

МЕТОДОЛОГИЯ УЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МИКРО- И НАНОПРИБОРОВ

С. А. МЕШКОВ

*Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005, Москва, Россия
E-mail: bauman@bmstu.ru*

Рассмотрена задача обеспечения на этапе проектирования основных показателей качества микро- и наноприборов — показателей назначения, технологичности, надежности. Групповые технологии, используемые при производстве микро- и наноприборов, обеспечивают корреляцию параметров прибора, формируемых в едином технологическом цикле, что накладывает ограничения на методы обеспечения серийнопригодности и надежности микро- и наноприборов. Традиционная методика проектирования не позволяет достичь оптимального сочетания показателей назначения, технологичности и надежности партии приборов. Предложена методология комплексного проектирования микро- и наноприборов, которая в рамках сложившейся групповой технологии производства позволяет достичь оптимальной увязки: показателей назначения, серийнопригодности в заданных условиях производства и надежности в заданных условиях эксплуатации при заданных ограничениях на показатели назначения прибора. В традиционную схему процесса проектирования введен этап конструкторско-технологической оптимизации, на котором обрабатываются параметры конструкции прибора с этапов схемотехнического и конструкторского проектирования, данные об их технологических разбросах — с этапа технологической подготовки производства, и данные о корреляции конструкторских параметров и показателей назначения прибора в заданных условиях эксплуатации. В результате оптимизации определяются поправки на номиналы параметров конструкции прибора, максимизирующие целевую функцию. В качестве целевой функции выступает вероятность нахождения показателей назначения прибора в пределах наложенных ограничений, вероятность выполнения заданных функций в течение времени эксплуатации, или гамма-процентная наработка до параметрического отказа. Предложенная методология отработана на примере приборов микро- и нанoeлектроники — смесителя и выпрямителя микроволновых радиосигналов с резонансно-туннельным диодом в качестве нелинейного элемента.

Ключевые слова: микро- и наноприборы, групповые технологии, показатели назначения, технологичность, надежность

Сложившаяся практика проектирования микро- и наноприборов включает в себя этапы системо- и схемотехнического, конструкторского проектирования, технологической подготовки производства (ТПП). На этапе схемотехнического проектирования определяется структура прибора, в результате схемотехнического проектирования получают схему электрическую и параметры схемных элементов, определяющих функциональные параметры устройства Y (показатели назначения), на этапе конструкторского проектирования определяются

параметры конструкции X . На этапе ТПП разрабатывается технологический маршрут, определяются параметры операций, проектируется необходимая технологическая оснастка.

Однако при этом не учитывается, что создание микро- и наноприборов предполагает, как правило, применение групповых технологий изготовления, в частности, планарных, если элементы прибора расположены на общей подложке. Особенностью групповых технологий обработки является коррелированность параметров прибора, элементы конструкции которого формируются одновременно на общей подложке. С другой стороны, расположение однотипных конструктивных элементов на общей подложке является причиной коррелированности процессов старения и деградации при эксплуатации прибора. Перечисленные обстоятельства являются причиной того, что традиционно применяемая линейная методика проектирования не позволяет достичь оптимального сочетания показателей назначения, характеризующих эксплуатационные свойства и область применения прибора, показателей технологичности и надежности партии приборов.

Одной из важнейших характеристик технологичности является серийнопригодность, которая количественно описывается вероятностью выхода годных изделий в заданных условиях производства. Проблема обеспечения серийнопригодности микроприборов на примере гибридных интегральных схем (ГИС) СВЧ-диапазона была поставлена в трудах [1—3] и развита, в частности, в работах [4, 5], где было показано, что при использовании групповых технологий обработки известные методы полной, неполной, групповой взаимозаменяемости, оперирующие конструкторским допуском в качестве инструмента обеспечения серийнопригодности и точности, неработоспособны ввиду коррелированности технологических погрешностей параметров приборов в пределах общей подложки. Применение метода настройки для элементов микронного размера сопряжено с резким увеличением стоимости изготовления, или невозможно ввиду конструкторско-технологических ограничений.

