 1. Блок Комм 1 на свой выход подключает один из входных сигналов на основе управляющей информации, полученной со служебных каналов приемников (Прм 1 и Прм 2). Управляющая информация передается со станции другой стороны и формируется на основе уровней анализа принятых там разнесенных сигналов на несущих частотах  $f_1$  и  $f_2$ .

В приемниках (Прм 1 и Прм 2) принимаются и основные, и служебные сигналы. Основные сигналы направляются в блок комбинирования

(БК) и в декодер блочного кода (ДК). В блоке БК осуществляется комбинирование принятых сигналов одним из методов. В блоке ДК на основе поступивших информационной и проверочной частей общего информационного блока производится исправление возникших ошибок. В случае, если в принятом блоке число ошибок превышает допустимое, то информационная часть подается на выход ДК без обработки.

Для обоих этих вариантов на обработку принятой последовательности символов блоку ДК отводится время формирования  $T_{F2}$ , т.е. через этот интервал времени обработанная последовательность символов начинает поступать на его выход. На этот же интервал выходной сигнал блока БК задерживается по времени в блоке задержки (БЗ2). Таким образом, на входы коммутатора (Комм 2) непрерывно поступает одна и та же последовательность информационных символов, но полученная с помощью комбинирования и с помощью разнесенного кодирования.

Сигнал коммутатора Комм 2 управляется пороговым устройством (ПУ), которое непрерывно анализирует уровни сигналов, поступающих на приемники на несущих частотах  $f_3$  и  $f_4$ . Если при данных текущих уровнях сигналов на противоположной стороне лучше использовать «классическое» разнесение, то с помощью управляющего сигнала, передаваемого в служебных каналах передатчиков Прд 1 и Прд 2, коммутатор Комм 1 противоположной стороны подключает в соответствующий канал разнесения информационную последовательность символов. Если лучше использовать разнесенное кодирование, то подключается проверочная последовательность. Одновременно и коммутатор Комм 2 данной стороны переключает на свой выход сигнал, полученный комбинированием или декодированием.

Таким образом, каждая сторона непрерывно анализирует сигналы, принимаемые с другой стороны, и управляет используемым в данный момент методом формирования сигналов на другой стороне и одновременно переключает аппаратуру своей станции на обработку принятых сигналов в соответствии с используемым методом. Получаемый на выходе станции сигнал  $S_{OUT}$  повторяет сигнал  $S_{IN}$  и в каждый момент оказывается сформированным тем из методов, который при текущих уровнях сигнала может обеспечить наилучшую помехоустойчивость.

### Выводы

1. Частотно-разнесенную передачу сигналов можно использовать как в «классическом» варианте, так и в форме разнесенного кодирования, когда поток информационных символов допол-

нительно кодируется и по разнесенным каналам передаются различные части закодированного сигнала.

2. В зависимости от уровней принимаемых сигналов, применяемого вида модуляции и параметров разнесенного кодирования преимущества в помехоустойчивости имеет либо один, либо другой из методов.

3. Возможно объединение преимуществ обоих методов в форме составного управления передачей сигналов, когда используется тот из методов, который в текущий момент может обеспечить большую помехоустойчивость.

4. Использование составной процедуры управления позволяет более эффективно приме-

нять частотный ресурс системы передачи информации.

#### **Библиографический список**

1. Полушин П.А., Самойлов А.Г. Избыточность сигналов в радиосвязи. – М.: Радиотехника, 2007. – 256 с.
2. Полушин П.А. Возможности метода разнесенного кодирования //Материалы 7-й МНТК «Перспективные технологии в средствах передачи информации», Владимир, 10-12 октября 2007. – С. 198–199.
3. Склад Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. – М.: Изд. дом “Вильямс”, 2003. – 1104 с.
4. Полушин П.А. Методы борьбы с помехами и искажениями. – LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, Germany, 2011. – 341 с.

УДК 681.515

*А.И. Бобиков, С.А. Сивов, У.Ю. Князева, А.С. Лимонова*

## **НЕЧЕТКОЕ АДАПТИВНОЕ СУПЕРВИЗОРНОЕ СЛЕДЯЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ ПЕРВОГО ПОРЯДКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ ТАКАГИ - СУГЕНО**

*Нечеткое супервизорное управление показывает достаточно хорошие свойства. Однако две функции, а именно нечеткие обратная связь и супервизорное управление, проектируются на основе конкретного объекта управления. Другими словами, они могут выполнять свою работу для известного объекта управления. В этой статье рассматриваемая динамическая модель объекта может быть неизвестна. Кроме того, мы предлагаем нечеткие модели Такаги - Сугено для моделирования этих двух неизвестных функций. Предложенный подход относится к непрямому адаптивному нечеткому управлению при постоянном задающем воздействии. Теорема Ляпунова и лемма Барбалата применяются для законов обновления параметров управляющего устройства, которые обеспечивают ограниченность всех переменных системы и асимптотическое отслеживание выходом системы постоянного задающего воздействия. В заключение предлагаемый метод успешно применен для объекта в виде уравнительного бака, чтобы убедиться в его работоспособности для следящего управления.*

**Ключевые слова:** модель Такаги - Сугено, адаптивный нечеткий регулятор, нечеткая обратная связь, нечеткое супервизорное управление.

**Введение.** В работах [1,2] была рассмотрена задача проектирования нечеткого супервизорного управления с обратной связью для нелинейных объектов первого порядка. Однако использование такого способа приемлемо лишь в случае, когда параметры объекта известны точно и фиксированы в течение всего времени работы системы. В противном случае наблюдается ошибка после окончания переходного процесса или даже неустойчивость системы

управления. В реальных условиях работы объекта его параметры не остаются неизменными и непредсказуемо варьируются под влиянием внешних воздействий и параметрических возмущений. Для устранения проблем, связанных с подобным поведением объекта, в теории нечеткого управления используют адаптивное управление, связанное с применением адаптивных нечетких регуляторов. В зависимости от структуры различают два класса адаптивных

нечетких регуляторов [3].

Адаптивное управление стремится управлять объектом с заранее неизвестными постоянными или медленно меняющимися параметрами. Основная идея: оценить онлайн неопределенности объекта или параметры регулятора онлайн, опираясь на измеримые сигналы системы, и использовать полученные оценки параметров для вычисления управления.

Причина применения: 1) свойства объекта могут быть неопределенными еще до работы системы управления; 2) динамика объекта может быть хорошо известна априорно, но непредсказуемые изменения параметров возникают в процессе управления объектом.

Один из этих классов порождает так называемое прямое нечеткое управление, а другой - косвенное (непрямое) нечеткое управление. В случае прямого нечеткого управления мы рассматриваем нечеткие логические модели в качестве явных моделей искомым регуляторов. Например, большинство самоорганизующихся нечетких регуляторов относится к первому классу, так как база правил используется как регулятор и существует критерий качества, который связывает ошибки управления с ошибками в управляющем воздействии с целью обновить (настроить) базу правил. Напротив, в случае косвенного адаптивного управления нечеткие логические модели используются как явные модели объектов управления. Затем параметры модели используются, чтобы обновить (настроить) параметры заранее предопределенного закона управления или регулятора, с учетом предположения, что нечеткие логические модели достаточно точно аппроксимируют поведение реального объекта [21]. Соответствующие законы адаптации играют важную роль в оценке параметров нечеткой логической модели, представляющей объект. Причем, как мы уже отметили, параметры последнего являются неопределенными или изменяются в процессе управления объектом. Отсюда большое значение имеет оценка параметров для нечеткой модели объекта при проектировании косвенного адаптивного нечеткого управления. До сего времени были проведены различные исследования, связанные с оценкой параметров нечетких логических моделей, с учетом измерения входа и выхода объекта (управляющего воздействия и управляемой величины) [4-8].

