

УДК 681.5.015

**Б. А. Якимович**, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет  
**С. И. Соломенникова**, Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ НЕЧЕТКИХ СЕТЕЙ

*Предложена модель высокотехнологичной производственной системы на основе нечетких множеств и нечетких сетей.*

**Ключевые слова:** ресурсы предприятия, модель высокотехнологичного производственного предприятия, нечеткие множества, нечеткие сети с обратными связями, концепция «резервы – ресурсы – результаты».

**П**ри исследовании высокотехнологичных производственных предприятий (ВТП) целесообразно применение известных методов синтеза структур сложных технических систем в совокупности с методами нечетких множеств и построения нечетких сетей [1, 2, 3].

Концептуальной основой формирования модели ВТП и ее исследования может служить концепция «3 Р» («резервы – ресурсы – результаты»). Согласно [4, 5] необходимым условием успешного функционирования ВТП является наличие необходимого количества резервов и ресурсов, а также механизмов их преобразования, приводящих к достижению поставленной цели.

В условиях освоения новых высокотехнологичных изделий перед производственными предприятиями неизбежно возникают критические ситуации. Поэтому важным является их учет путем использования системы мониторинга за множеством параметров и показателей, определяющих эффективность ВТП. Концепция «3 Р» позволяет не только учитывать возникающие при деятельности ВТП критические ситуации, но также формировать стабилизирующие воздействия, направленные на их ликвидацию. Предложенную 3 Р-модель рационально применять при исследовании высокотехнологичных производственных предприятий в условиях неопределенности входных параметров.

Рассмотрим общие принципы построения модели ВТП, которая может быть представлена в виде нечеткой сети с обратными связями. Необходимыми ресурсами ВТП будем считать: компетентность персонала (ресурс персонала), информационные ресурсы, интеллектуальные ресурсы, организационные ресурсы и материально-технические ресурсы. Каждое множество ресурсов может быть сформировано из соответствующего множества резервов. Описание ресурсов определяется набором параметров и их значений.

Ресурсы персонала (их компетентность) представим в виде

$$K_p = \{k_1, \dots, k_i, \dots, k_n\}, \quad (1)$$

где  $k_i$  –  $i$ -я компетенция, соответствующая ВТП;  $n$  – число ключевых компетенций персонала ВТП.

Информационные ресурсы представим как

$$R_{IT} = \{r_{IT_1}, \dots, r_{IT_j}, \dots, r_{IT_m}\}, \quad (2)$$

где  $r_{IT_j}$  –  $j$ -й информационный ресурс;  $m$  – число информационных ресурсов.

Интеллектуальные ресурсы обозначим как

$$R_{IN} = \{r_{IN_1}, \dots, r_{IN_k}, \dots, r_{IN_t}\}, \quad (3)$$

где  $r_{IN_k}$  –  $k$ -й интеллектуальный ресурс;  $t$  – число интеллектуальных ресурсов.

Организационные ресурсы:

$$R_{OR} = \{r_{OR_1}, \dots, r_{OR_s}, \dots, r_{OR_g}\}, \quad (4)$$

где  $r_{OR_s}$  –  $s$ -й организационный ресурс;  $g$  – число организационных ресурсов.

Материально-технические ресурсы:

$$R_{MT} = \{r_{MT_1}, \dots, r_{MT_e}, \dots, r_{MT_q}\}, \quad (5)$$

где  $r_{MT_e}$  –  $e$ -й материально-технический ресурс;  $q$  – число материально-технических ресурсов.

Рассмотренные параметры (переменные) являются входными для модели системы ВТП. Входными также являются показатели внешней среды. Обозначим их как

$$P_{WS} = \{p_{WS_1}, \dots, p_{WS_l}, \dots, p_{WS_l}\}, \quad (6)$$

где  $p_{WS_l}$  –  $l$ -й показатель внешней среды;  $l$  – число показателей внешней среды.

Функционирование предприятия представим множеством показателей, определяющих его состояние и деятельность в долгосрочный период времени:

$$P_{FP} = \{p_{FP_1}, \dots, p_{FP_j}, \dots, p_{FP_v}\}, \quad (7)$$

где  $p_{FP_j}$  –  $j$ -й показатель функционирования предприятия;  $v$  – число показателей, определяющих функционал предприятия.