Целью настоящей работы является создание методологии комплексного проектирования микро- и наноприборов, которая при использовании сложившейся групповой технологии производства позволила бы достичь наилучшего соотношения основных показателей качества прибора: показателей назначения, серийнопригодности в конкретных условиях производства и надежности в заданных условиях эксплуатации при известных ограничениях на показатели назначения прибора.

Исходная концепция базируется на положении о том, что инструменты (варьируемые параметры) обеспечения заданных показателей качества прибора должны, с одной стороны, допускать их независимое варьирование, а с другой — быть независимыми от группового технологического процесса производства, который полагается неизменным. Такими параметрами являются номиналы конструктивных параметров X , а следовательно, и показатели назначения Y .

Методология проектирования в таких условиях направлена на создание прибора, который, с одной стороны, соответствует требованиям ТЗ по показателям назначения, а с другой, обладает оптимальными технологической себестоимостью годного изделия в серийном производстве в рамках конкретной технологии и наработкой на отказ в заданных условиях эксплуатации. Все три группы показателей качества прибора взаимосвязаны, причем гамма-процентная наработка прибора может рассматриваться как вероятность попадания случайных показателей назначения партии приборов в заданные ограничения (вероятность выхода годных), определенная после наработки t .

Традиционно задачи анализа и обеспечения заданной надежности приборов решаются с использованием модели внезапных отказов. Надежность прибора определяется по надежности входящих в его состав элементов, поэтому вероятность его безотказной работы P_a принимается равной произведению вероятностей безотказной работы P_i элементов:

$$P_a = P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_n. \quad (1)$$

Такой подход справедлив, если вероятности P_i независимы, что возможно, как правило, для приборов, состоящих из дискретных элементов.

В процессе эксплуатации элементы прибора, расположенные в пределах общей подложки, подвергаются воздействию факторов (повышенная температура, ионизирующие излучения и др.), ускоряющих деструктивные процессы в их структурах. Причем дестабилизирующим воздействиям подвергаются все расположенные в пределах подложки элементы одновременно, что является причиной корреляции скоростей деградации структур различных, но конструктивно подобных элементов, а значит и их функциональных параметров. С другой стороны, коррелированность скоростей деградации обусловлена подобием физических процессов, протекающих в них под действием внешних факторов. Таким образом, вероятности P_i , в формуле (1) не являются независимыми, значит, P_a должна рассматриваться как условная, и формула (1) для ее расчета неприменима.

Более адекватна рассматриваемому объекту модель надежности по постепенным отказам [6, 7]. Эта модель использует закономерности процессов старения и учитывает их вероятностную природу, представляя последовательность явлений и событий, которые приводят к отказу.

Рассмотрим задачу обеспечения надежности партии микро- и наноприборов, изготавливаемых с применением групповых технологий. Выбирается один из трех вариантов целевой функции.

1. $P_{\text{пф}}(t, \mathbf{Y}, \boldsymbol{\sigma}, \Delta)$ — вероятность выполнения заданных функций партией приборов, где t — время эксплуатации, $\mathbf{Y} = q(\mathbf{X})$ — вектор показателей назначения прибора, \mathbf{X} — вектор параметров конструкции прибора; $\boldsymbol{\sigma}$ — вектор технологических разбросов (технологическая точность) параметров конструкции прибора; Δ — вектор допустимых отклонений (допуски) показателей назначения прибора. Целевая функция определяется как

$$P_{\text{пф}}(0, t_3) = \int_0^{t_3} P_{\text{пф}}(t) dt, \quad P_{\text{пф}}(t_i) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\text{ф}}(\mathbf{Y}, t = t_i) d\mathbf{Y}. \quad (2)$$

Функцию $f_{\text{ф}}(\mathbf{Y})$ плотности вероятности показателей назначения с учетом технологических погрешностей параметров конструкции прибора и вероятности выполнения заданных функций получают как $f_{\text{ф}}(\mathbf{Y}) = P_{\text{ф}}(\mathbf{Y})f(\mathbf{Y})$, где $P_{\text{ф}}(\mathbf{Y})$ — зависимость вероятности выполнения заданных функций от значения \mathbf{Y} . Функция $P_{\text{ф}}(\mathbf{Y})$ получается с помощью метода экспертных оценок, функция $f(\mathbf{Y})$ строится методом вероятностного моделирования.