Однако большинство из этих подходов представляют собой оффлайн алгоритмы и не применимы в ситуациях, когда требуется обработка информации в реальном времени, в таких ситуациях, которые характерны для адаптивного

управления и обработки сигналов. Хотя последовательное адаптивное нечеткое моделирование было предложено в [9], оно не может быть рассмотрено как онлайн алгоритм в практическом смысле, так как требует этапа оффлайн обучения, прежде чем приступить к адаптации онлайн. Более того, большинство онлайн схем оценки параметров, предложенных для косвенного адаптивного нечеткого управления [10-14], может быть применено к специфическим нечетким регуляторам, в основном к регуляторам, базирующимся на линеаризации обратной связи. Чтобы избежать этих недостатков, в [15] представлен новый метод онлайн проектирования и анализа алгоритма оценки параметров для модели объекта, структура которого представлена Т-С нечеткой моделью. Этот метод будет использован в данной статье для настройки параметров нечеткого супервизорного регулятора.

**Цель работы.** Используя нечеткие модели Такаги - Сугено [4], построить адаптивный нечеткий регулятор для нелинейного динамического объекта первого порядка с неизвестными параметрами, обеспечивающий безошибочное воспроизведение последним постоянного задающего воздействия после окончания переходного процесса.

**Нечеткое управление при фиксированных параметрах.** Пусть известна глобальная непрерывная нечеткая модель Такаги - Сугено непрерывного нелинейного объекта первого порядка

Если у есть  $A_l$ ,

$$\text{То } \dot{y} = a_l y(t) + b_l u(t), \quad l = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где  $N$  – число правил,  $A_l (j=1, 2, \dots, n)$  – нечеткие множества,  $u(t)$  – управляющий сигнал,  $y(t)$  – управляемая величина и  $(a_l, b_l)$  – коэффициенты  $l$ -й локальной динамической модели объекта.

Цель управления заключается в том, что требуется построить нечеткий регулятор, обеспечивающий безошибочное воспроизведение постоянного задающего воздействия  $v=const$  после окончания переходного процесса.

Используя стандартный метод нечеткой инференции [4], т.е. используя сингтонную фаззификацию, алгебраическое произведение для вычисления степени истинности правил и центр тяжести для дефаззификации, выход ТС нечеткой модели (1) можно представить как

$$\begin{aligned} \dot{y}(t) &= \sum_{l=1}^N \lambda_l(y) [a_l y(t) + b_l u(t)] = \\ &= a(y) y(t) + b(y) u(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$a(y) = \sum_{l=1}^N \lambda_l(y) a_l, \quad b(y) = \sum_{l=1}^N \lambda_l(y) b_l. \quad (3)$$

$\lambda_l(y)$  есть нормированная степень истинности  $l$ -го правила, определяемая выражением

$$\lambda_l(y) = \frac{\mu_l(y)}{\sum_{i=1}^N \mu_i(y)}. \quad (4)$$

$\mu_i(y)$  есть степень принадлежности управляемой величины к нечеткому множеству  $A_i$ , другими словами, степень истинности  $i$ -го правила, причем

$$\lambda_l(x) \geq 0, \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i(x) = 1. \quad (5)$$

Заметим, что модель (2) является нелинейной моделью, т.к. функции принадлежности являются нелинейными функциями управляемой величины. Модель (2) фактически является нечеткой моделью объекта управления.

Если известны коэффициенты для всех локальных динамических моделей ( $a_l, b_l$ ), то, выбирая регулятор с нечеткой обратной связью и супервизорным управлением, можно добиться цели управления.

Нечеткая обратная связь по выходу для этого объекта определяется как

$$u_{oc}(t) = v - \sum_{j=1}^N \lambda_j(y) k_j y(t) = v - k(y) y(t),$$

где

$$k_j = \frac{-p_l + a_l}{b_l} \quad (6)$$

есть скалярный коэффициент локальной обратной связи по выходу;

$$k(y) = \sum_{j=1}^N \lambda_j(y) k_j \quad (7)$$

есть скалярный коэффициент глобальной обратной связи по выходу;  $p_l$  есть полюса локальной замкнутой системы. Отсюда выражение (2) можно переписать в виде

$$\dot{y}(t) = f(y) y(t) + b(y) v,$$

где

$$\begin{aligned} f(y) &= \sum_{l=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_l(y) \lambda_j(y) (a_l - b_l k_j) = \\ &= a(y) - b(y) k(y) = \sum_{l=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_l(y) \lambda_j(y) a_{lj}. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь

$$a_{lj} = a_l - b_l k_j. \quad (9)$$

Нетрудно убедиться, что полученная система не в состоянии обрабатывать не равное нулю задающее воздействие  $v \neq 0$ , другими словами, такая система не удовлетворяет требованию нулевой установившейся ошибки  $\varepsilon_{уст} = v - y_{уст}$ , где  $y_{уст}$  – установившееся значение выхода системы.

Предполагая, что  $b(y) \neq 0$  (это условие выполняется для многих объектов), для достижения поставленной задачи введем супервизорное управление путем замены задающего воздействия  $v$  на новое задающее воздействие  $\bar{v}$ , связанное с  $v$  выражением

$$\bar{v} = k_c(y) v,$$

где

$$k_c(y) = -f(y) / b(y), \quad (10)$$

так что в результате выходной сигнал регулятора с нечеткой обратной связью по выходу и супервизорным управлением определяется как

$$u(t) = -\frac{f(y)}{b(y)} v - k(y) y(t). \quad (11)$$

При этом уравнение замкнутой нечеткой системы управления с супервизорным управлением

$$\dot{y}(t) = f(y) [y(t) - v] \quad (12)$$

позволяет представить уравнение для ошибки слежения  $\varepsilon(t) = v - y(t)$  в виде

$$\dot{\varepsilon}(t) = f(y) \varepsilon(t). \quad (13)$$

Используя прямой метод Ляпунова, можно найти условие устойчивости

$$f(y) < 0 \quad (14)$$

для системы (12), при выполнении которого ошибка слежения асимптотически стремится к нулю. Полученное условие содержит ограничения на выбор полюсов  $p_l$  локальных замкнутых подсистем, следовательно, и на выбор коэффициентов  $k_l$  локальных обратных связей по выходу в неявном виде. С помощью соответствующего преобразования выражения (14) в [1] получено следующее достаточное условие глобальной асимптотической устойчивости:

$$\begin{aligned} p_l < 0, \quad l = \overline{1, N}, \\ a_{jl} + a_{lj} < 0, \quad l < j \leq N. \end{aligned} \quad (15)$$

Если выбрать полюсы всех локальных подсистем равными  $p^*$ , так что

$$p_1 = p_2 = \dots = p_N = p^*,$$

то условие (15) можно связать явно с полюсом  $p^*$  и коэффициентами  $a_l$  и  $b_l$  локальных подсистем:

$$p^* < 0, \quad p^* < g = \min_{1 \leq l \leq N} c_{ij}, \quad l = \overline{1, N}, \quad (16)$$

где

$$c_{ij} = \frac{b_l - b_j}{b_j^2 + b_l^2} (a_j b_l - a_l b_j). \quad (16a)$$

Второе из условий (16) нужно учитывать только в случае, если  $g < 0$ . При этом оно ограничивает верхний предел допустимого с точки зрения устойчивости значения  $p^*$  величиной  $g$ . В противном случае, когда  $g \geq 0$ , при выборе  $p^*$  можно ограничиться выполнением необходимого условия, т.е. первого из условий (16). Надо помнить о том, что величина  $g$  определяет достаточное условие устойчивости и тем самым является консервативным условием. Практически допустимое значение  $p^*$  может быть больше  $g$ .

