

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ РАДИОПРОМЫШЛЕННОСТИ / ECONOMICS, MANAGEMENT AND DEVELOPMENT OF THE RADIO INDUSTRY

DOI: 10.21778/2413-9599-2020-30-1-54-62
УДК 502.56, 681.2

Методология обеспечения экологичности радиоэлектронных и приборостроительных производств в рамках территориальных природно-производственных комплексов

Н. А. Жильникова¹¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Производство продукции радиоэлектронной промышленности и приборостроения в настоящий момент основано на технологиях, потенциально опасных для окружающей среды. Стратегия модернизации и развития радиоэлектронных и приборостроительных производств в соответствии с требованиями современного природоохранного законодательства включает разработку технологических нормативов, основанных на наилучших доступных технологиях (НДТ). В работе проанализированы состояние и перспективы развития предприятий радиоэлектроники и приборостроения по экологическим показателям и критериям НДТ. Рассмотрен метод оценки жизненного цикла электронного устройства как инструмент получения данных о воздействии его производства на окружающую среду. С целью разработки экологических нормативов допустимых воздействий радиоэлектронных и приборостроительных производств предложен метод нечеткого линейного программирования с вероятностными ограничениями, на основе которого сформирована модель для системы менеджмента водных ресурсов в рамках территориальных природно-производственных комплексов с учетом влияния на водные объекты всех предприятий-водопользователей. Предложенный алгоритм принятия решений при нормировании нагрузки позволяет предприятию разработать стратегию планирования объемов водопотребления и водоотведения с учетом региональных условий и влияния других субъектов территориального природно-производственного комплекса.

Ключевые слова: экологичность, природно-производственный комплекс, радиоэлектронные и приборостроительные производства, оценка жизненного цикла, экологическое нормирование

Для цитирования:

Жильникова Н. А. Методология обеспечения экологичности радиоэлектронных и приборостроительных производств в рамках территориальных природно-производственных комплексов // Радиопромышленность. 2020. Т. 30, № 1. С. 54–62. DOI: 10.21778/2413-9599-2020-30-1-54-62

© Жильникова Н. А., 2020



Methodology of ensuring ecological safety of radio-electronic and instrument-making production in territorial natural production complexes

N. A. Zhilnikova¹

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

The production of electronics and instrumentation is currently based on technologies that can be harmful to the environment. The strategy for the modernization and development of electronic and instrument-making industries in accordance with the requirements of modern environmental legislation includes the development of technological standards based on the best available techniques. The work analyzes the status and development prospects of radio electronics and instrument-making enterprises according to environmental indicators and criteria of the best available techniques. A method for assessing the life cycle of an electronic device is considered as a tool for obtaining data on the environmental impact of its production. In order to develop environmental standards for permissible impacts of electronic and instrument-making industries, a fuzzy linear programming method with probabilistic restrictions has been proposed. On the basis of this method, a model has been formed for a water management system within territorial natural-production complexes, taking the impact on water objects of all water-using enterprises into account. The proposed decision-making algorithm for load normalization allows the company to develop a strategy for planning the volumes of water consumption and water disposal, while considering regional conditions and the influence of other entities of the territorial natural production complex.

Keywords: environmental friendliness, natural production complex, electronic and instrument-making industries, life cycle assessment, environmental regulation

For citation:

Zhilnikova N. A. Methodology of ensuring ecological safety of radio-electronic and instrument-making production in territorial natural production complexes. Radio industry (Russia), 2020, vol. 30, no. 1, pp. 54–62. (In Russian). DOI: 10.21778/2413-9599-2020-30-1-54-62

Введение

Сектор радиоэлектроники и приборостроения производит широкий спектр устройств и оборудования, таких как электронные трубки, печатные платы, полупроводниковые приборы, электронные конденсаторы, электронные катушки и трансформаторы, электронные разъемы и электронные компоненты, мониторы из поливинилхлоридов (ПВХ) и проекторы.

Производство полупроводниковых приборов является сложным процессом и требует использования жидкостей и газов сверхвысокой чистоты. При обработке металлических пластин широко используются опасные материалы, такие как серная, азотная, соляная и фосфорная кислоты. Микросхемы отпечатываются на кремниевой подложке с использованием органических химикатов. В среднем для изготовления одной 2-граммовой микросхемы требуется 1,6 кг нефтепродуктов, 72 г химикатов, около 32 л воды и 0,7 кг одноэлементных газов [1]. По данным шведского завода – изготовителя полупроводников и микроэлектроники, в производстве одной полупроводниковой пластины на 1 см² ее поверхности используется

45,6 г различных опасных химических веществ [2]. На рис. 1 представлены входные и выходные потоки на этапе производства полупроводниковых пластин.

В производстве различных видов электронных устройств и радиоэлектронной аппаратуры используются печатные платы, изготавливаемые способом химического травления. Данный способ характеризуется образованием большого объема технологических растворов, содержащих вредные примеси тяжелых металлов, неорганических кислот и щелочей, поверхностно-активных веществ и других высокотоксичных соединений. Стоки таких производств являются наиболее опасными источниками загрязнения поверхностных и подземных водных ресурсов, а также почв.