Описанные функции графически представлены на рис. 1, где $P_{\text{ф, min}}$ — минимально допустимая вероятность выполнения устройством заданных функций, $Y_{\text{ном}}$ — номинальное значение Y , $Y_{\text{min}}, Y_{\text{max}}$ — нижняя и верхняя границы допустимых отклонений Δ .

2. Если функция $P_{\text{ф}}(Y)$ не задана, в качестве целевой может выступать функция $P_{\text{Г}}(t, \mathbf{Y}, \boldsymbol{\sigma}, \Delta)$ вероятности попадания параметров \mathbf{Y} в заданные допуски Δ (вероятность выхода годных) за время эксплуатации прибора:

$$P_{\text{Г}}(0, t_3) = \int_0^{t_3} P_{\text{Г}}(t) dt, \quad P_{\text{Г}}(t_i) = \int_{Y_{\text{min}}}^{Y_{\text{max}}} f(Y, t = t_i) dY. \quad (3)$$

3. В качестве целевой функции выступает t_{γ} — гамма-процентная наработка партии приборов в заданных условиях эксплуатации.

Сформулируем критерии оптимальности: $\max P_{\phi}^{\Pi}(t, \mathbf{Y}, \sigma, \Delta)$ или $\max P_{\Gamma}(t, \mathbf{Y}, \sigma, \Delta)$, или $\max t_{\gamma}$. Управляемыми параметрами служат номинальные значения \mathbf{X} . Ограничения являются: $\Delta = \text{const}$, $\sigma = \text{const}$, $\mathbf{X} \in O_{\kappa}$, $\mathbf{X} \in O_{\Gamma}$, $P_{\Gamma}(t=0) \geq P_{\Gamma \text{min}}$, где O_{κ} , O_{Γ} — ограничения конструкторского и технологического характера. Вводится допущение о том, что функция $\mathbf{Y}(t)$ в допустимой области в промежутке времени, в пределах которого осуществляется поиск оптимального решения $(0, t_{\max})$, не имеет разрывов и экстремумов.

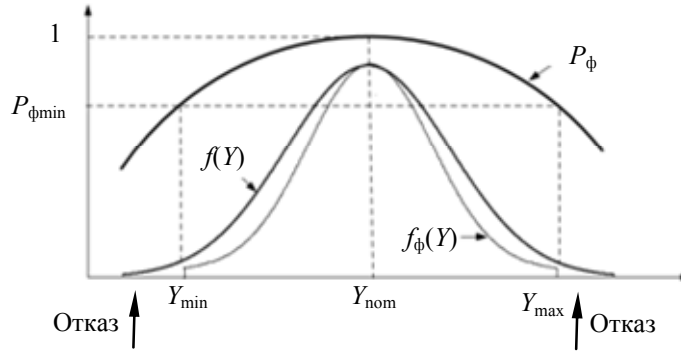


Рис. 1

В результате решения задачи оптимизации получают новые значения \mathbf{X}_{opt} и \mathbf{Y}_{opt} , которым соответствует максимум выбранной целевой функции. На рис. 2 представлена графическая интерпретация решаемой задачи при использовании критерия $\max P_{\Gamma}(t, \mathbf{Y}, \sigma, \Delta)$.