**Адаптация параметров закона супервизорного управления и нечеткой обратной связи.** В ходе эксплуатации объекта управления и действия на него внешних факторов окружающей среды его параметры будут отклоняться от номинальных значений, принятых при расчете коэффициентов нечеткой обратной связи и супервизорного управления. В результате полученная в предыдущем пункте нечеткая система управления окажется не способной качественно осуществлять управление и, возможно, станет вообще неустойчивой, другими словами, станет неработоспособной. Чтобы избежать этих нежелательных последствий, используем адаптацию коэффициентов нечеткой обратной связи и супервизорного управления, т.е. применим непрямой адаптивный закон управления. При этом задача адаптации распадается на две подзадачи.

*Первая из подзадач адаптации* заключается в оценке неизвестных параметров объекта, описываемого нечеткой моделью (2)

$$\dot{y}(t) = a(t)y(t) + b(t)u(t), \quad (17)$$

с помощью построения его идентификационной модели. Здесь ради простоты понимания процесса адаптации использованы временные обозначения  $a(t)$  вместо  $a(y)$  и  $b(t)$  вместо  $b(y)$ .

Для решения данной задачи воспользуемся онлайн оценкой параметров объекта [15] и сначала введем в рассмотрение параллельную нечеткую идентификационную модель объекта [16]

$$\dot{y}_p(t) = \hat{a}(t)y(t) + \hat{b}(t)u(t), \quad (18)$$

где коэффициенты

$$\hat{a}(t) = \sum_{l=1}^N \lambda_l(y) \hat{a}_l, \quad \hat{b}(t) = \sum_{l=1}^N \lambda_l(y) \hat{b}_l \quad (19)$$

определяются через оценки  $\hat{a}_l, \hat{b}_l$  соответствующих параметров объекта.

В дальнейшем будем использовать последовательно-параллельную идентификационную модель объекта, определяющую оценку выхода объекта  $\hat{y}(t)$ , связанную с выходным сигналом параллельной модели  $y_p(t)$  соотношением

$$\dot{\hat{y}}(t) = a^*[y(t) - \hat{y}(t)] + \dot{y}_p(t). \quad (20)$$

Здесь  $a^* > 0$  – постоянная, устанавливаемая проектировщиком системы в процессе настройки. При этом ошибка моделирования  $e(t) = \hat{y}(t) - y(t)$ , представляющая собой разность между выходом идентификационной модели объекта и выходом самой модели объекта, описывается следующим выражением:

$$\dot{e}(t) = -a^*e(t) - \sum_{l=1}^N \lambda_l(y) [\tilde{a}_l(t)y(t) + \tilde{b}_l(t)u(t)], \quad (21)$$

где значения

$$\tilde{a}_l = \hat{a}_l - a_l, \quad \tilde{b}_l = \hat{b}_l - b_l \quad (22)$$

представляют собой неизвестные изменения коэффициентов модели объекта управления относительно номинальных значений.

Найдем условия, при выполнении которых разность  $e(t) = \varepsilon(t) - \hat{\varepsilon}(t)$ , где величину  $\hat{\varepsilon}(t) = v - \hat{y}(t)$  можно рассматривать как оценку ошибки слежения, другими словами, ошибка моделирования  $e(t) = \hat{y}(t) - y(t)$  с течением времени стремится к нулю. С этой целью выберем кандидатом на функцию Ляпунова следующую функцию:

$$V(t) = \frac{1}{2}e^2(t) + \frac{1}{2} \sum_{l=1}^N \frac{[\tilde{a}_l(t)]^2}{r_{1l}} + \frac{1}{2} \sum_{l=1}^N \frac{[\tilde{b}_l(t)]^2}{r_{2l}}, \quad (23)$$

где  $r_{1l}, r_{2l} > 0$  – постоянные (коэффициенты настройки).

При этом ее производная

$$\dot{V}(t) = \dot{e}(t)e(t) + \sum_{l=1}^N \frac{\tilde{a}_l(t)\dot{\tilde{a}}_l(t)}{r_{1l}} + \sum_{l=1}^N \frac{\tilde{b}_l(t)\dot{\tilde{b}}_l(t)}{r_{2l}}. \quad (24)$$

Подставляя выражение (21) в (24), получаем



$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & -a^* e^2(t) - \sum_{l=1}^N \lambda_l(y) \tilde{a}_l(t) y(t) e(t) - \\ & - \sum_{l=1}^N \lambda_l(y) \tilde{b}_l(t) u(t) e(t) + \sum_{l=1}^N \frac{\tilde{a}_l(t) \dot{\tilde{a}}_l(t)}{r_{1l}} + \\ & + \sum_{l=1}^N \frac{\tilde{b}_l(t) \dot{\tilde{b}}_l(t)}{r_{2l}} = -a^* e^2(t) + \\ & + \sum_{l=1}^N \left[ -\lambda_l(y) y(t) e(t) + \frac{\dot{\tilde{a}}_l(t)}{r_{1l}} \right] \tilde{a}_l(t) + \\ & + \sum_{l=1}^N \left[ -\lambda_l(y) u(t) e(t) + \frac{\dot{\tilde{b}}_l(t)}{r_{2l}} \right] \tilde{b}_l(t). \end{aligned} \quad (25)$$

Выбираем

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{a}}_l(t) &= \lambda_l(y) r_{1l} y(t) e(t) = \dot{\hat{a}}_l(t), \\ \dot{\tilde{b}}_l(t) &= \lambda_l(y) r_{2l} u(t) e(t) = \dot{\hat{b}}_l(t), \end{aligned} \quad (26)$$

тогда, чтобы выполнялось условие  $\dot{V}(t) \leq 0$ , достаточно взять  $a^* > 0$ . Отрицательная полуопределенность производной  $\dot{V}$ , вытекающая из (26), гарантирует, что  $e(t)$ ,  $\tilde{a}_l(t)$  и  $\tilde{b}_l(t)$  будут ограничены. Однако теорема об инвариантном множестве [17, 18] не может быть использована для суждения о сходимости ошибки моделирования к нулю вследствие того, что устройство, описываемое уравнениями (21), (26) и содержащее в качестве переменных состояния  $e(t)$ ,  $\tilde{a}_l(t)$  и  $\tilde{b}_l(t)$ , является неавтономной системой. Чтобы использовать лемму Барбалата [17,19], позволяющую решать вопросы, связанные с устойчивостью неавтономных систем, надо оценить равномерную непрерывность  $\dot{V}$ . Производная от  $\dot{V}$  с учетом (21) и (26)

$$\begin{aligned} \ddot{V}(t) = & -2e(t) \left\{ -a^* e(t) - \right. \\ & \left. - \sum_{l=1}^N \lambda_l(y) \left[ \tilde{a}_l(t) y(t) + \tilde{b}_l(t) u(t) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (27)$$

Из этого выражения следует, что вторая производная  $\ddot{V}(t)$  ограничена, так как по предположению сигналы  $u(t)$  и  $y(t)$  ограничены и  $e(t)$ ,  $\tilde{a}_l(t)$  и  $\tilde{b}_l(t)$ , как было показано выше, тоже ограничены. Отсюда  $\dot{V}$  является равномерно непрерывной функцией. Тогда, применяя лемму Барбалата [20], приходим к выводу, что  $e(t) \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ . Заметим, однако, что, хотя ошибка  $e$  стремится к нулю, динамика, опи-

сываемая уравнениями (21) и (26), не является асимптотически устойчивой. Поэтому гарантирована только ограниченность изменений коэффициентов  $\tilde{a}_l(t)$  и  $\tilde{b}_l(t)$ . На рисунке 1 представлена структура устройства оценки параметров модели объекта, построенная на основе уравнений (17), (20, 21) и (26).

Вторая из подзадач адаптации связана с настройкой нечеткой обратной связи и supervisory управления, т.е. с настройкой коэффициентов локальных обратных связей по выходу. Естественно в данном случае использовать для закона управления тот же закон (11), что применялся при фиксированных параметрах объекта, заменяя параметры объекта  $a_l(t)$ ,  $b_l(t)$  и коэффициенты усиления  $k_l$  локальных обратных связей по состоянию их оценками  $\hat{a}_l(t)$ ,  $\hat{b}_l(t)$  и

$$\hat{k}_l = \frac{\hat{a}_l - p_l}{\hat{b}_l} \quad (28)$$

соответственно.