С конца 1990-х годов в странах Европейского союза (ЕС) началась разработка стандартов, регулирующих деятельность производителей полупроводниковых приборов и микроэлектроники, с целью уменьшения негативного воздействия на окружающую среду и сокращения водопотребления и энергоемкости производства. Стандарты помогают предприятиям выбирать химикаты, процессы или

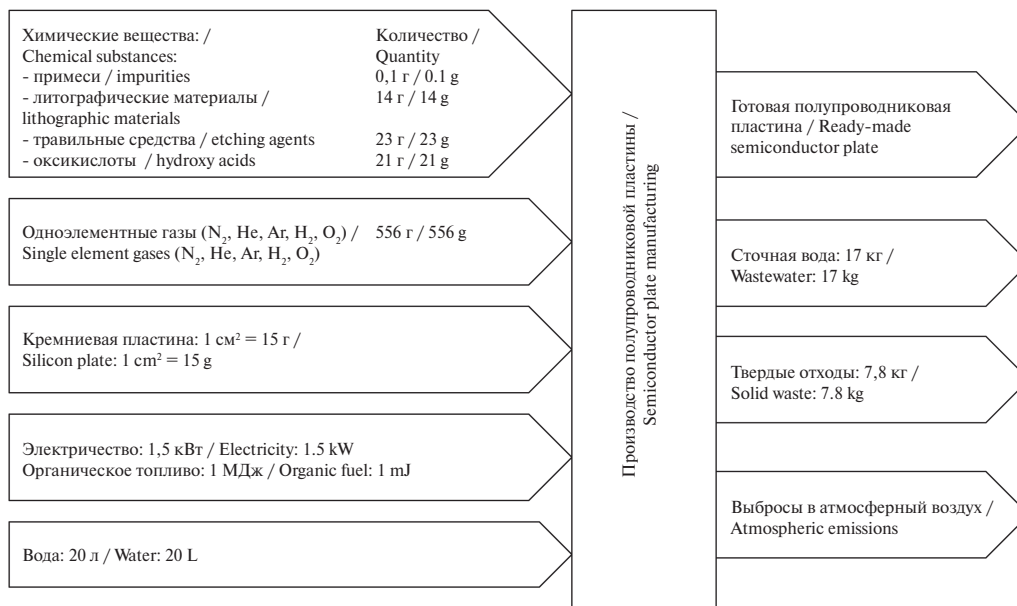


Рисунок 1. Входные и выходные материальные потоки при производстве полупроводниковых пластин
Figure 1. Input and output material flows in the manufacture of semiconductor plates

материалы, которые имеют минимальный риск для окружающей среды. Нормативы по использованию химических веществ определяют процессы, которые являются материалоемкими или используют опасные химические вещества. Целью создания нормативов является решение следующих задач: 1) уменьшение влияния на окружающую среду со стороны производственных процессов; 2) сокращение, утилизация и рециклинг опасных химических жидких отходов; 3) внедрение наилучших доступных технологий (НДТ).

В России критерии определения НДТ установлены постановлением Правительства РФ от 23.12.2014 г. № 1458:

- наименьший уровень негативного воздействия на окружающую среду в расчете на единицу времени или объем производимой продукции (товара), выполняемой работы, оказываемой услуги либо соответствие другими показателям воздействия на окружающую среду, предусмотренным международными договорами Российской Федерации;
- экономическая эффективность внедрения и эксплуатации;
- применение ресурсо- и энергосберегающих методов;
- период внедрения;
- промышленное внедрение технологических процессов, оборудования, технических способов, методов на двух и более объектах в Российской Федерации, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду [3].

Инструменты экологического управления радиоэлектронных и приборостроительных производств должны включать внедрение интегрированных систем менеджмента, учитывающих энергетические критерии и экологические аспекты, а также использование таких методических подходов, как оценка жизненного цикла, экологической результативности и энергетической эффективности.

Методология оценки жизненного цикла продукции радиоэлектронных и приборостроительных производств

Моделирование промышленного производства и его воздействия на окружающую среду с использованием методологии оценки жизненного цикла позволяет оценить экологическую устойчивость производственных систем, гармонизированных и взаимодействующих друг с другом в едином территориальном природно-производственном комплексе с целью получения данных о нагрузке каждого предприятия на окружающую среду.

Для проведения оценки жизненного цикла электронных устройств, таких как полупроводниковые приборы и микросхемы, целесообразно использование методологии, основанной на атрибутивных моделях [4]. Рассмотрим основные этапы предложенной методологии на примере оценки жизненного цикла микросхемы:

1. Определение целей и объема исследования, включая определение функциональной единицы и границ производственной системы.