Выходные показатели ВТП:

$$P_{WPD} = \{p_{WPD_1}, \dots, p_{WPD_k}, \dots, p_{WPD_w}\}, \quad (8)$$

где  $p_{WPD_k}$  –  $k$ -й выходной показатель деятельности ВТП;  $w$  – число выходных показателей деятельности ВТП.

На основе принятых обозначений представим обобщенную структуру модели высокотехнологичного машиностроительного предприятия, в которой определены состав и взаимосвязи элементов системы (рис. 1). Особенностью представленной структуры является наличие обратных связей (пунктирные линии), что позволяет усиливать входные воздействия за счет привлечения дополнительных ресурсов путем их преобразования из резервов.

Определим взаимодействия между элементами системы в виде нечетных правил [6]. Преимуществом такого подхода является возможность представ-

ления входных воздействий и выходных показателей в виде множества функций принадлежности и применения универсального комплекса шкал [7]. Достаточно обоснованно при большом числе входных параметров и показателей решается вопрос о выборе функции принадлежности гауссова типа:

$$\mu(x) = \exp\left[-\frac{(x-e)^2}{\sigma}\right], \quad (9)$$

где  $\mu(x)$  – степень принадлежности к нечетному множеству;  $e$  – математическое ожидание (центр нечетного множества);  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение (отвечает за крутизну функции).

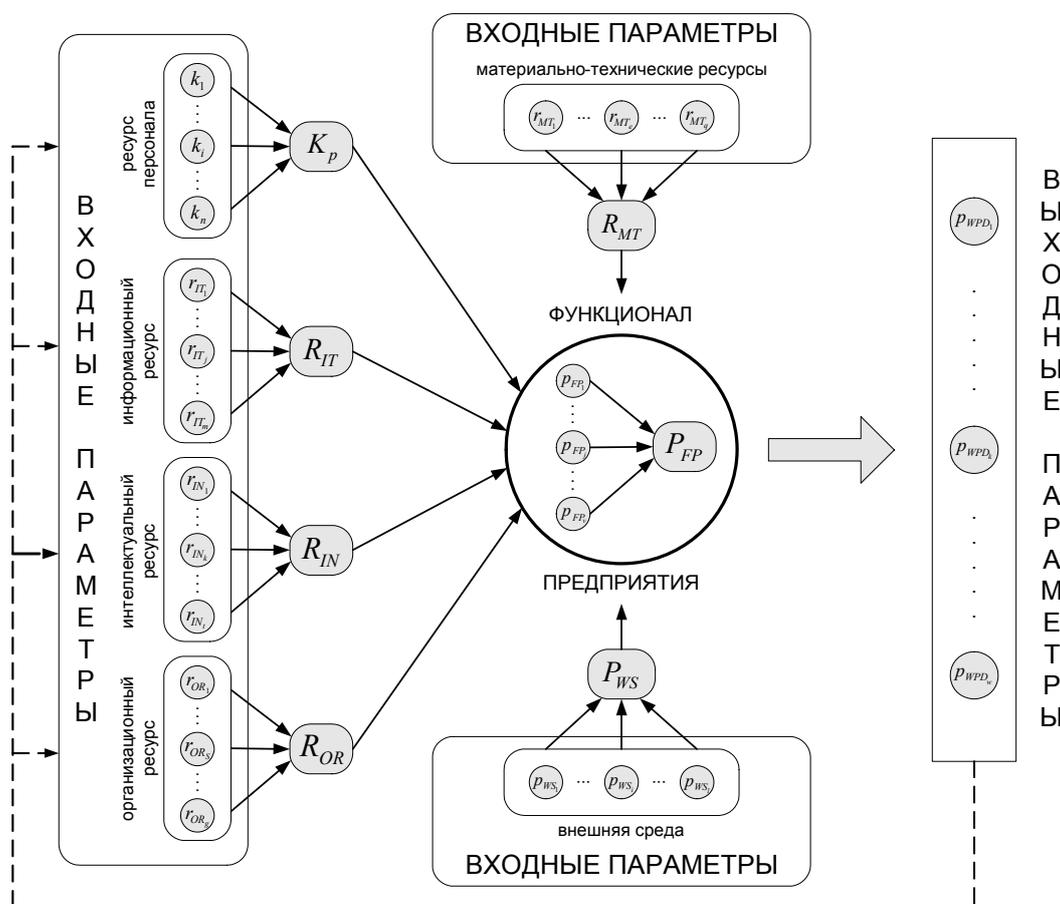


Рис. 1. Структура модели высокотехнологичного предприятия

Набор нечетных правил для рассматриваемой системы представим в виде [8]