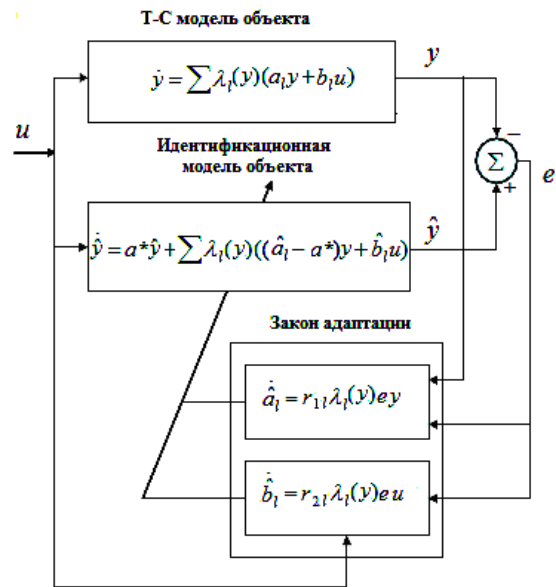


Рисунок 1

Управление тогда будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} u(t) = & - \sum_{j=1}^N \lambda_j(y) \hat{k}_j y(t) - \frac{\hat{f}(t)}{\hat{b}(t)} v = \\ = & - \hat{k}(t) y(t) - \frac{\hat{f}(t)}{\hat{b}(t)} v, \end{aligned} \quad (29)$$

где

$$\hat{f}(t) = \hat{a}(t) - \hat{b}(t) \hat{k}(t). \quad (30)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \hat{k}(t) &= \sum_{l=1}^N \lambda_l(y) \hat{k}_l, \quad \hat{a}(t) = \sum_{l=1}^N \lambda_l(y) \hat{a}_l, \\ \hat{b}(t) &= \sum_{l=1}^N \lambda_l(y) \hat{b}_l \end{aligned} \quad (31)$$

представляют собой соответственно оценку глобального коэффициента обратной связи по состоянию  $k(t)$  и оценки глобальных параметров объекта  $a_i(t)$ ,  $b_i(t)$ . Тогда выражение (20) с учетом (30) для выхода модели объекта можно записать так:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{y}}(t) &= a^*[y(t) - \hat{y}(t)] + \\ &+ \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^N \lambda_j(y) \lambda_l(y) (\hat{a}_l - \hat{b}_l \hat{k}_j) y(t) - \hat{f}(t)v = \\ &= a^*[y(t) - \hat{y}(t)] + \hat{f}(t)[y(t) - v]. \end{aligned}$$

Учитывая, что  $\dot{\hat{\varepsilon}}(t) = -\dot{\hat{y}}(t)$ , находим уравнение для оценки ошибки слежения  $\hat{\varepsilon}(t) = v - \hat{y}(t)$ , другими словами, уравнение для ошибки воспроизведения постоянного сигнала при использовании последовательно-параллельной идентификационной модели объекта:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\varepsilon}}(t) &= -a^*[\hat{\varepsilon}(t) - \varepsilon(t)] + \hat{f}(t)\varepsilon(t) = \\ &= -a^*\hat{\varepsilon}(t) + [a^* + \hat{f}(t)]\varepsilon(t). \end{aligned} \quad (32)$$

Принимая во внимание, что разность  $\varepsilon(t) - \hat{\varepsilon}(t)$  совпадает с ошибкой моделирования, так как

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) - \hat{\varepsilon}(t) &= v - y(t) - v + \hat{y}(t) = \\ &= \hat{y}(t) - y(t) = e(t), \end{aligned} \quad (33)$$

находим уравнение для оценки ошибки слежения в другом виде:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\varepsilon}}(t) &= \hat{f}(t)\hat{\varepsilon}(t) + [a^* + \hat{f}(t)]e(t), \\ \hat{\varepsilon}(0) &= v. \end{aligned} \quad (34)$$

Как показано выше, разность  $e(t) = \varepsilon(t) - \hat{\varepsilon}(t)$  стремится к нулю при  $t \rightarrow \infty$ . Следовательно, ошибка слежения и ее оценка являются ограниченными,  $\varepsilon \in L_\infty$ ,  $\hat{\varepsilon} \in L_\infty$ , т.е. принадлежат пространству  $L_\infty$ . Тогда из выражения (32) в силу ограниченности  $\hat{f}(y)$  [мы заменили обозначение  $\hat{f}(t)$  на  $\hat{f}(y)$ ] вытекает ограниченность первой производной оценки ошибки:

$$|\dot{\hat{\varepsilon}}(t)| \leq a^* \|\hat{\varepsilon}(t)\| + |[a^* + \hat{f}(y)]| \|\varepsilon(t)\|. \quad (35)$$

Однако ограниченность оценки ошибки слежения и ограниченность первой производной оценки ошибки слежения еще не говорят о том, что эта оценка с течением времени стремится к

нулю. Чтобы показать, что такое стремление имеет место, выберем в качестве кандидата на функцию Ляпунова квадратичную функцию

$$V_\varepsilon(t) = \frac{1}{2} \hat{\varepsilon}^2(t), \quad (36)$$

производная от которой с учетом (34) имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{V}_\varepsilon(t) &= \hat{\varepsilon}(t)\dot{\hat{\varepsilon}}(t) = \hat{f}(y)\hat{\varepsilon}^2(t) + \\ &+ [a^* + \hat{f}(y)]e(t)\hat{\varepsilon}(t). \end{aligned} \quad (37)$$

Принимая во внимание, что абсолютное значение ошибки моделирования  $|e(t)|$  значительно меньше абсолютного значения оценки ошибки слежения  $|\hat{\varepsilon}(t)|$  (это обусловлено хорошими аппроксимирующими свойствами ТС нечетких моделей) и что  $|a^* + \hat{f}(y)| < a^*$ , получаем неравенство

$$|\hat{\varepsilon}(t)| \geq \frac{|a^* + \hat{f}(y)|}{|\hat{f}(y)|} |e(t)| \geq \frac{a^*}{|\hat{f}(y)|} |e(t)|. \quad (38)$$

Здесь мы предполагаем, что при изменении коэффициентов модели объекта функция  $\hat{f}(y)$  имеет тот же знак, что и функция  $f(y)$ , т.е. функция  $\hat{f}(y)$  является отрицательной,  $\hat{f}(y) < 0$ , и что  $a^*$  выбрано соответствующим образом. Отсюда для всех значений  $\hat{\varepsilon}(t)$ , удовлетворяющих условию (38),

$$\begin{aligned} \dot{V}_\varepsilon(t) &= \hat{f}(y)\hat{\varepsilon}^2(t) + [a^* + \hat{f}(y)]e(t)\hat{\varepsilon}(t) \leq \\ &\leq -|\hat{f}(y)|\hat{\varepsilon}^2(t). \end{aligned} \quad (39)$$

Теперь покажем, что  $\hat{\varepsilon} \in L_2$ , т.е. принадлежит пространству  $L_2$ . Из (36) и (39) мы заключаем, что  $V_\varepsilon(t)$  ограничена снизу значением  $V_\varepsilon(0) = \hat{\varepsilon}^2(0)/2$  и не возрастает со временем.