2. Разбивка микроэлектронного элемента на структурные составляющие и составление перечня компонентов. Этот процесс подходит и для оценки жизненного цикла используемых при производстве материалов.
3. Группировка выделенных компонентов в соответствии с атрибутивной моделью, представленной на рис. 2. Основные группы электронных элементов, в свою очередь, могут быть разделены на подгруппы.
4. Описание материалов, содержащихся в каждом компоненте.
5. Разработка детальной схемы производственной системы, где должны быть смоделированы стадии производства, использования и утилизации продукта.
6. Определение площади микроэлектронного элемента для интегральных схем, транзисторов, диодов, ПВХ-мониторов, блоков и других компонентов, содержащих обработанные микросхемы.
7. Определение количества печатных плат, количества слоев и площади каждой печатной платы, в также общей площади слоя для микросхемы в целом.
8. Определение материальных потоков для всех групп элементов, входящих в модель (рис. 2).
9. Определение расстояния и способов доставки от производителей комплектующих до места сборки микроэлектронного устройства, а также от места производства до потребителей продукции.
10. Определение наиболее вероятного метода утилизации микроэлектронного устройства после окончания срока эксплуатации.
11. Определение компонентов устройства, подлежащих дальнейшей переработке.
12. Определение количества потребляемой электроэнергии на этапе эксплуатации микроэлектронного устройства.
13. Разработка анкеты-опросника для производителей компонентов с целью получения информации об основных производственных и экологических показателях.
14. Сбор данных об энергии, химических веществах и других материалах, используемых при создании аналогичной продукции в других странах в доступных источниках.
15. Определение количества энергии и сырья, необходимых для производства определенного количества исследуемых микроэлектронных устройств в год.
16. Анализ различных сценариев переработки микроэлектронного устройства после окончания срока его службы с целью выбора наиболее экологичного способа.
17. Расчет весовых коэффициентов основных производственных и экологических показателей/критериев (например, показателя токсического потенциала материала) с помощью метода анализа иерархий Т. Саати.
18. Нормализация элементов столбцов матрицы парных сравнений их суммами и усреднение результатов, получаемых в каждой строке.
19. Проведение анализа чувствительности результатов с целью определения их преобразований, связанных с изменением входных переменных, например, при увеличении потребления электроэнергии на этапе использования.
20. Определение значимых экологических аспектов микроэлектронного устройства и их количественных значений.

Для оценки качества данных и репрезентативности можно использовать данные, представленные на рис. 2 [5].

Предложенная методология оценки жизненного цикла применима к большинству видов продукции радиоэлектронных и приборостроительных производств, так как включает практически всю номенклатуру компонентов для производства сложного электронного устройства, однако требует анализа большого массива информации из множества различных источников.

Методы и средства экологического нормирования допустимых воздействий для радиоэлектронных и приборостроительных производств

Функционирование радиоэлектронных и приборостроительных производств в рамках территориальных природно-производственных комплексов регламентируется водным законодательством на уровне бассейнов – проектом «Нормативы допустимого воздействия на водные объекты» (НДВ), а для отдельных предприятий радиоэлектронных и приборостроительных производств разрабатываются «Нормативы допустимых сбросов» (НДС) [6].

Для разработки указанных нормативов строятся математические модели территориальных природно-производственных комплексов, учитывающие основные факторы и параметры формирования качества воды в водном объекте и комплекс производственно-технологических характеристик радиоэлектронных и приборостроительных производств, сформированных с помощью метода нечеткого линейного программирования с вероятностными ограничениями, основанном на теории нечетких множеств и анализе различных сценариев [7]. Такие модели позволяют обосновать НДВ для каждого производства. Природопользователи и лица, принимающие решения в области охраны

