

ОБОБЩЕННЫЙ МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

И.Ш. НЕВЛЮДОВ, К.Л. ХРУСТАЛЕВ, В.О. БОРТНИКОВА

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина

Поступила в редакцию 23 апреля 2018

Аннотация. Разработан обобщенный метод автоматизированного проектирования технологических процессов изготовления микроэлектромеханических (МЭМС) акселерометров, который в отличие от существующих основан на двух методах: методе выбора типового технологического процесса и методе поиска аналогов отдельных подсистем и элементов МЭМС акселерометров, что позволит повысить эффективность проектных работ за счет снижения стоимости и времени изготовления. В рамках указанного метода разработана модель принятия решений о выборе типа МЭМС акселерометра по его функционально-конструктивным параметрам, модель поиска аналогов отдельных подсистем и элементов МЭМС акселерометров, а также модель выбора оборудования на основе четырех показателей: производительность, энергоэффективность, стоимость оборудования, срок службы.

Ключевые слова: акселерометр, МЭМС, технологический процесс, метод, автоматизация.

Abstract. A generalized method for the automated design of technological processes for the production of MEMS accelerometers is developed. This method is based on two methods: the method of selecting a standard technological processes and the method of searching for analogues of individual subsystems and elements of MEMS accelerometers, which will increase the efficiency of design work by reducing the cost and time of manufacture. Within the framework of the method, decision-making model to select the type of MEMS accelerometer for its functionally constructive parameters, model for searching analogues of individual subsystems and MEMS accelerometer elements, as well as a model for selecting equipment that, based on 4 indicators: productivity, energy efficiency, equipment price, service have been developed.

Keywords: accelerometer, MEMS, technological process, method, computer-aided design.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 113, No. 3, pp. 94-99

Generalized method of computer-aided design

of technological processes for MEMS accelerometers manufacturing

I.Sh. Nevliudov, K.L. Khrustalev, V.O. Bortnikova

Введение и постановка задачи исследования

Микроэлектромеханический (МЭМС) акселерометр представляет собой сложный объект. Разработка новых МЭМС акселерометров и технологии их изготовления связаны со сложной научно-технической задачей проектирования технологических процессов (ТП) с учетом требований обеспечения геометрических и функциональных параметров. Эти параметры зависят от типа МЭМС акселерометра, который необходимо изготовить.

Несмотря на современные разработки в области САПР и большое количество научно-исследовательских работ, остается нерешенная проблема, которая заключается в повышении эффективности автоматизированного проектирования ТП изготовления МЭМС акселерометров с учетом специфики многоуровневого автоматизированного проектирования и роста количества типов МЭМС акселерометров и вариантов ТП их изготовления, что связано с ограниченностью существующих математических моделей и методов автоматизированного проектирования технологических процессов. Вследствие чего разработка новых математических моделей и методов автоматизированного проектирования ТП является актуальной задачей.

Для решения задачи повышения эффективности автоматизированного проектирования ТП изготовления МЭМС акселерометров необходимо использовать системный подход к процессу проектирования. На этапе автоматизированного проектирования необходимо снизить стоимость, время проектирования и изготовления путем разработки моделей, методов и программного обеспечения.

Предлагается следующая общая постановка задачи автоматизированного проектирования технологических процессов изготовления МЭМС акселерометров:

- выбор типа МЭМС акселерометра;
- выбор МЭМС акселерометра-аналога;
- выбор структуры ТП;
- выбор оборудования ТП.

Обобщенный метод автоматизированного проектирования ТП изготовления МЭМС акселерометров

Изготовление МЭМС акселерометров реализуется с использованием различных частных технологий, основанных на различных методах обработки заготовки [1]. В результате возникает задача формирования технологического процесса и его синтеза. Решение этой задачи имеет итерационный характер, т. е. осуществляется в несколько последовательных этапов, с постепенным уточнением содержания ТП изготовления МЭМС акселерометров.

Предлагается обобщенный метод автоматизированного проектирования ТП изготовления МЭМС акселерометров. В отличие от известных, он основан на двух методах: методе выбора типового ТП и методе поиска аналогов отдельных подсистем и элементов МЭМС акселерометров. Структурная модель метода представлена на рис. 1.