$$\begin{aligned} & \text{if } (u_i \in L) \text{ then } (v_j \in L); \\ & \text{if } (u_i \in M) \text{ then } (v_j \in M); \\ & \text{if } (u_i \in H) \text{ then } (v_j \in H), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $u_i, v_j$  – лингвистические переменные, соответственно, для левой и правой частей условия;  $L, M, H$  –

значения лингвистических переменных, определяющих низкий, средний и высокий уровень свойств.

Методом анализа выполненных ранее исследований зададим граничные значения шкалы для значений переменных и показателей рассматриваемой системы в пределах  $0 \leq x \leq 9$ .

Формирование нечетких правил (10) выполним с использованием известных методов экспертного оценивания [9]. Полученные в результате исследования функции принадлежности для действия «материально-техническая база – номенклатура выпускае-

мой продукции» показаны на рис. 2. Для остальных действий функции принадлежности задаются аналогично.

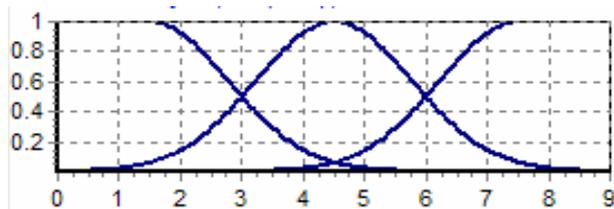


Рис. 2. Функции принадлежности для действия «материально-техническая база – номенклатура выпускаемой продукции»

Значения переменных с несколькими входящими связями находятся взвешенным суммированием по всем входящим связям согласно [10]:

$$Z_j = \sum_i W_{ij} V_{ij}, \quad (11)$$

где  $W_{ij}$  – весовые коэффициенты, характеризующие вклад  $i$ -го действия на значение  $j$ -го элемента.

В соответствии с вышеизложенным для переменных, входящих в левую часть условия для обратных связей, суммарная величина  $Y_k$  определяется умножением на коэффициент  $\left(1 - \sum_j W_{jk}\right)$ , где суммирование производится по всем обратным связям  $k$ -го элемента.

Задачей исследования представленной в виде нечетной модели высокотехнологичного предприятия является определение влияния входных ресурсов на эффективность его деятельности в виде выходных параметров при заданных значениях внешней среды.

К ресурсам (параметрам) будем относить: информационные ресурсы ( $IT$ ); интеллектуальные ресурсы ( $IN$ ); организационные ресурсы ( $OR$ ); ресурсы персонала ( $RP$ ); материально-технические ресурсы ( $MT$ ).

К показателям внешней среды отнесем: широту распространения рынков сбыта ( $RS$ ); законодательную базу и поддержку государства в области малых инновационных и высокотехнологичных предприятий ( $ZB$ ); частно-государственное партнерство в области высокотехнологичных производств ( $ChGP$ ); политику центрального банка ( $PB$ ); конкурентную среду ( $KS$ ); уровень кредита ( $UK$ ).

К показателям внешней среды отнесем: широту распространения рынков сбыта ( $RS$ ); законодательную базу и поддержку государства в области малых инновационных и высокотехнологичных предприятий ( $ZB$ ); частно-государственное партнерство в области высокотехнологичных производств ( $ChGP$ ); политику центрального банка ( $PB$ ); конкурентную среду ( $KS$ ); уровень кредита ( $UK$ ).

Функционирование предприятия определяется набором параметров: номенклатура выпускаемой продукции ( $F1$ ); конструктивно-технологическая сложность производимой продукции ( $F2$ ); качество производимой продукции ( $F3$ ); количество выпускаемых изделий (объем производства) ( $F4$ ); уровень инновационности продукции ( $F5$ ); известность предприятия ( $F6$ ); месторасположение предприятия (логистика) ( $F7$ ); инвестиционные риски ( $F8$ ); доступность кредита ( $F9$ ); процентная ставка ( $F10$ ).