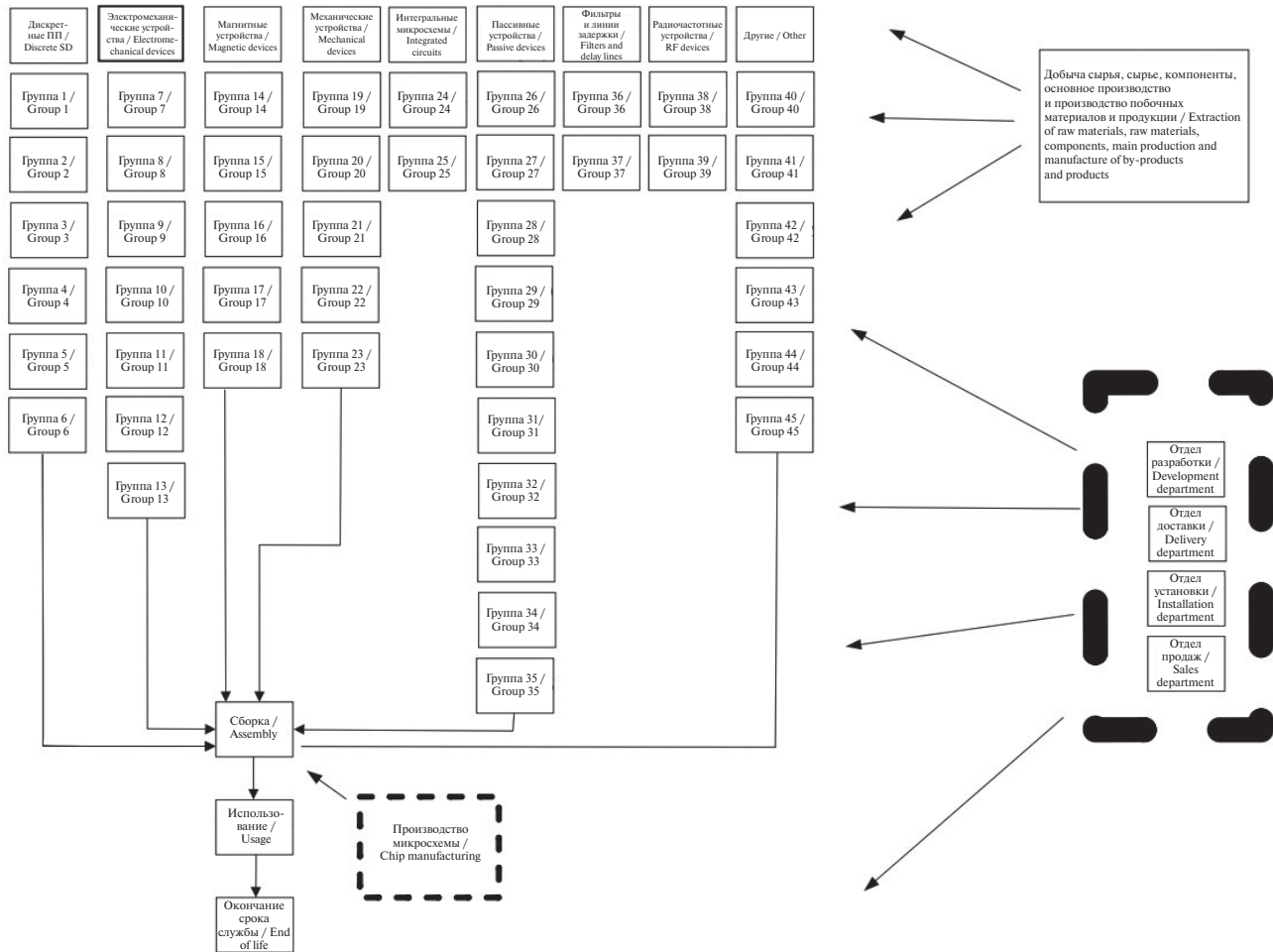


Рисунок 2. Модель сбора данных и оценки жизненного цикла микросэлектронного устройства.

Группы: 1 – элементы дисплея; 2 – диоды; 3 – индикаторы; 4 – оптические вентили; 5 – тиристоры; 6 – транзисторы; 7 – компоненты электродержателя; 8 – клеммы; 9 – предохранители; 10 – реле; 11 – переключатели; 12 – микрофоны; 13 – динамики; 14 – индукторы; 15 – регуляторы; 16 – программные модули; 17 – трансформаторы /преобразователи; 18 – катушки индуктивности; 19 – пластиковые механизмы; 20 – металлические механизмы; 21 – композитные механизмы; 22 – печатные монтажные платы; 23 – кабели; 24 – стандартные интегральные микросхемы; 25 – автоматизированные интегральные микросхемы; 26 – металлизированные бумажные конденсаторы; 27 – металлизированные пластиковые конденсаторы; 28 – керамические конденсаторы; 29 – электролитические конденсаторы; 30 – мощные конденсаторы; 31 – потенциометры; 32 – резисторы; 33 – резисторная сеть; 34 – регулируемые резисторы; 35 – терморезисторы; 36 – ферритовые антенны; 37 – линии задержки; 38 – кварцевые кристаллические элементы; 39 – осцилляторы; 40 – адаптивные элементы; 41 – гибкие магнитные диски; 42 – ламповые панели; 43 – батареи; 44 – сигнальные устройства; 45 – антенны

Figure 2. A model for collecting data and assessing the life cycle of a microelectronic device

окружающей среды, несут ответственность за распределение водных ресурсов в рамках территориальных природно-производственных комплексов, экономию водопотребления и сокращение сброса сточных вод в период долгосрочного планирования. Объем потребления воды может отличаться для каждого радиоэлектронного и приборостроительного производства в заданный период, кроме того, доля нагрузки отдельного производства на водный объект от суммарной нагрузки всех водопользователей территориального

природно-производственного комплекса заранее неизвестна. Такая неопределенность может привести к сложностям, связанными с управлением водными ресурсами и обеспечением устойчивости системы. Метод нечеткого линейного программирования с вероятностными ограничениями позволяет связать результативность системы менеджмента водных ресурсов и риск ее отказа с нечетким ограничением принадлежности (т.е. ограничением объема водопользования для каждого предприятия радиоэлектронных

