

Раздел II. Алгоритмы обработки информации

УДК 004.9

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-56-64

А.А. Белевцев, А.М. Белевцев, В.А. Балыбердин

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕНДОВ И ПОСТРОЕНИЯ ДОРОЖНЫХ КАРТ НА ОСНОВЕ КОНСТРУИРОВАНИЯ БУДУЩИХ СОБЫТИЙ

Инновационное развитие экономики, особенно в высокотехнологичных областях, стимулирует развитие новых подходов к решению задач стратегического анализа, прогноза и оценки приоритетов развития технологических трендов и технологий, обеспечивающих формирование перспективных планов научно-технических и опытно-конструкторских работ. Известные методы оценки и прогнозирования уровня развития технологий основаны на разработке структурно-функциональной концепции развития исследуемой предметной области, её структурной декомпозиции (сверху вниз) и экспертной оценке на заданную временную перспективу. Такой подход имеет ряд существенных недостатков, поскольку не учитывает глобализацию и высокую динамику формирования новых траекторий развития технологий и формирования технологических фронтов снизу вверх. При этом решение задачи оценки приоритетов, времени и стоимости выполнения работ при прогнозировании развития технологий встречает значительные затруднения так как требует от экспертов конкретных числовых оценок. На основании результатов полученных авторами при проведении исследований и разработок в рассматриваемой области в работе предлагается методика формирования прогноза развития технологических трендов и построения дорожных карт, которая обеспечивает: – формирование количественной прогнозной оценки развития технологических трендов и составляющих технологий, с учетом их связности, на основе конструирования будущих событий; – построение дорожных карт (этапов) развития технологических трендов и технологий для заданной предметной области и групп предметных областей; – проведение прогнозных оценок времени реализации технологий и технологических трендов в условиях неопределенности и неполноты информации, отсутствия апробированных количественных оценок и прототипов. В основу методики положена процедура формирования прогноза развития технологических трендов и технологий на основе перехода от логического графа технологического тренда к динамическому графу. Методика обеспечивает получение количественной прогнозной оценки развития технологических трендов и составляющих их технологий: – в условиях неопределенности и неполноты информации; – отсутствия прототипов технологий. При этом учитывается возможное наличие взаимосвязей отдельных технологий и технологических трендов в процессе разработки.

Технологические тренды; технологии; приоритеты; методики; прогноз.

A.A. Belevtsev, A.M. Belevtsev, V.A. Balyberdin

METHODOLOGY FOR FORECASTING THE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL TRENDS AND BUILDING ROAD MAP ON THE BASIS OF CONSTRUCTING FUTURE EVENTS

The innovation economics development, particularly in the high technology sphere, stimulates the new ways of solving for strategic analyses, forecasting and priorities estimation tasks. These tasks provide the forming of perspective research plans. Existing methods for assessing and forecasting the level of technology development are based on the development of a structural and

functional concept of the subject area under study, its structural decomposition (top-down) and expert assessment over a given time horizon. This approach has several significant drawbacks as it does not consider globalization and the high dynamics of forming new trajectories of technology development and technological fronts from bottom to top. In addition, the task of prioritizing, timing, and cost estimation of technology development encounters significant difficulties as it requires experts to provide specific numerical assessments. Based on the results obtained by the authors through research and development in the considered area, this work proposes a methodology for forecasting technological trends and constructing roadmaps, which provides: – formation of a quantitative forecast assessment of the development of technological trends and constituent technologies, taking into account their connectivity, based on the construction of future events; – construction of roadmaps for the development of technological trends and technologies for a given subject area and group of subject areas; – conducting forecast assessments of the time required to implement technologies and technological trends in conditions of uncertainty and incomplete information, absence of validated quantitative assessments and prototypes. The methodology is based on the procedure for forecasting the development of technological trends and technologies based on the transition from a logical graph of technological trends to a dynamic graph. The methodology provides a quantitative forecast assessment of the development of technological trends and their constituent technologies: – in conditions of uncertainty and incomplete information; – in the absence of technology prototypes. At the same time, possible interconnections between individual technologies and technological trends during development are taken into account.

Technological trends; technologies; priorities; methods; forecasting.