Выходными параметрами в рассматриваемой модели являются: объем привлеченных средств ( $V1$ ); объем привлеченных бюджетных средств ( $V2$ ); объем собственных средств предприятия ( $V3$ ); прибыль предприятия ( $W$ ).

При численном моделировании существенным является не только исследование влияния изменения значения входных параметров на выходные, но и определение значений параметров и показателей, характеризующих функционирование предприятия.

В общем виде представим задачи численного моделирования как определение значений выходных и функциональных показателей и параметров от изменения значений входных ресурсов (при заданных значениях параметров внешней среды и состояния материально-технической базы):

$$\begin{aligned} W &= F(IT, IN, OR, RP); \\ V1 &= F(IT, IN, OR, RP); \\ V2 &= F(IT, IN, OR, RP); \\ V3 &= F(IT, IN, OR, RP); \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} F1 &= F(IT, IN, OR, RP); \\ F2 &= F(IT, IN, OR, RP); \\ F3 &= F(IT, IN, OR, RP); \\ F4 &= F(IT, IN, OR, RP); \\ F5 &= F(IT, IN, OR, RP). \end{aligned} \quad (13)$$

К варьируемым входным параметрам ресурсов персонала ВТП будем относить: профессионально-специализированные компетенции ( $K1$ ); компетенции, формирующие инновационную активность ( $K2$ ); компетенции, соответствующие высоким технологиям ( $K3$ ); компетенции, формирующие интеллектуальный капитал ( $K4$ ); стратегические компетенции ( $K5$ ); компетенции, ориентированные на внешнюю среду предприятия ( $K6$ ). Информационные ресурсы определяются входными параметрами: наличием современных систем автоматизации производственно-технологических процессов в предметной области ( $IT1$ ); наличием информационной системы, обеспечивающей управленческо-экономические процессы предприятия ( $IT2$ ); обеспеченность информатизацией бизнес-процессов предприятия в условиях конкуренции ( $IT3$ ).

Интеллектуальные ресурсы определяются как программы для электронных вычислительных машин ( $In1$ ); базы данных ( $In2$ ); изобретения, патенты ( $In3$ ); полезные модели ( $In4$ ); промышленные образцы ( $In5$ ); топологии интегральных микросхем ( $In6$ ); секреты производства ( $In7$ ).

Организационные ресурсы формируются совокупностью входящих параметров: организация рабочих мест, условия труда ( $OR1$ ); унификация, стандартизация ( $OR2$ ); эффективность и оперативность работы аппарата управления (мотивация персонала) ( $OR3$ ); стабильность кадров ( $OR4$ ).

Вышеперечисленное множество входных параметров варьируется в диапазоне от 1 до 9, что соот-

ветствует параметру одномерной шкалы. Весовые коэффициенты для совокупности входных параметров формировались согласно (11). Функции принадлежности для связей «входные параметры – ресурсы» задавались с использованием (9), (10) и экспертных оценок.

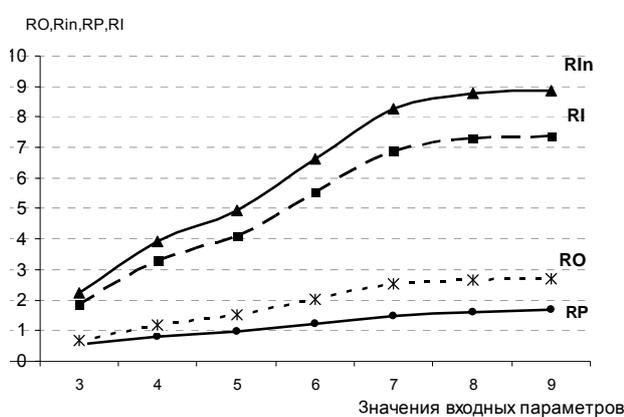
Для получения достоверных результатов всех остальных функций принадлежности и весовых коэффициентов в рассматриваемой модели важно привлечение квалифицированных экспертов и использование апробированных методик с применением генетических алгоритмов.

На первом этапе численного моделирования при заданных значениях функций принадлежности и весовых коэффициентов для всех элементов модели ресурсы варьировались в диапазоне значений выбранной одномерной шкалы от 1 до 9.