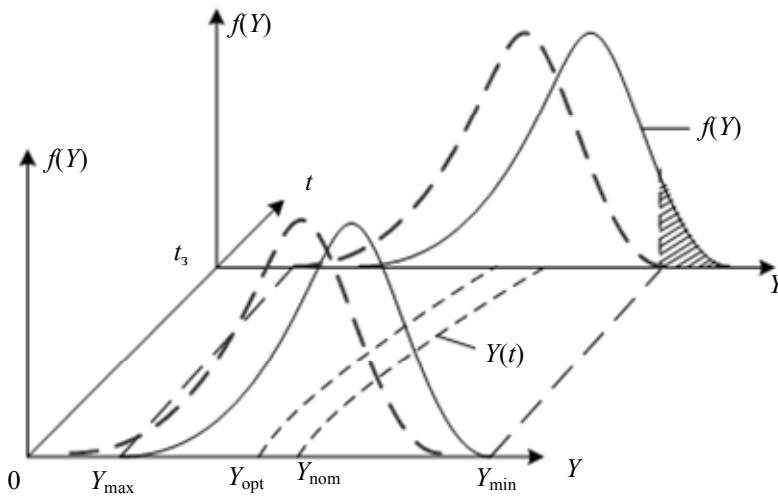


Рис. 2

При использовании критерия $\max P_{\Pi\phi}(t, \mathbf{Y}, \sigma, \Delta)$ графическое представление задачи выглядит аналогично.

Графическая интерпретация решаемой задачи при использовании критерия $\max t_{\gamma}$ приведена на рис. 3. Здесь через $t_{\gamma \text{исх}}$, $t_{\gamma \text{opt}}$ обозначены гамма-процентная наработка исходного и оптимизированного вариантов конструкции прибора, $P_{\text{бр}}$ — вероятность брака в начальный момент времени $P_{\text{бр}} = 1 - P_{\Gamma \text{min}}$.

Представленная методология является комплексной, поскольку позволяет при $t=0$ максимизировать вероятность выхода годных, или вероятность выполнения заданных функций партией приборов, т.е. решить задачу обеспечения серийнопригодности (технологичности), а

при введении временного фактора и учете процессов деградации элементов прибора при эксплуатации в условиях внешних воздействий — задачу обеспечения надежности при условии соответствия показателей назначения прибора заданным требованиям.