Введение. Отличительными особенностями современного этапа развития экономики является резкое обострение борьбы за технологический суверенитет в условиях чрезвычайно высокой динамики формирования новых направлений и траекторий технологического развития, а также в связи с неопределенностями, связанными, как с созданием базисов новых технологий, так и инновационных продуктов и новых рынков сбыта.

В этой связи задача прогноза и построения дорожных карт инновационного развития в условиях нечеткости и неполноты информации является исключительно актуальной. Для решения такой задачи необходимо осуществлять оценку и прогнозирование развития технологий в исследуемой области знаний.

Анализ предметной области. Известные методы оценки и прогнозирования уровня развития технологий основаны на разработке структурно-функциональной концепции развития исследуемой предметной области, её структурной декомпозиции (сверху вниз) и экспертной оценке на заданную временную перспективу [1–7].

Такой подход имеет ряд существенных недостатков, связанных с тем, что он:

- ♦ основывается на декомпозиции известных или заданных технологических направлений и технологий [1–3];
- ♦ не учитывает глобализацию и высокую динамику формирования новых траекторий развития технологий и формирования технологических фронтов снизу вверх, а также неполноту информации [4, 5];
- ♦ не рассматривает взаимосвязи технологий в технологических трендах [6, 7].

При этом задача оценки приоритетов, времени и стоимости выполнения работ встречает значительные затруднения так как требует от экспертов конкретных числовых оценок [1, 4–7].

Постановка задачи. С учетом имеющегося опыта авторов в проведении исследований и разработок в рассматриваемой области методика формирования прогноза развития технологических трендов и построения дорожных карт с учетом вышеперечисленных требований должна обеспечивать:

- ♦ формирование количественной прогнозной оценки развития технологических трендов и составляющих технологий, с учетом их связности, на основе конструирования будущих событий;

- ♦ построение дорожных карт (этапов) развития технологических трендов и технологий для заданной предметной области и групп предметных областей;
- ♦ проведение прогнозных оценок времени реализации технологий и технологических трендов в условиях неопределенности и неполноты информации, отсутствия апробированных количественных оценок и прототипов [8, 9, 13, 14].

Разработка методики. Пусть задана предметная область, P_m ($m=1, M$) для которой сформированы технологические тренды C_n^{Pm} , $n = 1, N$. При этом C_n^{Pm} включает некоторую совокупность $\{c_i^n\}$ технологий технологического тренда.

В общем случае технологии $\{c_i^n\}$ обладают логической связностью [11, 12, 15]. Поэтому необходим переход от технологического тренда C_n^{Pm} к логическому графу технологического тренда G_n^{Pm} .

Этот переход может быть осуществлен на основе уравнений логического вывода [8, 18].

Граф технологического тренда G_n^{Pm} , построенный в соответствии с описанной процедурой логического вывода, обладает следующими свойствами:

- ♦ Это иерархический ориентированный снизу вверх граф, в общем случае, сетевой структуры, для которого известна матрица смежности $K_{ij} = \|k_{ij}\|$ порядка $I \times I$. Здесь

$$k_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{если существует дуга соединяющая } i \text{ с вершиной } j = 1 \dots I \\ 0 & \text{если такой связи нет} \end{cases}$$

Иными словами, при $k_{ij}=1$ технология c_i^n должна быть реализована до того, как начнутся исследования по созданию технологии c_j^n .

- ♦ Корневой вершиной графа является предметная область P_m технологий $\{c_i^n\}$

- ♦ Вершины, для которых $\sum_{j=1}^I k_{ij}=0$, являются исходными и формируют нижний уровень графа.

- ♦ Вершины, имеющие входящие и исходящие дуги, являются стоком для вершин нижнего уровня и истоками для вершин верхнего уровня графа.

Для всех технологий $\{c_i^n\}$ определен перечень характеристик, который можно представить в виде следующего кортежа

$$c_i^n \rightarrow \langle \Phi_i^n, t_i^n, S_i^n, \rho_i^n \rangle.$$

Здесь:

Φ_i^n – функциональные назначения технологий c_i^n ;

t_i^n – время на исследования и разработки технологий c_i^n ;

S_i^n – оценка стоимости работ на исследования и разработку технологии c_i^n ;

ρ_i^n – значение вектора приоритетов технологии c_i^n .

Тогда в основу формирования прогноза развития технологических трендов и технологий, а также построения дорожных карт может быть положена процедура формирования будущих событий на основе перехода от логического графа G_n^{Pm} к динамическому графу $G_n^{Pm}(t)$.