Рис. 1 Структурная модель обобщенного метода автоматизированного проектирования ТП изготовления МЭМС акселерометра

Входными данными для автоматизированного проектирования ТП изготовления МЭМС акселерометров является техническое задание (ТЗ) с указанными функционально-конструктивными параметрами, которыми должно обладать изделие, а также разработанная 3D-модель. На основе предложенной концептуальной модели МЭМС акселерометра [2] осуществляется формирование вектора исходных данных.

После получения данных происходит выбор типа МЭМС акселерометра, по которому осуществляется поиск МЭМС акселерометра-аналога. Если поиск прошел успешно, то переходим к методу выбора типового ТП [3], иначе происходит поиск по элементам конструкции МЭМС акселерометров. При успешном поиске элементов конструкции осуществляется поиск операций их изготовления и формирование МЭМС акселерометра как единой структуры. Иначе осуществляется поиск на более низком уровне – уровне элементарных элементов и поиск операций их изготовления. Затем происходит формирование элементов конструкции и целостной структуры.

Далее осуществляется структурно-параметрический синтез ТП изготовления МЭМС акселерометров при помощи модели [4], выбор оборудования по стоимостным и временным критериям и проверка адекватности полученной модели путем имитационного моделирования [5]. Если проверка адекватности прошла успешно, то происходит формирование технической документации (маршрутной карты ТП), иначе возвращаемся к изменению структуры ТП до тех пор, пока она не будет удовлетворять заданным параметрам.

Модель выбора типа МЭМС акселерометра

Если рассмотреть задачу выбора типа МЭМС акселерометра, то известно множество типов МЭМС акселерометров, каждый из которых характеризуется функциональными и конструктивными параметрами. Необходимо осуществить выбор типа МЭМС акселерометра согласно заданным параметрам. На базе выбранного типа осуществляется выбор акселерометра в целом или его структурных элементов.

Для того чтобы принять решение о выборе типа МЭМС акселерометра по его функционально-конструктивным параметрам, необходимо определить закон принадлежности. В рамках этой работы предложено использовать схему приближенных рассуждений [6].

Пусть $RU = \{RU_1, RU_2, \dots, RU_m\}$ система правил вида:

$RU : \text{àñè} x_1 \text{ àñòü } P_{i1} \text{ è } \text{àñè} x_2 \text{ àñòü } P_{i2}, \text{ è } \dots \text{ àñè} x_m \text{ àñòü } P_{im}, \text{ òí } \lambda \text{ àñòü } Ak, i = \overline{1, m},$ где x_1, x_2, \dots, x_m – входные параметры МЭМС акселерометра полученные из ТЗ, $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$; P_{im} – входные параметры, которые описаны моделью [2]; λ – МЭМС акселерометр, который описан входными параметрами x_1, x_2, \dots, x_m ; Ak – искомый тип МЭМС акселерометра.

Для каждого m множества P_{im} имеется одна область определения, так как формализует термы одной лингвистической переменной, связанной с параметром x_m .

Предположим, что функция принадлежности $\mu_{P_{im}}(u) \in F_m(X)$, следовательно, можно записать: $P_{im}(u) = \mu_{P_{im}}(u)$, где u – конкретное значение входного параметра из модели [2]; $\mu_{P_{im}}(u)$ – принадлежность u параметра к множеству P_{im} .

Для каждого правила RU_m рассчитывается степень срабатывания, но необходимо последовательно определять правило по каждому параметру, так как это правило не всегда срабатывает. Для решения этой задачи предлагается расширить набор значений конкретных параметров $(u_1^*, u_2^*, \dots, u_n^*)$, где $u_n^* \in F_m$, тогда степень срабатывания рассчитывается по формуле:

$\omega_i = \min(\omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{in})$, где $\omega_{in} = P_{im}(u_n^*)$ – степень срабатывания правила RU_m по n – входу.

На основе степени срабатывания ω_i определяется вывод из правила RU_i : $\lambda_i^* = \{\omega_i / Ak_i\}$ и определяется общий вывод из системы правил RU_m : $\tilde{\lambda} = \bigcup_{i=1}^m \lambda_i^* = \{\omega_1 / Ak_1\} \cup \{\omega_2 / Ak_2\} \cup \dots \cup \{\omega_m / Ak_m\}$, где $\tilde{\lambda}$ – множество возможных значений входных параметров МЭМС акселерометра из ТЗ.