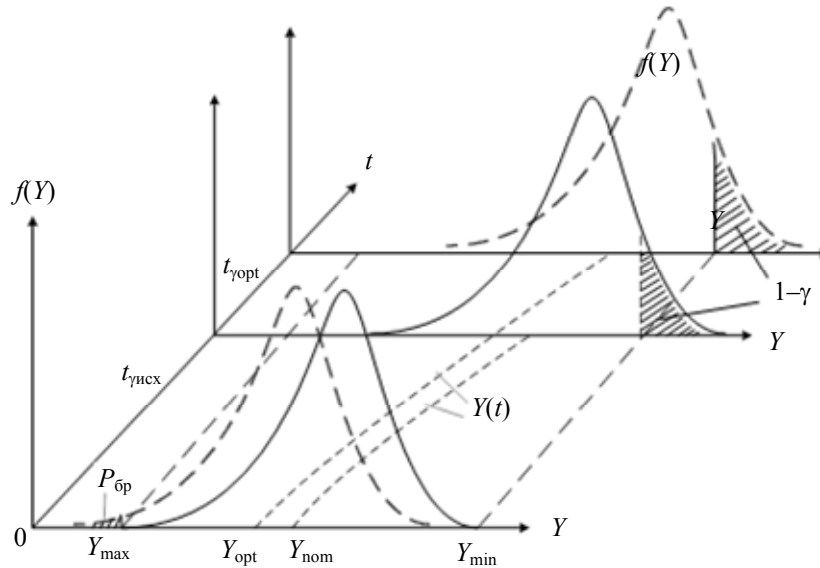


Рис. 3

Схема описанной методологии показана на рис. 4. В традиционную линейную схему процесса проектирования введен этап конструкторско-технологической оптимизации, на котором учитываются синтезированные на этапах схмотехнического и конструкторского проектирования параметры X и Y , а также данные о технологических разбросах σ с этапа ТППи и данные о кинетике конструкторских параметров $X(t)$ и показателей назначения $Y(t)$ прибора в заданных условиях эксплуатации. В результате конструкторско-технологической оптимизации определяются поправки на номиналы ΔX_{opt} и ΔY_{opt} , максимизирующие целевую функцию. Вероятность выхода годных приборов в начальный момент времени $t = 0$ при использовании целевой функции (1) или (3) может быть переведена в разряд ограничений $P_r \geq P_{ГЗ}$.

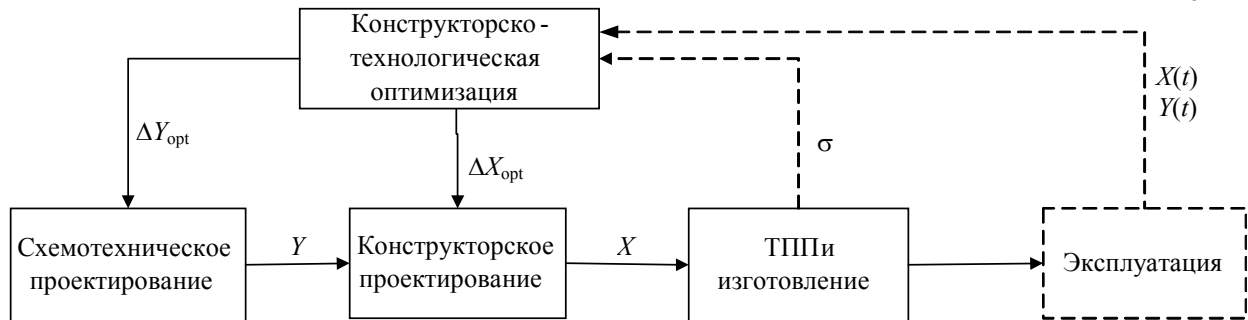


Рис. 4

Задача решается с использованием методов имитационного, в том числе вероятностного, моделирования показателей назначения прибора, физических процессов его деградации в заданных условиях эксплуатации, технологических погрешностей.

Описанная методология отрабатывалась на примере приборов микро- и нанoeлектроники — смесителя и выпрямителя микроволновых радиосигналов с резонансно-туннельным диодом (РТД) в качестве нелинейного элемента. Методической основой послужили результаты исследований процессов деградации РТД под действием повышенной температуры и ионизирующих излучений [8—13], и математическая модель деградации параметров РТД, построенная на их основе [14, 15].