Тогда, интегрируя обе части выражения (39) и полагая, что функция  $|\hat{f}(y)|$  ограничена значением  $\delta$ , получаем

$$\begin{aligned} \left| \int_0^t |\hat{f}(y)| \hat{\varepsilon}^2(\tau) d\tau \right| &\leq \delta \int_0^t \hat{\varepsilon}^2(\tau) d\tau \leq \\ &\leq (|V_\varepsilon(0)| + |V_\varepsilon(t)|). \end{aligned} \quad (40)$$

Следовательно,  $\hat{\varepsilon} \in L_2$ . Итак,  $\hat{\varepsilon} \in L_\infty$ ,  $\dot{\hat{\varepsilon}} \in L_\infty$  и  $\hat{\varepsilon} \in L_\infty \cap L_2$ . Используя лемму Барбалата [17, 19, 20], приходим к выводу, что  $\hat{\varepsilon}(t) \rightarrow 0$ ,  $t \rightarrow \infty$ . Так как  $e(t) = \varepsilon(t) - \hat{\varepsilon}(t)$  и  $\hat{\varepsilon}(t)$  с течением времени стремятся к нулю, то ошибка слежения  $\varepsilon(t)$  с течением времени (асимптотически) также стремится к нулю, т.е.  $\varepsilon(t) \rightarrow 0$ ,  $t \rightarrow \infty$ , и отсюда адаптивная система

является асимптотически устойчивой, если  $\hat{f}(y) < 0$ .

Так как функция  $\hat{f}(y) = \hat{a}(y) - \hat{b}(y)\hat{k}(y)$  аналогична функции  $f(y) = a(y) - b(y)k(y)$ , определяемой (8), то условие отрицательности  $\hat{f}(y) < 0$ ,

$$p_l < 0, \quad l = \overline{1, N}, \quad (41)$$

$$\hat{a}_{jl} + \hat{a}_{lj} < 0, \quad l < j \leq N,$$

вытекает из условия отрицательности (15) функции  $f(y)$ . Если выбрать полюсы всех локальных подсистем равными  $p^*$ , то на основании (16) получаем достаточное условие асимптотической устойчивости адаптивной системы

$$p^* < 0, \quad p^* < \frac{\hat{b}_l - \hat{b}_j}{\hat{b}_j^2 + \hat{b}_l^2} (\hat{a}_j \hat{b}_l - \hat{a}_l \hat{b}_j), \quad (42)$$

$$l < j \leq N.$$

Свяжем последнее условие с вариациями коэффициентов модели объекта относительно номинальных значений. Предположим, что известны для всех коэффициентов относительные границы вариаций, определяемые одним и тем же значением  $d$ , так что

$$\hat{a}_l \leq (1+d)a_l, \quad \hat{b}_l \leq (1+d)b_l, \quad l = \overline{1, N}. \quad (43)$$

Тогда для самого неблагоприятного случая из (42) и (43) получаем

$$p^* < 0, \quad p^* < (1+d) \frac{b_l - b_j}{b_j^2 + b_l^2} (a_j b_l - a_l b_j), \quad (44)$$

$$l < j \leq N.$$

Таким образом, вариация параметров коэффициентов влияет на допустимое с точки зрения устойчивости значение полюса  $p^*$  системы управления.

**Пример симуляции системы.** В качестве объекта управления рассмотрим уравнительный бак с жидкостью бочкообразной формы [1, 2]. Мы используем ТС нечеткую модель, полученную в [1], как описание данного объекта. В [1] динамические свойства объекта аппроксимированы следующими пятью правилами

Если  $h(t)$  есть  $A_1$ ,

$$\text{то } \dot{h}(t) = -3,3333h(t) + 0,4762u(t).$$

Если  $h(t)$  есть  $A_2$ ,

$$\text{то } \dot{h}(t) = -0,3111h(t) + 0,2222u(t).$$

Если  $h(t)$  есть  $A_3$ ,

$$\text{то } \dot{h}(t) = -0,1414h(t) + 0,1429u(t).$$

Если  $h(t)$  есть  $A_4$ ,

$$\text{то } \dot{h}(t) = -0,0851h(t) + 0,1053u(t).$$

Если  $h(t)$  есть  $A_5$ ,

$$\text{то } \dot{h}(t) = -0,0583h(t) + 0,08333u(t).$$

Функции принадлежности  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$  показаны на рисунке 2.

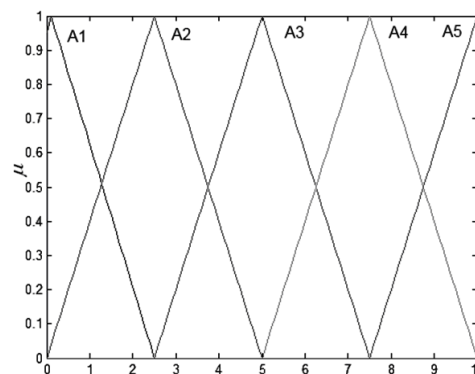


Рисунок 2

Применяя формулы (16) и (16а), находим значения

$$\begin{aligned} c_{12} &= 0,545, \quad c_{13} = 0,5515, \quad c_{14} = -0,4841, \\ c_{15} &= 0,4201, \quad c_{23} = 0,0148, \quad c_{24} = 0,0268, \\ c_{25} &= 0,0328, \quad c_{34} = 0,0033, \quad c_{35} = 0,0328, \\ c_{45} &= -0,0016 \quad \text{и} \quad g = -0,0016. \end{aligned}$$

Выберем полюс замкнутой системы:  $p^* = -0,4 < g$  и найдем коэффициенты локальных обратных связей по состоянию

$$\begin{aligned} k_1 &= -6,1598, \quad k_2 = 0,4001, \quad k_3 = -1,8097, \\ k_4 &= 2,9905, \quad k_5 = 4,102. \end{aligned}$$

Оценим робастность системы к изменению параметров объекта управления. При этом система должна сохранять свои свойства при изменении параметров ОУ в пределах  $\pm 20\%$  от номинальных, полученных при идентификации объекта.

Перейдем к оценке робастных свойств разработанной системы. Установим параметры  $a_2$  и  $a_3$  объекта, которые соответствуют отклонению от номинальных значений на  $\pm 20\%$ . Проведем тестирование при значениях задающего воздействия  $v = 5$ . Остальные параметры при рассматриваемом задающем воздействии не оказывают существенного влияния на реакцию системы, поэтому оставим их без изменения. Результаты моделирования без адаптации показаны на рисунках 3, 4. Результаты моделирования с адаптацией показаны на рисунках 5, 6.