Тогда известно множество типов МЭМС акселерометров $Ak^e = \{Ak^e\}$, $e = \overline{1, e'}$ и множество параметров в каждом типе $Ak^e = \{Ak_n^e\}$, $n = \overline{1, n^e}$. Введем переменную $X_{en} = \{0; 1\}$, где $X_{en} = 1$, если выбран МЭМС акселерометр e -го типа с n -ми параметрами, $X_{en} = 0$ в противном случае. Необходимо определить тип МЭМС акселерометра и его параметры по функционально-конструктивным ограничениям. Из множества типов может быть выбран только один МЭМС акселерометр с заданными параметрами: $\sum_{e=1}^{e'} \sum_{n=1}^{n^e} X_{en} = 1$.

Эта задача относится к задачам линейного дискретного программирования с булевыми переменными.

Модель поиска аналогов отдельных подсистем и элементов МЭМС акселерометра

Необходимо разработать модель, которая позволяет осуществить поиск МЭМС акселерометра-аналога с учетом того, что поиск может дать отрицательный результат, тогда представим структурную модель МЭМС акселерометра:

- уровень целостной структуры МЭМС акселерометра, который состоит из элементов конструкции, а элементы конструкции состоят в свою очередь из элементарных элементов;
- уровень элементов конструкции (палец, инерционная масса и т. п.);
- уровень элементарных элементов (балки, пружина, пластина и т. д.).

Поэтому формализованное описание структуры МЭМС акселерометра можно представить следующим образом: $S_{Ak} = \langle L, Z, O, \hat{E}, \hat{I} \rangle$, где L – множество элементарных элементов МЭМС акселерометра, $L = \{L_i\}$, $i = \overline{1, i'}$, i' – количество элементарных элементов; Z – множество элементов

конструкции МЭМС акселерометра, $Z = \{Z_k\}, i = \overline{1, k'}, k' -$ количество элементов конструкции; $O -$ множество структур МЭМС акселерометра, $O_j = \langle L_i, Z_k \rangle$; $K -$ множество отношений между элементами конструкции Z и структурой O , $K = \{K_i\}, i = \overline{1, j'}, j' -$ количество взаимосвязей; $M -$ множество отношений между элементарными элементами L и элементами конструкции Z , $M = \{M_i\}, i = \overline{1, j'}, j' -$ количество взаимосвязей.

Если ввести переменную $V = \{0, 1\}$, где $V = 1$, если выбран j -й МЭМС акселерометр, иначе $V = 0$, переход к поиску элементов конструкции.

Если ввести переменную $J = \{0, 1\}$, где $J = 1$, если выбран k -й элемент конструкции МЭМС акселерометра, формирование структуры МЭМС акселерометра $O_j = \langle L_i, Z_k, K_j \rangle$, иначе $J = 0$, переход к поиску элементарных элементов.

Если ввести переменную $U = \{0, 1\}$, где $U = 1$, если выбран i -й элементарный элемент МЭМС акселерометра, иначе $U = 0$.

Если ввести переменную $I = \{0, 1\}$, где $I = 1$, если j -я взаимосвязь между элементами конструкции Z и структурой O существует, иначе $I = 0$.

Если ввести переменную $G = \{0, 1\}$, где $G = 1$, если j -я взаимосвязь между элементарными элементами МЭМС акселерометра L и элементами конструкции Z существует, иначе $I = 0$.

Результаты решения этой задачи являются исходными данными для постановки задачи выбора МЭМС акселерометра-аналога. Из множества МЭМС акселерометров необходимо осуществить выбор МЭМС акселерометра-аналога. На базе выбранного МЭМС акселерометра-аналога осуществляется выбор структуры ТП и способ усовершенствования за счет выбора нового оборудования.

Модель выбора оборудования

Необходимо из множества заданного оборудования $\hat{A}^v = \{\hat{A}^v\}, v = \overline{1, v'}$ для каждой операции ТП выбрать оборудование. Введем переменную $\bar{X}_v = \{0, 1\}$, где $\bar{X}_v = \{1\}$, если v -е оборудование выбрано, в противном случае $\bar{X}_v = \{0\}$.