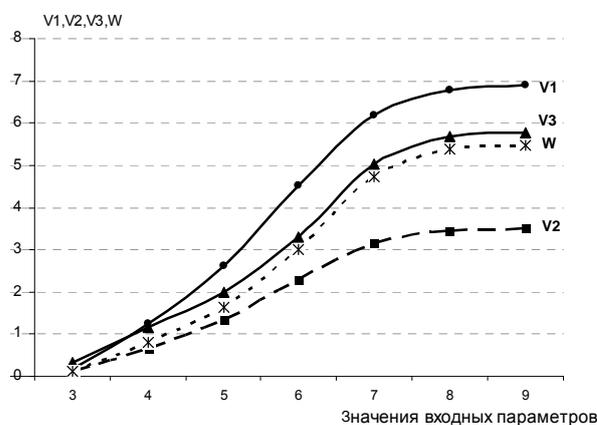
Результаты моделирования показали, что в диапазоне значений входных ресурсов от 1 до 3 значения выходных параметров  $V1, V2, V3, W$  практиче-

ски не изменяются при существенном увеличении ресурсов за счет привлечения дополнительных средств из прибыли. Это же относится к изменению значений  $F1 - F5$ . В диапазоне значений входных параметров от 3 до 5 происходит равномерное и существенное увеличение значений  $V1, V2, V3, W, F1, F2, F3, F4, F5$ . При этом существенно возрастает количество дополнительных входных ресурсов, необходимых для повышения эффективности работы предприятия. При высоких значениях входных ресурсов (диапазон 6–9) наблюдается существенное увеличение  $V1, V2, V3, W$ , но еще более значительно наблюдается рост необходимых ресурсов (рис. 3, а, б).

На втором этапе исследований значения функциональных и входных параметров и показателей определялись с учетом изменения входных величин во времени – числа выполненных итераций ( $n$ ). Результаты численного моделирования приведены на рис. 4, а, б и 5, а, б.

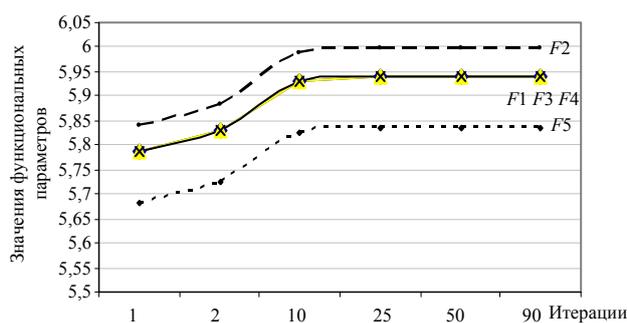


а

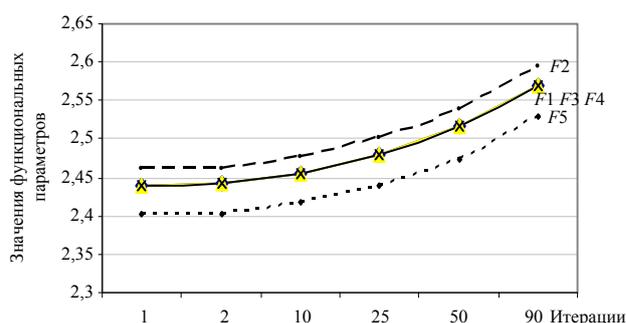


б

Рис. 3. Зависимость ресурсов и выходных параметров предприятия от значений входных параметров



а



б

Рис. 4. Зависимость функциональных параметров предприятия ( $F1, F2, F3, F4, F5$ ) в процессе итераций ( $n = 90$ ) при значении входных параметров 4 и 7