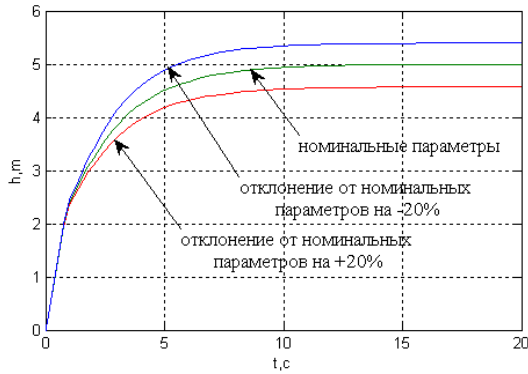


Рисунок 3

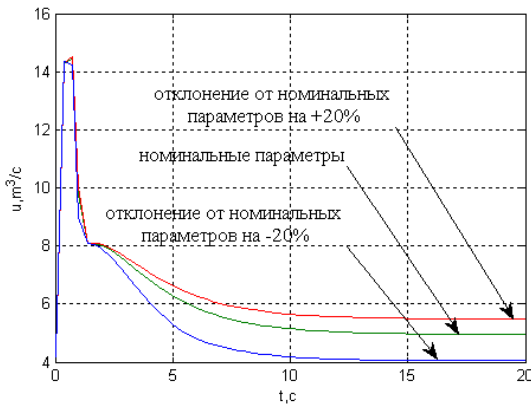


Рисунок 4

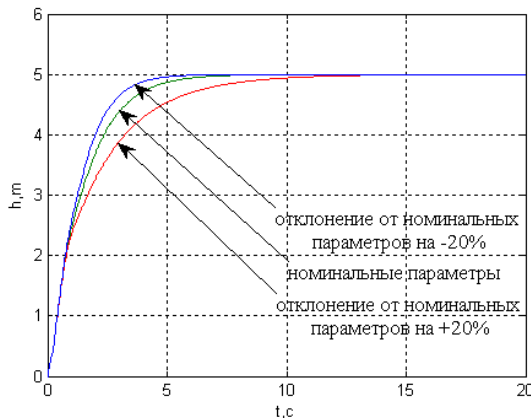


Рисунок 5

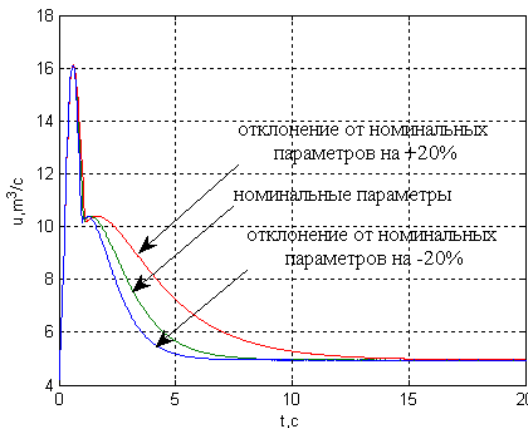


Рисунок 6

Как видим, разработанная система робастна к изменению параметров объекта управления.

При этом система сохраняет приемлемое качество переходного процесса в рамках достаточно больших отклонений параметров от номинальных. Точность обработки системой с адаптацией постоянного задающего воздействия не изменилась, другими словами, система "не чувствует" изменения параметров объекта управления и также безошибочно обрабатывает установленный уровень задающего воздействия. В отличие от системы без адаптации, для которой величина относительной установившейся ошибки составляет 7,4 % при отклонении параметров от номинальных значений на  $\pm 20\%$  и задающем воздействии  $v = 5$ .

**Заключение.** В статье рассмотрен новый метод нечеткого непрямого адаптивного управления нелинейными динамическими объектами первого порядка. На основе нечетких моделей Такаги - Сугено были сконструированы закон управления, включающий комбинацию нечеткой обратной связи и супервизорного управления, а также адаптивный закон обновления параметров идентификационной модели объекта управления и управляющего устройства.

При использовании этих законов гарантируется устойчивость замкнутой системы управления. Этот метод был применен для управления уравнительным баком с целью отслеживания постоянного задающего воздействия. Результаты компьютерной симуляции показали, что предлагаемая система может успешно осуществлять управление при неизвестных параметрах объекта управления.

#### Библиографический список

1. Бобиков А.И., Лимонова А.С. Нечеткое управление с прямой и обратной связями нелинейными объектами первого порядка // Информационные технологии: межвуз. сб. науч. тр. Рязань. 2011.
2. Бобиков А.И., Сивов С.А., Лимонова А.С. Нечеткое супервизорное управление объектами первого порядка // Вестник РГРТУ № 3 (выпуск 33). Рязань. 2010.
3. Wang L. X. Adaptive Fuzzy System and Control: Design and Stability Analysis. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. 1994.
4. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control // IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. Vol. SMC-15. No. 1. P. 110-132, Jan./Feb. 1985.
5. Sugeno M., Kang G. T. Structure identification of fuzzy model // Fuzzy Sets and Systems. Vol. 28. No.1. P. 15-33. 1988.
6. Sin S. K., de Figueiredo R. J. P. Fuzzy system design through fuzzy clustering and optimal defuzzification // Proc. of IEEE Int'l Conf. on Fuzzy Systems, San Francisco, Calif. P. 190-195. 1993.
7. Sugeno M., Yasukawa T. A Fuzzy logic based

approach to qualitative modeling //IEEE Trans. Fuzzy Syst. Vol. 1. No. 1. P. 7-31. 1993.

8. Sugeno M., Tanaka K. Successive identification of fuzzy model and its applications to prediction of a complex system //Fuzzy Sets and Systems. Vol. 42. No.3. P. 315-334. 1991.

9. Wang L. X. Stable adaptive fuzzy control of linear systems //IEEE Trans. Fuzzy Syst. Vol. 1. No. 2. P. 146-155. 1993.

10. Tsay D.L., Chung H.Y., Lee C. J. The adaptive control of nonlinear system using the Sugeno- type of fuzzy logic //IEEE Trans. Fuzzy Syst. Vol. 7. No. 2. P. 225-229. 1999.

11. Han H., Su C.V., Stepanenko Y. Adaptive control of class of nonlinear systems with nonlinearly parameterized fuzzy approximators //IEEE Trans. Fuzzy Syst. Vol. 9. No. 2. P. 315-323. 1999.

12. Bellomo D., Naso D., Babuska R. Adaptive fuzzy control of non-linear servo-drive: Theory and experimental results //Engineering Application of Artificial Intelligence. 21 (2008). P. 846-857.

13. Chen S.-S., Chang Y.-C., Chuang C. C., Song C.-C., Su S.-F. Adaptive Fuzzy Tracking Control of

Nonlinear Systems //WSEAS Trans. on Syst. and Contr. Issue 12. Vol. 2. 2007.

14. Hojati M., Gasor S. Hybrid Adaptive Fuzzy Identification and Control of Nonlinear Systems //IEEE Trans. Fuzzy Syst. Vol. 10. No. 2. P. 198-210. 2002.

15. Cho Y.W., Park C.W. On-Line Parameter Estimation Scheme for Uncertain Takagi-Sugeno Fuzzy Model //International Journal of Control, Automation, and Systems. Vol.2. No. 1. March 2004.

16. Ioannou P.A., Sun J. Robust Adaptive Control //Prentice Hall International Editions, New Jersey, 1996.

17. Khalil H. K. Nonlinear Systems //Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2002.

18. Slotine J.-J., Li W. Applied Nonlinear Control //Prentice Hall, 1991.

19. Vidyasagar M. Nonlinear System Analysis //Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993.

20. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы. - СПб.: Питер, 2006.

21. Castro J.L. Fuzzy logic controllers are universal approximators //Trans. On Systems, Man and Cybernetics. Vol.25. No. 4. P. 629-635. 1995.

УДК 338.984

**И.В. Савельева**

## УПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЕМ НАУКОЁМКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ С УЧЁТОМ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

*Изложены основные положения использования синергетического подхода в планировании на наукоёмком предприятии.*

**Ключевые слова:** *интерактивное планирование, синергетический эффект, наукоёмкое предприятие, аттрактор, синергетическое планирование.*

**Введение.** Развитие отечественных наукоёмких предприятий на сегодняшний день является наиболее актуальной задачей для российской промышленности.

Сегодня в связи с развитием синергетики как нового междисциплинарного направления в науке можно говорить о возможности применения её основных положений и принципов в управлении и организации производства. Эффективность управления развитием наукоёмкого предприятия во многом зависит от организации планирования. Поэтому применение синергетического подхода в плановой деятельности предприятия является наиболее актуальной и перспективной задачей.

### **Теоретические исследования**

Цель работы заключается в изложении основных положений использования синергетического подхода в планировании на наукоёмком предприятии и рассмотрении существующих проблем.

В настоящее время в Российской Федерации остро стоит проблема развития и модернизации производства. Не секрет, что российская промышленность значительно отстаёт от развитых стран мира по производству наукоёмкой высококачественной продукции. На предприятиях слабо внедряются передовые технологии в областях производства и управления. Уровень отставания российской промышленности от развитых стран мира составляет приблизительно тридцать лет. Это означает, что в этих странах уже давно развита nanoиндустрия, широко применяются биоинженерные, современные информационные технологии, на наукоёмких предприятиях уже давно внедрены и совершенствуются современные системы управления производством. Научно-технический уровень развитых стран мира соответствует 5-му, 6-му технологическому укладу, когда российский уровень соответствует только 4-му.