и приборостроительных производств в рамках территориального природно-производственного комплекса). Интегрирование модели анализа сценариев в модель нечеткого линейного программирования с вероятностными ограничениями позволяет моделировать различные прогнозы и может быть представлено в следующем виде:

$$\text{Min} F^\pm = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (1a)$$

при условии

$$\mu \left\{ \sum_{j=1}^n a_{ij} x_{ij} \leq \bar{b}_i \right\} \geq \lambda_i, i=1, 2, \dots, m, \quad (16)$$

$$x_j \geq 0, j=1, 2, \dots, n,$$

где F – целевая функция; x_j – параметр принятия решения; c_j и a_j – коэффициенты в виде нечетких треугольных чисел левой стороны (L) неравенства; b_i и s_i – коэффициенты в виде нечетких треугольных чисел правой стороны (R) неравенства; μ – функция принадлежности.

Пусть ξ – нечеткая переменная с функцией принадлежности, u и r – действительные значения нечеткой переменной, t – планируемый период, λ – степень принадлежности. Достоверность неравенства $r \leq \xi$ выражается следующими нечеткими множествами:

$$\mu(r \leq \xi) = \begin{cases} 1, r \leq t \\ \frac{2t - t - r}{2(t - t)}, t \leq r \leq t \\ \frac{r - t}{2(t - t)}, t \leq r \leq t \\ 0, r \geq t \end{cases} \quad (2)$$

Пусть $\sum_{j=1}^n a_{ij}^\pm x_j^\pm = s_i^\pm$.

Тогда уравнение (16) можно представить в виде:

$$\mu \{s_i \leq \tilde{b}_i\} \geq \lambda_i, i=1, 2, \dots, m. \quad (3)$$

Как правило, значение степени принадлежности должно быть больше 0,5. Поэтому на основе расчета степени принадлежности для каждого неравенства $1 \geq u_i \geq \lambda_i \geq 0,5$ получаем следующее выражение:

$$\frac{2b_i - b_i - s_i}{2(b_i - \underline{b}_i)} \geq \lambda_i. \quad (4)$$

В практических задачах менеджмента водных ресурсов некоторые технико-экономические параметры определяются социально-экономическими, политическими, законодательными и технологическими факторами, которые трудно получить, основываясь на смоделированных сценариях или нечетких множествах, но которые могут быть представлены в виде значений диапазонов

с использованием метода программирования параметров диапазона. Вводя данную модель в модель нечеткого линейного программирования с вероятностными ограничениями, модель нечеткого линейного программирования с вероятностными ограничениями может быть сформулирована следующим образом:

$$\text{Min} F^\pm = \sum_{j=1}^n c_j^\pm x_j^\pm \quad (5a)$$

при условии

$$\mu \left\{ \sum_{j=1}^n a_{ij}^\pm x_j^\pm \leq \tilde{b}_i^\pm \right\} \geq \lambda_i, i=1, 2, \dots, m, \quad (5б)$$

$$\sum_{j=1}^m a_{ij}^\pm x_j^\pm \leq b_i^\pm, i= m+1, m+2, \dots, K, \quad (5в)$$

$$x_j \geq 0, j=1, 2, \dots, n. \quad (5г)$$

В соответствии с неравенством (10) и выражением $\sum_{j=1}^n a_{ij}^\pm x_j^\pm = s_i^\pm$, модель нечеткого линейного программирования с вероятностными ограничениями может быть преобразована следующим образом:

$$\text{Min} F^\pm = \sum_{j=1}^n c_j^\pm x_j^\pm \quad (6a)$$

при условии

$$\sum_{j=1}^m a_{ij}^\pm x_j^\pm \leq b_i + (1 - 2\lambda_i^\pm)(b_i - \underline{b}_i), i=1, 2, \dots, m, \quad (6б)$$

$$\sum_{j=1}^m a_{ij}^\pm x_j^\pm \leq b_i^\pm, i= m+1, m+2, \dots, K, \quad (6в)$$

$$x_j \geq 0, j=1, 2, \dots, n, \quad (6г)$$

где $a_{ij}^\pm \in \{R^\pm\}^{mn}, c_j^\pm \in \{R^\pm\}^{1n}$ и $x_j^\pm \in \{R^\pm\}^{n1}$;

R^\pm представляет количество диапазонов, где верхние индексы «-» и «+» – нижняя и верхняя границы значений диапазона, соответственно, «±» – значение диапазона с нижними и верхними границами. Для получения нижней и верхней границы в модели нечеткого линейного программирования с вероятностными ограничениями используется двухшаговый метод наименьших квадратов ($f_{opt}^\pm = [f_{opt}^-, f_{opt}^+]$ и $x_{opt}^\pm = [x_{opt}^-, x_{opt}^+]$) по каждому сценарию и каждому уровню λ ; f^\pm – системные выгоды в планируемые периоды.