Апробация описанной методологии показывает, что за счет оптимизации параметров конструкции прибора при неизменном технологическом процессе производства и соответствии показателей назначения наложенным ограничениям выход годных изделий может быть повышен на 10—15 %, гамма-процентная наработка в заданных условиях эксплуатации — на 10—30 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушминский И. П., Гудков А. Г., Дергачев В. Ф. и др. Конструкторско-технологические основы проектирования полосковых микросхем / Под ред. И. П. Бушминского. М.: Радио и связь, 1987. 272 с.
2. Бушминский И. П., Гудков А. Г., Дергачев В. Ф. Конструкторское проектирование микросхем СВЧ: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ, 1991. 225 с.
3. Бушминский И. П., Морозов Г. В. Технологическое проектирование микросхем СВЧ: Учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 356 с.
4. Гудков А. Г., Мешков С. А. Прогнозирование качества и надежности ИС СВЧ на этапах разработки и производства. Ч. 11. Автоматизированный вероятностный анализ параметров конструкций ИС СВЧ // *Машиностроитель*. 2008. № 12. С. 10—16.
5. Повышение надежности и качества ГИС и МИС СВЧ. Кн. 1 / Под ред. А. Г. Гудкова и В. В. Попова. М.: ООО „Автотест“, 2012. 212 с.
6. Чеканов А. Н. Расчеты и обеспечение надежности электронной аппаратуры: Учеб. пособие. М.: КНОРУС, 2012. 440 с.
7. Проников А. С. Параметрическая надежность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 560 с.
8. Makeev M. O., Ivanov Yu. A., Meshkov S. A. Assessment of the resistance to diffusion destruction of AlAs/GaAs nanoscale resonant-tunneling heterostructures by IR spectral ellipsometry // *Semiconductors*. 2016. Vol. 50, N 1. P. 83—88.
9. Makeev M. O., Meshkov S. A., Ivanov Yu. A. Studies of Diffusion Processes in AlAs/GaAs Resonant-Tunneling Heterostructures // *Key Engineering Materials*. 2017. Vol. 724. P. 48—52. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.724.48.
10. Makeev M. O., Meshkov S. A. Study of degradation processes kinetics in ohmic contacts of resonant tunneling diodes based on nanoscale AlAs/GaAs heterostructures under influence of temperature // *AIP Conf. Proc.* 2017. Vol. 1858. P. 020001. DOI: 10.1063/1.4989938.
11. Makeev M. O., Ivanov Yu. A., Meshkov S. A. et al. // 5th Intern. Workshop on Computer Science and Engineering: Information Processing and Control Engineering, WCSE 2015-IPCE, 2015. P. 260—265.
12. Kozubnyak S. A., Meshkov S. A., Naraikin O. S., Soboleva E. N., Shashurin V. D. Reliability Prediction of AlGaAs Resonant-Tunneling Diodes and Nonlinear Converters of Microwave Radio Signals Based on Them // *Nanotechnologies in Russia*. 2017. Vol. 12, is. 7—8. P. 360—368.
13. Makeev M. O., Мешков С. А., Снякин В. Ю., Смирнов А. Е., Иванов Ю. А. Исследование термической деградации омических контактов AlAs/GaAs резонансно-туннельных диодов на основе анализа кинетики вольт-амперных характеристик // *Электromеталлургия*. 2017. № 9. С. 24—30.
14. Makeev M. O., Meshkov S. A., Sinyakin V. Yu. RTD application in low power UHF rectifiers // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2016. Vol. 741, N 1. P. 012160. DOI:10.1088/1742-6596/741/1/012160.
15. Makeev M. O., Meshkov S. A., Sinyakin V. Yu. Methodology of technological and operational factors accounting in the process of complex optimal design of microand nanodevices manufactured using group technologies // *MATEC Web Conf.*, 2017. 129 03019. DOI: 10.1051/mateconf/201822402094.

Сведения об авторе

Сергей Анатольевич Мешков

— канд. техн. наук, доцент; Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, кафедра технологии приборостроения; E-mail: sb67241@mail.ru

Поступила в редакцию
15.04.19 г.

Ссылка для цитирования: Мешков С. А. Методология учета технологических и эксплуатационных факторов при проектировании микро- и наноприборов // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 10. С. 921—928.

METHODOLOGY FOR CONSIDERATION OF TECHNOLOGICAL AND OPERATIONAL FACTORS IN DESIGN OF MICRO- AND NANODEVICES

S. A. Meshkov

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russia
E-mail: bauman@bmstu.ru

The problem of provision of basic indicators of quality of micro- and nanodevices at the design phase is considered; the indicators include characteristics of performance, reliability, and manufacturability. The group technologies used in manufacturing micro and nanodevices provide interrelation between the parameters of a device formed in a single technological cycle, which imposes restrictions on the methods of ensuring serial suitability and reliability of micro- and nano instruments. The traditional design methodology does not allow to achieve an optimal combination of indicators of purpose, manufacturability and reliability of the batch of devices. A new methodology is proposed for integrated design of micro - and nanodevices that within the group of production technology allows to achieve optimal combination of the above indicators in given conditions of production and reliability in the operation conditions under the given constraints on the parameters the device purpose. A stage of technological optimization is included in traditional scheme of the design process. As a result of the optimization, corrections for the nominal values of the device design parameters are determined, maximizing the target function. For the target function, the probability of finding the indicators of the purpose of the device within the limits of the imposed restrictions is taken, i.e. the probability of performing the specified functions during the operating time, or gamma-percent operating time to parametric failure. The proposed methodology is worked out on the examples of micro - and nanoelectronics devices, namely, a mixer and a rectifier of microwave radio signals with a resonant tunnel diode as a nonlinear element.