Введем шкалу времени t и дискретный шаг измерения $j=1..I$, которые будут определяться логикой взаимодействия технологий, а также прогнозными оценками времени их реализации. При этом вместо обозначения технологий $c_i^n \in G_n^{Pm}$ вводим c_{ij}^n где дополнительный индекс j будет соответствовать не только количественному значению уровня иерархии на графе, но и времени.

Тогда процедуру перехода от логического графа G_n^{Pm} к динамическому графу $G_n^{Pm}(t)$ и построения дорожных карт можно представить в виде следующей последовательности действий.

1. Формируем по оси ординат шкалу времени t с дискретным шагом измерения $t = 1 \dots T$.

Момент начала отсчета оси времени определяется временем проведения мониторинга и формированием графа G_n^{Pm} т.е. на первом этапе на графе отсутствуют виртуальные вершины [8,18], а также вершины технологий, выявленные на последующих этапах проведения прогнозных исследований (мониторинга) [6, 10, 16, 17].

2. Формируем перечень исходных вершин рассматриваемого тренда графа G_n^{Pm} , который формируется из элементов (технологий) c_{ij}^n , для каждого из которых $\sum_{j=1}^J k_{ij}^n = 0$. То есть в первую строку структуры включаются те технологии, для которых нет предшественников.

Функциональная полнота каждой вершины второго и последующих уровней графа $G_n^{Pm}(t)$ будет определяться функциональной полнотой всех технологий (всех истоков), необходимых для ее создания.

В силу того, что время оценки реализации технологий различно, то момент времени начала работ по созданию технологий более высокого ранга при условии обеспечения функциональной полноты будет равен $\max t_{c_{ij}^n}$, где $\max t_{c_{ij}^n}$ – максимальное значение времени разработки технологий первого уровня, формирующих функциональную полноту c_{i2}^n .

Тогда для всех остальных технологий времена выполнения работ будут равны:

$$\max t_{c_{i1}} = t_{i1}^{ci} + \Delta t_{c_{i1}};$$

где $\Delta t_{c_{i1}}$ – время ожидания

3. Формируем перечень вершин стоков второго уровня.

Второй перечень стоковых вершин формируется на базе элементов множества $C_n^{Pm}(2) - c_{i2}^n$, для всех оставшихся элементов, для которых $\sum_{j=1}^J k_{ij}^n = 0$.

Проводим оценку времени реализации технологий:

$$t_{i2}^{ci} = t_{i2}^{ci} + \max t_{c_{i1}}$$

где t_{i2}^{ci} – время разработки технологии c_{i2}

4. Данная процедура проводится при движении снизу вверх для всех стоковых вершин второго уровня с определением момента времени начала работ по каждой.

5. Последовательно выполняем п.п. 3-4 для всех уровней графа G_n^{Pm} и формируем перечень вершин графа $G_n^{Pm}(t)$, напрямую связанных с корневой вершиной P_m .

6. Для всех вершин c_{ij}^n проверяется наличие связей не только с вершинами более высокого ранга в анализируемом тренде G_n^{Pm} но и с другими трендами предметной области P_m .

7. Определяем прогнозное время создания технологий $\bar{c}_{ij}(t)$ напрямую связанных с корневой вершиной P_m .

8. Формируем траекторию $D_{c_i}^{Pm}$ - дорожную карту технологического тренда $C_n^{Pm}(t)$

9. Для каждой вершины траектории $D_{c_i}^{Pm}$ определяем время завершения работ, вектор приоритетов, функциональную полноту, стоимость и время завершения работ $\{U\Phi H_{c_{ij}}, t_i^n, S_i^n, \rho_{ij}^n\}$

10. Для предметной области P_{m+1} выбираем следующий технологический тренд G_{n+1}^{Pm+1} и переходим к п.2

11. Объединяем дорожные карты $D_{c_i}^{Pm}$, сформированные для всех технологических трендов предметной области P с учетом выявленной связности дорожных карт каждого тренда. Формируем дорожную карту прогноза развития технологий и технологических трендов.

Данная процедура может быть положена в основу методики прогнозирования развития технологических трендов и построения дорожных карт.