Основываясь на методе нечеткого линейного программирования с вероятностными ограничениями (НЛПВО) в системе менеджмента водных ресурсов (СМВО) сформирована модель «НЛПВО-СМВО», в рамках которой система разделена на три части: 1) сложность и комплексность идентификации в модели «НЛПВО-СМВО»; 2) разработка метода нечеткого линейного программирования

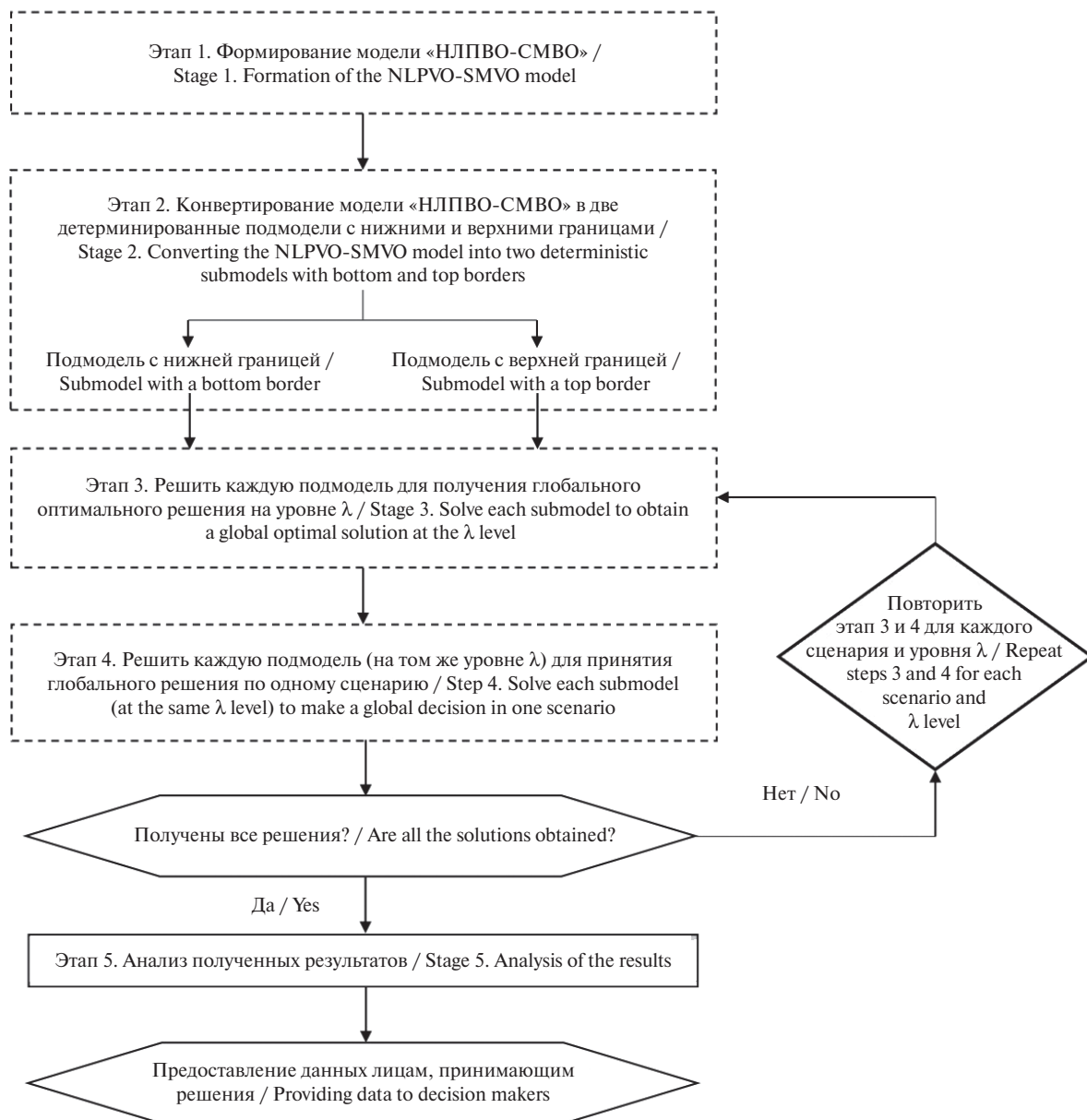


Рисунок 3. Алгоритм принятия решений с помощью модели «НЛПВО-СМВО»
Figure 3. Decision-making algorithm using the NLPVO-SMVO model

с вероятностными ограничениями; 3) разработка и применение модели «НЛПВО-СМВО», а также рекомендации по выбору стратегии для лиц, принимающих решения. Целью создания модели «НЛПВО-СМВО» является достижение максимальной системной выгоды в рамках ряда ограничений. Алгоритм принятия решений с помощью модели «НЛПВО-СМВО» представлен на рис. 3. Целевая функция включает следующие ограничения: потребление воды для хозяйственно-бытовых нужд; минимальная доля водопотребления и природоохранных мероприятий; требования к сбрасываемым сточным водам. Данные ограничения в общем виде сводятся к ограничению общей доступности водных ресурсов. При этом целевая функция выражается следующим уравнением:

$$Max F^{\pm} = \sum_{c=1}^{13} \sum_{u=1}^3 \sum_{t=1}^3 (NPV_{c,u,t}^{\pm} - C_{c,u,t}^{\pm}) W_{c,u,t}^{\pm} \quad (7)$$