Keywords: micro and nanodevices, group technologies, performance indices, manufacturability, reliability

REFERENCES

1. Bushminskiy I.P., Gudkov A.G., Dergachev V.F. et al. *Konstruktorsko-tekhnologicheskiye osnovy proyektirovaniya poloskovykh mikroskhem* (Design and Technological Basis for the Design of Strip Microcircuits), Moscow, 1987, 272 p. (in Russ.)
2. Bushminskiy I.P., Gudkov A.G., Dergachev V.F. *Konstruktorskoye proyektirovaniye mikroskhem SVCH* (Microwave IC Design), Moscow, 1991, 225 p. (in Russ.)
3. Bushminskiy I.P., Morozov G.V. *Tekhnologicheskoye proyektirovaniye mikroskhem SVCH* (Technological Design of Microwave Circuits), Moscow, 2001, 356 p. (in Russ.)
4. Gudkov A.G., Meshkov S.A. *Mashinostroitel'*, 2008, no. 12, pp. 10–16. (in Russ.)
5. Gudkov A.G., Popov V.V., ed., *Povysheniye nadozhnosti i kachestva GIS i MIS SVCH* (Improving the Reliability and Quality of GIS and MIS Microwave), Book 1, Moscow, 2012, 212 p. (in Russ.)
6. Chekanov A.N. *Raschety i obespecheniye nadezhnosti elektronnoy apparatury* (Calculations and Reliability of Electronic Equipment), Moscow, 2012, 440 p. (in Russ.)
7. Pronikov A.S. *Parametricheskaya nadezhnost' mashin* (Machine Parametric Reliability), Moscow, 2002, 560 p. (in Russ.)
8. Makeev M.O., Ivanov Yu.A., Meshkov S.A. *Semiconductors*, 2016, no. 1(50), pp. 83–88.
9. Makeev M.O., Meshkov S.A., Ivanov Yu.A. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 724, pp. 48–52. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.724.48
10. Makeev M.O., Meshkov S.A. *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1858, p. 020001. DOI: 10.1063/1.4989938.
11. Makeev M.O., Ivanov Yu.A., Meshkov S.A. et al. *5th International Workshop on Computer Science and Engineering: Information Processing and Control Engineering*, WCSE 2015-IPCE, 2015, pp. 260–265.
12. Kozubnyak S.A., Meshkov S.A., Naraikin O.S., Soboleva E.N., Shashurin V.D. *Nanotechnologies in Russia*, 2017, no. 7–8(12), pp. 360–368.
13. Makeyev M.O., Meshkov S.A., Sinyakin V. Yu., Smirnov A.E., Ivanov Yu.A. *Russian Metallurgy* (Metally), 2017, no. 9, pp. 24–30. (in Russ.)
14. Makeev M.O., Meshkov S.A., Sinyakin V.Yu. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2016, no. 1(741), pp. 012160. DOI:10.1088/1742-6596/741/1/012160.
15. Makeev M.O., Meshkov S.A., Sinyakin V.Yu. *MATEC Web Conf.*, 2017, P. 129 03019. DOI: 10.1051/mateconf/201822402094.

Data on author

Sergey A. Meshkov — PhD, Associate Professor; Bauman Moscow State Technical University, Department of Instrument-Making Technologies; E-mail: sb67241@mail.ru

For citation: Meshkov S. A. Methodology for consideration of technological and operational factors in design of micro- and nanodevices. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 10. P. 921—928 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-10-921-928