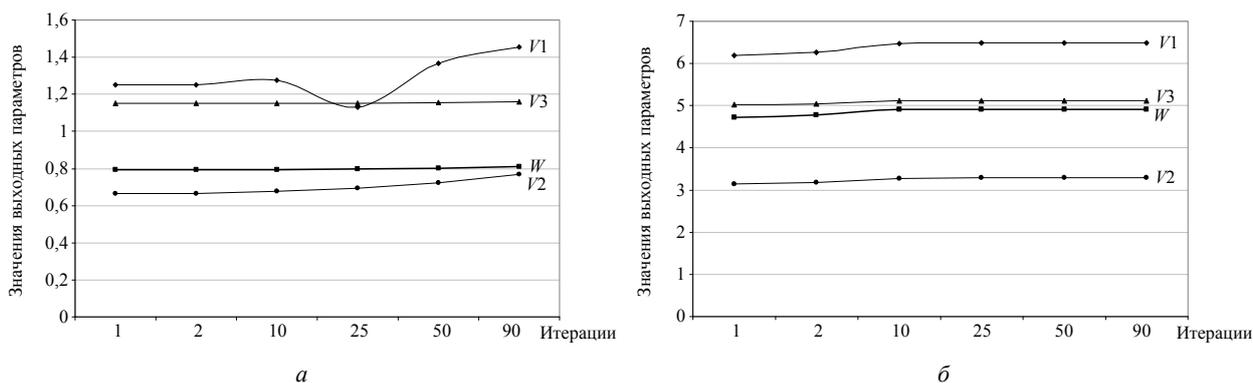


Рис. 5. Зависимость выходных параметров ( $V1$ ,  $V2$ ,  $V3$ ,  $W$ ) в процессе итераций ( $n = 90$ ) при значении входных параметров 4 и 7

В результате численного моделирования сложной технической системы, действия в которой представлены в виде нечетких множеств, можно сделать следующие выводы.

1. Обоснованное увеличение объема входных ресурсов – персонала, информационных, интеллектуальных и организационных ресурсов, определенных и формализованных в настоящей работе, позволяет существенно увеличить эффективность промышленного предприятия. Это достигается прежде всего за счет рационального вложения прибыли в ресурсы предприятия, заключающиеся в обучении и переподготовке персонала, приобретении и развитии информационных систем, увеличении интеллектуального потенциала, создания и совершенствования современных организационных методов управления предприятием.

2. Эффективность функционирования предприятия значительно улучшается за счет повышения уровня инновационности продукции, ее качества, количества и номенклатуры выпускаемых высокотехнологичных изделий.

Таким образом, разработанная модель промышленного предприятия позволяет на основе численного моделирования при учете параметров внешней среды определять необходимое количество средств для вложения в те или иные ресурсы с целью его эффективного развития.

#### Библиографические ссылки

1. Тенев В. А., Якимович Б. А. Генетические алгоритмы в моделировании систем : монография. – Ижевск : ИжГТУ, 2010. – 308 с.
2. Макаров Ю. Н. Организация эффективного управления промышленными корпорациями. – Ижевск : Митра, 2010. – 266 с.
3. Игнатьев М. Б., Ильевский В. З., Клауз Л. П. Моделирование системы машин. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. – 304 с.
4. Мамрыкин О. В. Модель управления резервами и ресурсами инновационных проектов // Тр. III Междунар. конф. «Информационные технологии в инновационных проектах». – Ч. 1. – Ижевск, 2001.
5. Мамрыкин О. В., Кузнецов А. П., Якимович Б. А. Модель управления проектами освоения новых изделий машиностроения // Высокие технологии в механике : Материалы науч.-практич. конф. ИжГТУ. – Ижевск, 2002. – 46 с.
6. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М. : Мир, 1976. – 165 с.
7. Саати Т., Вачнадзе Р. Г. Принятие решений. Метод анализа иерархий : пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1993. – 278 с.
8. Якимович Б. А., Тенев В. А. Методы анализа и моделирования систем. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2001. – 152 с.
9. Харрингтон Дж. Х. Управление качеством в американских корпорациях : сокр. пер. с англ. / авт. вступ. ст. и науч. ред. Л. А. Конарева. – М. : Экономика, 1990. – 272 с.
10. Гуляшинов А. Н., Тенев В. А., Якимович Б. А. Теория принятия решений в сложных социотехнических системах : учеб. пособие. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2005. – 280 с.

*B. A. Yakimovich*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Izhevsk State Technical University

*S. I. Solomennikova*, Votkinsk Branch of Izhevsk State Technical University

#### Study of Industrial Systems Effectiveness Using Fuzzy Mmodel Networks

*A model of a high-tech production system based on fuzzy networks is proposed.*

**Key words:** enterprise resources, model of high-tech manufacturing facility, fuzzy sets, fuzzy network with feedback, concept of “reserves – resources – results”.