Экспериментальные исследования. Рассмотрим вариант реализации предлагаемой методики на примере построения дорожной карты для предметной области P_m – «Технологии разработки, программирования, тестирования и диагностирования ПО для СЦУ».

Для заданной предметной области логический граф технологического тренда G_n^{Pm} представлен на рис. 1.

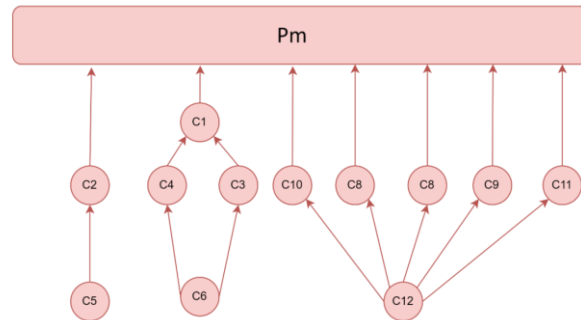


Рис. 1. Логический граф технологического тренда G_n^{Pm}

В табл. 1 представлены оценки времени и функциональные назначения технологий $\{c_i^n\}$ технологического тренда C_n^{Pm}

Таблица 1

Оценка времени и функциональные назначения технологий $\{c_i^n\}$ технологического тренда C_n^{Pm}

Сп	$\Phi_{H_i}^n$	t
C1	Программы безопасных распределенных высокопроизводительных вычислений	3,2
C2	Сверхмощные поисковые системы в распределенных системах	3,1
C3	Программы системы исправления уязвимостей	6,1
C4	Технологии безопасного использования ПО неизвестного происхождения	5,7
C5	Технологии интеграции системных архитектур различных программных сред	4,1
C6	Антивирусные программы	3,2
C7	Технологии распределенного управления	3,7
C8	Технологии ПО устойчивого у кибератакам	3,8
C9	Адаптивное ПО	4,2
C10	Цифровые двойники	1,9
C11	Технологии гомоморфного шифрования	6
C12	Технологии для смешанных широкополосных интегральных схем	5,4

В соответствии с методикой в результате выполнения п.1-7 сформирован динамический граф $G_n^{Pm}(t)$ (рис. 2).

Реализация п.п. 8-10 предлагаемой методики позволяет построить дорожную карту $D_{C_i}^{Pm}$ технологического тренда C_n^{Pm} для предметной области P_m (рис. 2).

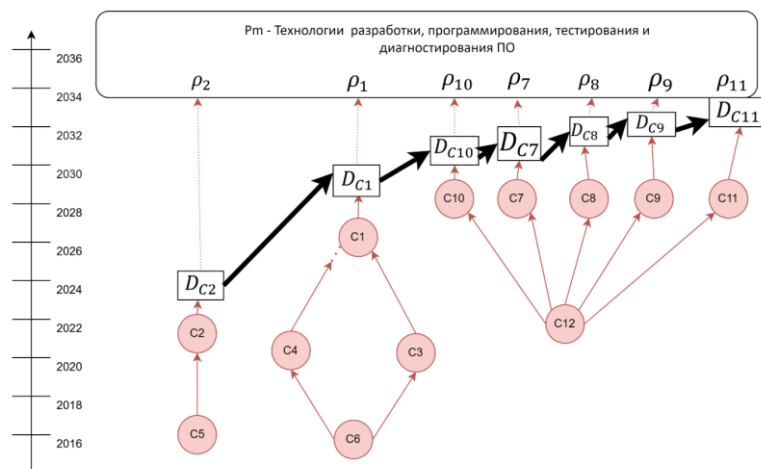


Рис. 2. Динамический граф $G_n^{Pm}(t)$ и дорожная карта $D_{C_i}^{Pm}$

Закключение. Таким образом, в работе показано, что задача прогноза и построения дорожных карт инновационного развития в условиях нечеткости и неполноты информации является исключительно актуальной. При этом известные методы оценки и прогнозирования уровня развития технологий, основанные на разработке структурно-функциональной концепции развития рассматриваемой предметной области, её структурной декомпозиции (сверху вниз) и экспертной оценке на заданную временную перспективу, имеют ряд существенных недостатков, что не обеспечивает их полноценное использование.