Поэтому на данном этапе экономического развития российским наукоёмким предприятиям необходима разработка стратегии на прорыв в областях высоких технологий и управлении производством.

Для разработки такой стратегии нужен новый подход в области управления и планирования деятельности наукоёмкого предприятия.

Таким новым направлением в производственном менеджменте является синергетический подход в планировании.

Планирование на наукоёмком предприятии является сложной многофункциональной системой, состоящей из множества взаимодействующих подсистем. Каждая подсистема представляет собой систему с обратными связями.

При этом она является инструментом для формирования синергии в производственно-экономической системе.

Организация производства не является первичным свойством, для любого предприятия первичной является дезорганизация. Понижение степени энтропии требует целенаправленных плановых мероприятий.

Планирование на предприятии представляет собой сложную систему, активно обменивающуюся информацией с производством. Таким образом, происходит уменьшение энтропии в производственно-экономической системе. Подобные явления происходят за счёт введения определённых параметров порядка. Энтропия в производственно-экономической системе уменьшается из-за взаимодействия с плановой системой.

Суть синергетического планирования на наукоёмком предприятии заключается в составлении системы планов, организованных по интерактивному принципу (управление развитием предприятия из будущего в настоящее).

Первоначально определяется цель развития, затем составляется образ будущего состояния предприятия и внешней среды.

Принцип интерактивного планирования реализуется через взаимодействие планов во времени и пространстве. Это наиболее сложный тип планирования, требующий проведения постоянного анализа состояния предприятия и внешней среды, проведения корректировок. Основная сложность здесь заключается в выходе производственно-экономической системы на заданный аттрактор в запланированный временной период. Однако именно такой тип планирования на наукоёмком предприятии обеспечивает «прорыв» в его развитии.

Интерактивное планирование на данном этапе развития представляет собой скорее идеаль-

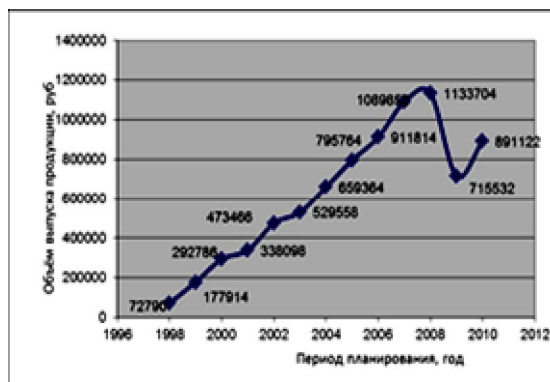
ное построение модели управления развитием. Основной принцип интерактивного планирования хорошо согласуется с принципом преактивного планирования, основанным на теории стратегий и стратегического менеджмента. Интерактивное планирование производственной программы базируется на соединении в настоящем опыта прошлого, основных тенденций текущего и желаемого будущего. При этом основной составной частью интерактивного планирования выступает прогнозирование.

Процесс развития представляет собой не только рост выпуска продукции, но и качественные изменения в производственно-экономической системе.

Сегодня система планирования на российских наукоёмких предприятиях ориентирована в основном на адаптацию к внешней среде.

На рисунке 1 изображён график выпуска гражданской продукции ОАО «ГРПЗ».

Здесь видно, что в течение десяти лет - с 1998 по 2008 годы предприятие ежегодно увеличивало выпуск продукции. В 2009 году наблюдается спад производства в связи с финансовым кризисом.



**Рисунок 1- Фактический план выпуска гражданской продукции ОАО «ГРПЗ»**

На рисунке 1 видна сильная зависимость внутренней среды предприятия от внешних условий.

Синергетическое планирование, организованное по интерактивному принципу, позволяет уменьшить это воздействие и сделать процесс развития наукоёмкого предприятия более устойчивым и определённым. Это достигается за счёт прогнозирования, постоянного мониторинга внешней среды и составления системы планов с их последующей корректировкой.

Система планирования и активно с ней взаимодействующая производственно-экономическая система являются одним из механизмов развития наукоёмкого предприятия. Надо отметить, что процесс самоорганизации в производственно-экономических системах – это не само-

произвольный процесс, который обусловлен только взаимодействием внешней и внутренней среды предприятия и его структурой. Основным и главным фактором, влияющим на многие процессы, происходящие в этих системах, является человек. Именно он закладывает основные параметры порядка системы, является владельцем процессов, происходящих на производстве, и исполнителем поставленных задач.

В связи с этим можно сказать, что процесс самоорганизации в производственно-экономической системе – это процесс, управляемый человеком, но с учётом знаний закономерностей развития систем.

Основное отличие природных систем от социально-экономических заключается в том, что процессы самоорганизации определяются свойствами самой материи.

Из этого можно сделать вывод: синергетический подход является одним из методов управления наукоёмким предприятием.

Так как планирование является важнейшим элементом управленческой деятельности, то можно говорить о синергетическом подходе в системе планирования наукоёмкого предприятия. Понижение степени энтропии в производственно-экономической системе требует целенаправленных плановых мероприятий.

Систему планирования на наукоёмком предприятии можно представить в виде чёрного ящика, преобразующего входы в выходы с действующей обратной связью.

С точки зрения системного анализа процессы управления, самоорганизации и развития невозможны без действия обратных связей. Положительная обратная связь является стимулирующим фактором в производственно-экономической системе. Она способствует усилению сигнала на входе и выводит систему из состояния равновесия. Потеря определённости позволяет перестроить ресурсные потоки и производственные факторы под изменившиеся условия во внешней среде.

Система планирования на наукоёмком предприятии является сложной многофункциональной системой, объединяющей деятельность всех подразделений для достижения поставленных целей во времени и пространстве. При этом для обеспечения роста и развития производства необходимо планировать деятельность предприятия таким образом, чтобы обеспечить получение дополнительной прибыли или увеличение доходности. Это достигается за счёт получения синергетических эффектов в производственно-экономической системе.

Для их формирования необходима гибкая

производственная и организационная структура предприятия.

С точки зрения системного анализа **синергетический эффект в производственно-экономической системе** – это суммарный эффект от взаимодействия различных элементов внутри системы.

Определение синергетического эффекта в производственно-экономической системе можно сформулировать следующим образом: синергетический эффект в производственно-экономической системе – суммарный эффект от сочетания различных производственных факторов деятельности наукоёмкого предприятия, который определяется как разность между фактическим экономическим эффектом (выполнением плана) и плановыми показателями перспективного развития производства. Величину синергетического эффекта можно определить по формуле [2]:

$$S_g = \Sigma V_{пл} - (\Sigma V_f - \Sigma Z_f), \quad (1)$$

где  $S_g$  – синергетический эффект в производственно-экономической системе;

$\Sigma V_{пл}$  – плановая выручка от реализации продукции;

$\Sigma V_f$  – фактическая выручка от реализации продукции;

$\Sigma Z_f$  – сумма фактических затрат, направленная на организацию работ по получению синергетического эффекта.

Наукоёмкое предприятие является открытой системой, в которой проходят процессы не только самоорганизации, но и саморегуляции. Согласно системному подходу предприятие можно рассматривать как сложную систему, состоящую из множества подсистем и их элементов, через которые проходят и взаимодействуют между собой различные виды производственных ресурсов. В результате этого осуществляется технологический процесс изготовления изделия. Под элементами производственной системы следует понимать: коллективы людей, оборудование, материалы, энергию, информацию, а также производственные процессы и функции [1]. Для увеличения потенциала наукоёмкого предприятия необходимо эффективное управление его ресурсами. Поэтому их сочетание должно соответствовать стратегическим целям предприятия.

На наукоёмком предприятии можно выделить производственно-экономическую систему. Основными её чертами является многообразие таких структурных элементов, как производственные цеха, отделы, хозяйства, лаборатории.