Ограничения выражаются следующим образом:

1. Ограничение общей доступности водных ресурсов:

$$\sum_{c=1}^{13} \sum_{u=1}^3 W_{c,u,t}^{\pm} \leq T_t^{\pm} \quad (8)$$

2. Ограничение водных ресурсов для хозяйственно-бытовых нужд:

$$\mu\{W_{c,3,t}^{\pm} \geq \tilde{d}_{c,1,t}^{\pm}\} \geq \lambda^{\pm} \quad (9)$$

$$W_{c,1,t}^{\pm} \geq d_{c,1,t}^{\pm} + (1 - 2\lambda^{\pm})(d_{c,1,t}^{\pm} - \underline{d}_{c,1,t}^{\pm}).$$

3. Ограничение, связанное с минимальным соотношением между водопотреблением и охраной окружающей среды:

$$\mu \left\{ W_{c,3,t}^{\pm} \geq \sum_{u=1}^3 W_{c,u,t}^{\pm} \tilde{\alpha}_{c,t}^{\pm} \right\} \geq \lambda$$

$$W_{c,3,t}^{\pm} \geq \sum_{u=1}^3 W_{c,u,t}^{\pm} \alpha_{c,t}^{\pm} + (1-2\lambda)(\alpha_{c,t}^{\pm} - \underline{\alpha}_{c,t}^{\pm}). \quad (10)$$

4. Ограничение, связанное с требованиями к сточной воде:

$$\sum_{c=1}^{13} \sum_{u=1}^3 W_{c,u,t}^{\pm} P_{c,u,t}^{\pm} \leq S_t^{\pm}. \quad (11)$$

5. Ограничение по выбросам/сбросам опасных веществ:

$$\sum_{c=1}^{13} \sum_{u=1}^3 W_{c,u,t}^{\pm} P_{c,u,t}^{\pm} (1 - \eta_t^{\pm}) \leq HS_t^{\pm}. \quad (12)$$

6. Ограничение по лимитам водопотребления для промышленных предприятий:

$$\mu \left\{ \sum_{c=1}^3 W_{c,u,t}^{\pm} (\tilde{\beta}_{lb})_{c,t}^{\pm} \geq W_{c,3,t}^{\pm} \right\} \geq \lambda^{\pm}$$

$$\sum_{u=1}^3 W_{c,u,t}^{\pm} ((\beta_{lb})_{c,t}^{\pm} + (1-2\lambda^{\pm})((\beta_{lb})_{c,t}^{\pm} - (\underline{\beta}_{lb})_{c,t}^{\pm})) \geq W_{c,3,t}^{\pm} \quad (13)$$

$$\mu \left\{ \sum_{u=1}^3 W_{c,u,t}^{\pm} (\tilde{\beta}_{ub})_{c,t}^{\pm} \geq W_{c,3,t}^{\pm} \right\} \geq \lambda^{\pm}$$

$$\sum_{u=1}^3 W_{c,u,t}^{\pm} ((\beta_{ub})_{c,t}^{\pm} + (1-2\lambda^{\pm})((\beta_{ub})_{c,t}^{\pm} - (\underline{\beta}_{ub})_{c,t}^{\pm})) \geq W_{c,3,t}^{\pm}.$$

7. Неотрицательное ограничение:

$$W_{c,u,t}^{\pm} \geq 0, \quad (14)$$

где «~» – нечеткие множества; u – назначение потребляемой предприятием воды (1 – для хозяйственно-бытовых нужд, 2 – для основного и вспомогательного производственного процесса,

3 – на природоохранные мероприятия); $R_{c,u,t}^{\pm}$ – коэффициент выгоды-издержки (руб./м³); $C_{c,u,t}^{\pm}$ – коэффициент стоимости (руб./м³); $W_{c,u,t}^{\pm}$ – лимиты водопотребления для каждого водопользователя в рамках территориального природно-производственного комплекса в планируемый период (м³); $T_{c,u,t}^{\pm}$ – общее количество потребляемой воды (м³); $d_{c,u,t}^{\pm}$ – количество воды, потребляемой на хозяйственно-бытовые нужды; $\alpha_{c,u,t}^{\pm}$ – минимальная доля природоохранных мероприятий; $P_{c,u,t}^{\pm}$ – коэффициент сброса сточных вод; $S_{c,u,t}^{\pm}$ – максимальный сброс сточных вод; $\eta_{c,u,t}^{\pm}$ – доля удаления опасных химических веществ; $HS_{c,u,t}^{\pm}$ – общее количество опасных химических веществ (т); $(\beta_{lb})_{c,u,t}^{\pm}$ – минимальная доля потребляемой воды для основного и вспомогательного производства; $(\beta_{ub})_{c,u,t}^{\pm}$ – максимальная доля потребляемой воды для основного и вспомогательного производства.