С учетом имеющегося опыта авторов в проведении исследований и разработок в рассматриваемой области предложена новая методика формирования прогноза развития технологических трендов и построения дорожных карт с учетом реальных требований рассматриваемой предметной области. В основу методики положена процедура формирования прогноза развития технологических трендов и технологий на основе перехода от логического графа технологического тренда к динамическому графу. Рассмотрен вариант реализации предлагаемой методики на примере построения дорожной карты для предметной области «Технологии разработки, программирования, тестирования и диагностирования программного обеспечения для систем сетецентрического управления».

Методика обеспечивает получение количественной прогнозной оценки развития технологических трендов и составляющих их технологий:

- ◆ в условиях неопределенности и неполноты информации;
- ◆ отсутствия прототипов технологий.

При этом учитывается возможное наличие взаимосвязей отдельных технологий и технологических трендов в процессе разработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буренок В.М., Ивлев А.А., Корчак В.Ю. Развитие военных технологий XXI века: Проблемы, планирование, реализация. – Тверь: Изд-во «Купол», 2009. – 624 с.
2. Saritas O. Systemic foresight methodology. In D. Meissner, L. Gokhberg, & A. Sokolov (Eds.) // Foresight and science, technology and innovation policies: Best practices. – Berlin: Springer, 2013. – P. 83-117.
3. Shibata N., Kajikawa Y., & Sakata I. Detecting potential technological fronts by comparing scientific papers and patents // Foresight. – 2011. – 13 (5). – P. 51-60.

4. Fuller C.M., Biros D.P. and Delen D. An investigation of data and text mining methods for real world deception detection // *Expert Systems with Applications*. – 2011. – No. 38. – P. 8392-8398.
5. Cobo M.J., Lopez-Herrera A.G., Herrera-Viedma E., Herrera F. An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: A practical application to the Fuzzy Sets Theory field // *Journal of Informetrics*. – 2011. – Vol. 5. – P. 146-166.
6. Gokhberg L., Fursov K., Miles I., Perani G. Developing and using indicators of emerging and enabling technologies // *Handbook of Innovation Indicators and Measurement* / ed. F. Gault. Cheltenham: Edward Elgar. – 2013. – P. 349-380.
7. Palomino M.A., Vincenti A., Owen R. Optimising web-based information retrieval methods for horizon scanning // *Foresight*. – 2013. – Vol. 15, No. 3. – P. 159-176.
8. Белевцев А.А., Белевцев А.М., Балебердин В.А. Методика анализа и оценки приоритетов технологических трендов и технологий // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2022. – № 6. – С. 84-94.
9. Балебердин В.А., Белевцев А.М., Бендерский Г.П. Прикладные методы оценки и выбора решений в стратегических задачах инновационного менеджмента. – 5-е изд. – М.: ИТК «Дашков и К», 2022. – 340 с.
10. Белевцев А.М., Балебердин В.А., Белевцев А.А., Садреев Ф.Г. О разработке интеллектуальных сервисов мониторинга технологических трендов в информационно-аналитических комплексах // *Наукоемкие технологии*. – 2019. – № 3.
11. Белевцев А.М., Балебердин В.А., Белевцев А.А. Об оценке направлений развития информационных технологий для систем сетецентрического управления // Матер. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении: Сб. докладов. – Таганрог, 2017. – С. 8-12.
12. Белевцев А.М., Балебердин В.А., Белевцев А.А., Маркелов Е.Б. Некоторые тенденции развития информационных технологий для систем сетецентрического управления // *Вооружение и экономика*. – 2021. – № 3.
13. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 340 с.
14. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях. Аналитические сети. – М.: ЛИБРОКОМ, 2009. – 358 с.
15. Белевцев А.М., Балебердин В.А., Бендерский Г.П., Белевцев А.А. Анализ направлений развития нано- и IT-технологий для построения специализированных сетевых коммуникационных систем нового поколения // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2015. – № 3.
16. Белевцев А.М., Садреев Ф.Г., Пахомов С.Н. Организация параллельного мониторинга направлений развития науки, техники и технологий в открытых источниках информации // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2013. – № 5. – С. 86-95.
17. Kim Y., Tian Y., Jeong Y., Jihee R., & Myaeng S.-H. Automatic discovery of technology trends from patent text // In *Proceedings of the 2009 ACM symposium on applied computing*. – 2009. – P. 1480-1487.
18. Белевцев А.М., Балебердин В.А., Белевцев А.А. Методика оценки времени и стоимости реализации технологических трендов в условиях неопределенности и неполноты информации // *Наукоемкие технологии*. – 2019. – № 5.
19. Белевцев А.М., Балебердин В.А., Белевцев А.А., Садреев Ф.Г. Разработка интеллектуальных сервисов мониторинга технологических трендов в информационно-аналитических комплексах // *Наукоемкие технологии*. – 2019. – Т. 20, № 3. – С. 24-29.
20. Балебердин В.А., Белевцев А.М., Белевцев А.А. О количественной оценке инновационных проектов // *Избранные научные труды. XV Международная научно-практическая конференция «Управление качеством»*. – М.: МАИ, 2016. – С. 75-79.