Производственно - экономическая система

на предприятии подразделяется на подсистемы в зависимости от природы её элементов. Такими подсистемами являются: техническая, технологическая, экономическая, подсистема совместного труда, организации труда. В свою очередь каждую из подсистем можно рассматривать как отдельную систему.

Исходя из вышесказанного можно выделить следующие виды синергии:

1. **Финансовая синергия** – достигается за счёт оптимального распределения финансовых ресурсов по центрам ответственности.

2. **Организационная синергия** – проявляется в сочетании связей элементов производственной системы при выборе оборудования в конкретном плановом задании (сменно-суточном), при подготовке и распределении ресурсов, разукрупнении производственного задания (квартальные, месячные, суточные) на более мелкие периоды времени и выборе точки контроля, при совместном использовании производственных мощностей, выборе оптимального варианта запуска деталей в обработку, оптимальной партии деталей, периода запуска – выпуска, выборе оптимальной продолжительности производственного цикла, маршрутного технологического процесса.

3. **Маркетинговая синергия** – достигается в результате распределения товаров по одним каналам сбыта, при управлении процессом продаж из единого центра, при использовании единых складских помещений, общей рекламе.

4. **Инвестиционная синергия** – заключается в увеличении экономического эффекта от объединения капитальных вложений при инвестиционном процессе.

5. **Научно-техническая синергия** – проявляется в сочетании и распределении запасов, ресурсов, степени проработанности планируемых изделий, сочетании проработанных идей, наличии научных заделов.

6. **Кадровая синергия** – возникает от согласованной работы в команде, а также за счёт специализации и кооперации труда.

Для получения эффекта синергии в производственно-экономической системе необходимо проводить не только анализ деятельности предприятия, но и синтез производственных факторов. Процесс формирования синергетического эффекта можно разделить на несколько этапов:

1) анализ производственных факторов на предприятии;

2) разработка системы согласованных и сбалансированных показателей;

3) синтез производственных факторов в единую систему;

4) определение наиболее выгодного сочетания производственных факторов и формирование синергетического эффекта в производственно-экономической системе.

Существуют следующие методы анализа и синтеза, которые могут применяться в планировании: (см. таблицу).

#### Классификация методов анализа и синтеза производственных факторов при стратегическом планировании

Методы анализа	Методы синтеза
Методы экспертных оценок	Эвристические методы синтеза систем
Метод анализа иерархий	Метод синтеза иерархий
SWOT – анализ	SWOT - синтез
Методы портфельного анализа	Комбинаторно-морфологический метод синтеза

Основой для формирования синергетического эффекта в производственно-экономической системе является система сбалансированных показателей, на базе которой можно произвести синтез наиболее оптимальных производственных факторов.

Большое влияние на предприятие оказывают изменения, происходящие во внешней среде.

Если сравнить графики годового темпа прироста реального ВВП России за 1992 – 2006 гг. на рисунке 2 с графиком фактического выполнения плана по выпуску гражданской продукции ОАО «ГРПЗ» на рисунке 1, то видно, что изменения, происходящие во внешней среде влияющие на объём выпуска ВВП в Российской Федерации, влияют на работу предприятия до определённой степени.

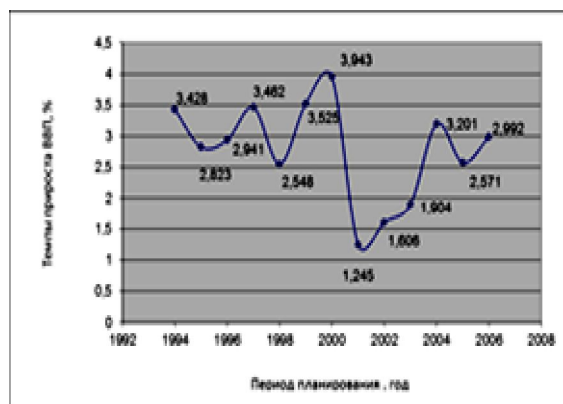


Рисунок 2 - Годовые темпы прироста реального ВВП России в 1992 – 2006 гг. [3]

В основном предприятия адаптируются к изменениям, происходящим во внешней среде, но только до определённого момента. В 1998 и



2009 годах отчётливо прослеживается спад производства. Это было вызвано происходившими в тот момент экономическими кризисами.

Внешняя среда предприятия изменяется очень динамично, поэтому при составлении системы планов сегодня чаще всего стараются предугадать развитие событий и разработать систему защитных мер. Такая организация планирования на предприятии не является эффективным инструментом управления, так как она не предусматривает стратегического развития. Проведение маркетинговых исследований и модернизация производства требуют больших затрат на разработку стратегии организации, поэтому наукоёмким предприятиям необходимо в процессе планирования разрабатывать мероприятия, которые бы обеспечивали получение синергетического эффекта.

На сегодняшний день в Российской Федерации принята и утверждена программа инновационного развития государственной корпорации «Ростехнологии» на период 2011 - 2020 гг. Согласно этой программе доля расходов на НИОКР должна составить на 2011 г. - 5,6 %, 2015 г. - 8,5 %, 2020 г. - 9,2 %. Наиболее приоритетными направлениями в инновационной деятельности являются: вертолётная тематика, интегрированные бортовые радиоэлектронные комплексы, оптико-электронные приборы, системы и комплексы, лазерная техника и элементная база для неё, средства отображения информации и системы связи, автоматизированные системы управления и средства радиоэлектронных измерений нового поколения [4]. На сегодняшний день ОАО «ГРПЗ» входит в число лидеров авиационного приборостроения. Оно проводит совместные НИР, ОКР, НИОКР с НИИ приборостроения имени В.В. Тихомирова, НПО «Пульсар» и тесно сотрудничает с ОАК «Сухой» и «Миг». Для повышения общего потенциала предприятия при разработке всего комплекса НИОКР необходимо при формировании тематического плана предусмотреть сочетание планируемых изделий по степени проработанности идей и наличию научных заделов с организацией соисполнителей. Подобная проработка тематического плана позволит снизить трудозатраты

при разработке НИОКР, а следовательно, получить синергетический эффект.

Например, при разработке вертолётной радиолокационной станции планировалось затратить 464356 тыс.рублей, а на разработку лазерных систем наведения оружия – 53974 тыс.рублей. В сумме планируемые затраты составили 518330 тыс. рублей. Фактические затраты на разработку и доработку изделий составили 520870 тыс. рублей. За счёт наличия научных заделов затраты сократились на сумму 5560 тыс. рублей:

$$Sg = 518330 - (520870 - 5560) = 3020 \text{ тыс. рублей}$$

В связи с этим можно сделать вывод, что планирование на наукоёмком предприятии может являться инструментом для формирования синергетических эффектов в производственных системах. Для этого необходимо: четкое формулирование целей и задач, распределение ресурсов по центрам ответственности, сочетание различных видов ресурсов и факторов производства, осуществление мониторинга производственных процессов и контроля.

Данный вид планирования способствует более эффективному управлению производством, увеличению прибыли и доходности наукоёмкого предприятия.

**Заключение.** В статье предложены основные теоретические и методологические принципы синергетического планирования на наукоёмком предприятии. Рассмотрены основные проблемы в системе планирования на современных предприятиях.

#### **Библиографический список**

1. Туровец О.Г. Организация производства и управление предприятием: учебник : Инфра – М, 2004- С. 11.
2. Попович Л.Г., Дроговоз П.А. Организационно-экономическое проектирование интегрированных научно-производственных структур в оборонно-промышленном комплексе РФ//Аудит и финансовый анализ. 2009.-№1. - С.16.
3. Росстат РФ, МВФ, 1992-2006 гг.
4. Программа инновационного развития государственной корпорации «Ростехнологии» на период 2011-2020 гг. (основные положения). Протокол №2 от 31.03.11, С.3-13.