Выводы

Выбор и обоснование наилучших доступных технологий на основе оценки жизненного цикла продукции позволит предприятиям радиоэлектронных и приборостроительных производств более рационально выстраивать концепцию своего перспективного развития, принимать эффективные управленческие решения при модернизации и/или реконструкции производственных процессов, обеспечивать экологичность и энергосбережение при использовании новых растворов и добавок отечественного производства.

Предложенный алгоритм принятия решений при нормировании нагрузки позволит предприятиям радиоэлектронных и приборостроительных производств разрабатывать стратегии планирования объемов водопотребления и водоотведения с учетом региональных условий и влияния других субъектов территориального природно-производственного комплекса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Ellis B.* Environmental issues in electronics manufacturing: A review. *Circuit World*, 2000, vol. 26 no. 2, pp. 17–21.
2. *Williams E.D., Ayres R.U., Heller M.* The 1.7 Kilogram Microchip: Energy and Material Use in the Production of Semiconductor Devices. *Environ. Sci. Technol.*, 2002, no. 36(24), pp. 5504–5510.
3. *Сравнительный анализ* процедур разработки, пересмотра и актуализации справочников по наилучшим доступным технологиям в Европейском союзе и Российской Федерации / Д. О. Скобелев, Т. В. Гусева, О. Ю. Чечеватова, А. Ю. Санжаровский, К. А. Щелчков, М. В. Бегак. М.: Издательство «Перо», 2018. 114 с.
4. *Alonso J.C., Rodrigo J., Castells F.* Design for environment of electrical and electronic automotive components based on life cycle assessment. *Life Cycle Management-Design for Environment. Internet-Journal Gate to EHS*, 2003, no. 3(3), pp. 1–7.
5. *Andrae A.S.G., Ostermark U., Liu J.* Life Cycle Assessment of a Telecommunications Exchange. *Journal of Electronics Manufacturing*, 2000, no. 10(3), pp.147–160. DOI: 10.1142/S096031310000186
6. *Жильникова Н. А.* Эколого-технологическое нормирование нагрузки на окружающую среду на предприятиях радиоэлектроники // *Радиопромышленность*. 2014. № 2. С. 112–118.
7. *Miao D.Y., Li Y.P., Huang G.H., Jang Z.F., Li C.H.* Optimization model for planning regional water resource systems under uncertainty. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2014, vol. 140, iss. 2, pp. 238–249.

REFERENCES

1. Ellis B. Environmental issues in electronics manufacturing: A review. *Circuit World*, 2000, vol. 26 no. 2, pp.17–21.
2. Williams E. D., Ayres R. U., Heller M. The 1.7 Kilogram Microchip: Energy and Material Use in the Production of Semiconductor Devices. *Environ. Sci. Technol.*, 2002, no. 36(24), pp. 5504–5510.
3. Skobelev D. O., Guseva T. V., Chechevatova O. Ju., Sanzharovskij A. Ju., Shhelchkov K. A., Begak M. V. *Sravnitelnyi analiz protsedur razrabotki, peresmotra i aktualizatsii spravochnikov po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam v Evropeiskom soyuze i Rossiiskoi Federatsii* [Comparative analysis of procedures for development, revision and updating of guides on the best available techniques in European Union and Russian Federation]. Moscow, Izdatelstvo «Pero» Publ., 2018, 114 p. (In Russian).
4. Alonso J. C., Rodrigo J., Castells F. Design for environment of electrical and electronic automotive components based on life cycle assessment. Life Cycle Management-Design for Environment. *Internet-Journal Gate to EHS*, 2003, no. 3(3), pp. 1–7.
5. Andrae A. S. G., Ostermark U., Liu J. Life Cycle Assessment of a Telecommunications Exchange. *Journal of Electronics Manufacturing*, 2000, no. 10(3), pp.147–160. DOI: 10.1142/S0960313100000186
6. Zhilnikova N. A. Ecological and technological standardization of the environmental load at radio electronics enterprises. *Radio industry (Russia)*, 2014, no. 2, pp.112–118. (In Russian).
7. Miao D. Y., Li Y. P., Huang G. H., Jang Z. F., Li C. H. Optimization model for planning regional water resource systems under uncertainty. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2014, vol. 140, iss. 2, pp. 238–249.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Жильникова Наталья Александровна, к. т. н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, тел.: +7 (921) 987-99-20, e-mail: nataliazhilnikova@gmail.com.

AUTHOR

Natalia A. Zhilnikova, Ph.D. (Engineering), associate professor, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, lit. A, ulitsa Bolshaya Morskaya, Saint-Petersburg, 190000, Russia, tel.: +7 (921) 987-99-20; E-mail: nataliazhilnikova@gmail.com.

Поступила 30.12.2019; принята к публикации 28.01.2020; опубликована онлайн 25.02.2020.
Submitted 30.12.2019; revised 28.01.2020; published online 25.02.2020.