REFERENCES

1. Burenok V.M., Ivlev A.A., Korchak V.Yu. Razvitie voennykh tekhnologiy XXI veka: Problemy, planirovanie, realizatsiya [Development of military technologies of the XXI century: Problems, planning, implementation]. Tver': Izd-vo «Kupol», 2009, 624 p.
2. Saritas O. Systemic foresight methodology. In D. Meissner, L. Gokhberg, & A. Sokolov (Eds.), *Foresight and science, technology and innovation policies: Best practices*. Berlin: Springer, 2013, pp. 83-117.

3. Shibata N., Kajikawa Y., & Sakata I. Detecting potential technological fronts by comparing scientific papers and patents, *Foresight*, 2011, 13 (5), pp. 51-60.
4. Fuller C.M., Biros D.P. and Delen D. An investigation of data and text mining methods for real world deception detection, *Expert Systems with Applications*, 2011, No. 38, pp. 8392-8398.
5. Cobo M.J., Lopez-Herrera A.G., Herrera-Viedma E., Herrera F. An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: A practical application to the Fuzzy Sets Theory field, *Journal of Informetrics*, 2011, Vol. 5, pp. 146-166.
6. Gokhberg L., Fursov K., Miles I., Perani G. Developing and using indicators of emerging and enabling technologies, *Handbook of Innovation Indicators and Measurement* / ed. F. Gault. Cheltenham: Edward Elgar, 2013, pp. 349-380.
7. Palomino M.A., Vincenti A., Owen R. Optimising web-based information retrieval methods for horizon scanning, *Foresight*, 2013, Vol. 15, No. 3, pp. 159-176.
8. Belevtsev A.A., Belevtsev A.M., Balyberdin V.A. Metodika analiza i otsenki prioritetoov tekhnologicheskikh trendov i tekhnologiy [Methods of analysis and evaluation of the priorities of technological trends and technologies], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 6.
9. Balyberdin V.A., Belevtsev A.M., Benderskiy G.P. Prikladnye metody otsenki i vybora resheniy v strategicheskikh zadachakh innovatsionnogo menedzhmenta [Applied Methods of Evaluation and Choice of Solutions in the Strategic Problems of Innovation Management]. 5th ed. Moscow: ITK «Dashkov i K», 2022, 340 p.
10. Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Belevtsev A.A., Sadreev F.G. O razrabotke intellektual'nykh servisov monitoringa tekhnologicheskikh trendov v informatsionno-analiticheskikh kompleksakh [On the development of intelligent services for monitoring technological trends in information and analytical complexes], *Naukoemkie tekhnologii* [Science-intensive technologies], 2019, No. 3.
11. Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Belevtsev A.A. Ob otsenke napravleniy razvitiya informatsionnykh tekhnologiy dlya sistem setetsentricheskogo upravleniya [On the assessment of directions for the development of information technologies for network-centric control systems], *Mater. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii: Sb. dokladov* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation "Computer and Information Technologies in Science, Engineering and Management: Collection of Reports]. Taganrog, 2017, pp. 8-12.
12. Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Belevtsev A.A., Markelov E.B. Nekotorye tendentsii razvitiya informatsionnykh tekhnologiy dlya sistem setetsentricheskogo upravleniya [Some trends in the development of information technologies for network-centric control systems], *Vooruzhenie i ekonomika* [Armament and Economics], 2021, No. 3.
13. Saati T.L. Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy [Making decisions. Hierarchy analysis method]. Moscow: Radio i svyaz', 1993. – 340 s.
14. Saati T.L. Prinyatie resheniy pri zavisimostyakh i obratnykh svyazyakh. Analiticheskie seti [Decision making under dependencies and feedbacks. Analytical networks]. Moscow: LIBROKOM, 2009, 358 p.
15. Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Benderskiy G.P., Belevtsev A.A. Analiz napravleniy razvitiya nano- i IT-tekhnologiy dlya postroeniya spetsializirovannykh setevykh kommuni-katsionnykh sistem novogo pokoleniya [Analysis of the directions of development of nano- and IT-technologies for the construction of specialized network communication systems of a new generation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 3.
16. Belevtsev A.M., Sadreev F.G., Pakhomov S.N. Organizatsiya parallel'nogo monitoringa napravleniy razvitiya nauki, tekhniki i tekhnologiy v otkrytykh istochnikakh informatsii [Organization of parallel monitoring of directions of development of science, technology and technology in open sources of information], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 5, pp. 86-95.
17. Kim Y., Tian Y., Jeong Y., Jihee R., & Myaeng S.-H. Automatic discovery of technology trends from patent text, *In Proceedings of the 2009 ACM symposium on applied computing*, 2009, pp. 1480-1487.

18. Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Belevtsev A.A. Metodika otsenki vremeni i stoimosti realizatsii tekhnologicheskikh trendov v usloviyakh neopredelennosti i nepolnoty informatsii [Methodology for estimating the time and cost of implementing technological trends in conditions of uncertainty and incompleteness of information], *Naukoemkie tekhnologii* [Science-intensive technologies], 2019, No. 5.
19. Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Belevtsev A.A., Sadreev F.G. Razrabotka intellektual'nykh servisov monitoringa tekhnologicheskikh trendov v informatsionno-analiticheskikh kompleksakh [Development of intelligent services for monitoring technological trends in information and analytical complexes] *Naukoemkie tekhnologii* [Science-intensive technologies], 2019, Vol. 20, No. 3, pp. 24-29.
20. Balyberdin V.A., Belevtsev A.M., Belevtsev A.A. O kolichestvennoy otsenke innovatsionnykh projektov [On the quantitative assessment of innovative projects], *Izbrannye nauchnye trudy. XV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Upravlenie kachestvom»* [Selected Scientific Works. XV International Scientific and Practical Conference "Quality Management"]. Moscow: MAI, 2016, pp. 75-79.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.А. Кравченко.

Белевцев Андрей Андреевич – ПАО «Сбербанк»; e-mail: andrey.belevtsev@gmail.com; г. Москва, Россия; старший вице-президент.

Белевцев Андрей Михайлович – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: ambelevtsev@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79037691788; д.т.н.; профессор.

Балыбердин Валерий Алексеевич – 3 Центральный научно-исследовательский институт МО РФ; e-mail: balyberdinvaleri@yandex.ru; г. Москва, Россия; д.т.н., профессор; заслуженный деятель науки РФ; в.н.с.

Belevtsev Andrey Andrevich – PJSC "Sberbank"; e-mail: andrey.belevtsev@gmail.com; Moscow, Russia; senior vice president.

Belevtsev Andrey Mikhaylovich – Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: ambelevtsev@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79037691788; dr. of eng. sc.; professor.

Balyberdin Valeriy Alexeevich – 3 Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail: balyberdinvaleri@yandex.ru; Moscow, Russia; dr. of eng. sc.; professor; Honored Scientist of the Russian Federation; leading researcher.

УДК 519.688

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-64-74

А.В. Хлуденев

СИНТЕЗ ДОПУСКОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Задача назначения допусков дискретных пассивных элементов аналоговых устройств важна при планировании массового серийного производства. Допустимые отклонения параметров от номинальных значений влияют на стоимость, выбор рядов предпочтительных номинальных значений параметров и доступность приобретения этих комплектующих. Значения допусков, а также температурная зависимость параметров элементов и их изменение при старении являются ключевыми факторами, влияющими на работоспособность продукции и выход годных изделий. Решению этой задачи уделяется внимание в научно-технической литературе на протяжении более 40 лет. За это время изменились инструменты для проектирования электронных устройств. Стали широко применяться системы автоматизированного проектирования (САПР) для электроники (англ. electronic design automation (EDA)), обеспечивая сквозной цикл проектирования. Современные EDA имеют ограниченные возможности для допускового проектирования, обеспечивая решение задачи допускового анализа. Пользователям EDA приходится определять допуски элемен-