Каждое оборудование характеризуется рядом показателей: производительность v -го оборудования (Pr_v), стоимость v -го оборудования (C_v), энергоэффективность v -го оборудования (E_v) и срок службы v -го оборудования (T_v).

Эта задача решается по следующим критериям:

– максимальная производительность оборудования: $F_1 = \max \sum_{v=1}^{v'} Pr_v X_v \leq Pr_\zeta$;

– минимальная стоимость оборудования: $F_2 = \min \sum_{v=1}^{v'} C_v X_v \leq C_\zeta$;

– максимальная энергоэффективность оборудования: $F_3 = \max \sum_{v=1}^{v'} E_v X_v \leq E_\zeta$;

– максимальный срок службы оборудования: $F_4 = \max \sum_{v=1}^{v'} T_v X_v \leq T_\zeta$.

В задачах: $Pr_\zeta, C_\zeta, E_\zeta, T_\zeta -$ заданные значения производительности, стоимости, энергоэффективности, срока службы соответственно.

Для каждой операции может быть выбрано только одно оборудование.

Критерии, с помощью которых оцениваются решения, противоречивы, имеют различные физический смысл, размерность и интервал изменения. Оценка ценности решения по каждому из

критериев в исследовании проводится с помощью функции полезности вида [7]: $R_i = \frac{F_i - F_i^-}{F_i^+ - F_i^-}$.

Выбор оптимальных решений осуществляется: $x^o = \sum_{i=1}^4 \alpha_i R_i \rightarrow \max$, где α_i – относительная важность критериев, выраженная вектором весовых коэффициентов $\alpha = \{ \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4 \}$.

Заключение

Разработан обобщенный метод автоматизированного проектирования технологических процессов изготовления МЭМС акселерометров, который в отличие от существующих основан на двух методах: методе выбора типового ТП и методе поиска аналогов отдельных подсистем и элементов МЭМС акселерометров, что позволит повысить эффективность проектных работ за счет снижения стоимости и времени изготовления.

В зависимости от типа МЭМС акселерометра меняется структура ТП, количество и последовательность этапов, операций, переходов, оборудования. Для осуществления выбора типа МЭМС акселерометра разработана модель принятия решений по функционально-конструктивным параметрам.

Учитывая, что МЭМС акселерометр состоит из различных блоков (элементов конструкции и элементарных элементов), разработана модель поиска аналогов отдельных подсистем и элементов, учитывающая связи между ними. Это позволит использовать комплексный подход к автоматизированному проектированию ТП изготовления МЭМС акселерометров, поскольку сначала возможно осуществить поиск по выбранному типу акселерометра-аналога и найти типовой ТП, а при отсутствии такого воспользоваться поиском элементов конструкции и элементарных элементов на более низких уровнях.

После выбора типа МЭМС акселерометра необходимо провести синтез структуры ТП, выполнить подбор оборудования, провести имитационное моделирование полученной структуры и определить экономические показатели полученного решения. Основываясь на результатах имитационного моделирования вносятся правки в полученный ТП.

Для реализации выбора оборудования предложена модель на основе четырех показателей: производительность, энергоэффективность, стоимость оборудования, срок службы. Ее использование позволит получать более эффективные проектные решения, учитывающие множество функционально-стоимостных характеристик и ограничений при выборе оборудования.

Список литературы

1. Теслюк В.М., Денисюк П.Ю. Автоматизация проектування мікроелектромеханічних систем на компонентному рівні. Монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. 192 с.
2. Accelerometer parameters Decomposition model for technological process design automation / I. Nevlyudov [et al.] // Вісн. Національного університету «Львівська політехніка». Збірник наукових праць. Серія: Комп'ютерні системи проектування теорія і практика. 2015. № 828. С. 11–15.
3. Невлюдов И.Ш., Пономарева А.В., Бортникова В.О. Модель принятия решения на этапе проектирования технологического процесса изготовления МЭМС акселерометров. Вісн. НТУ «ХПИ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. 2016. № 4 (1176). С. 63–67.
4. Невлюдов И.Ш., Бортникова В.О. Структурно-параметрическая модель технологического процесса изготовления МЭМС акселерометра. Наукові праці ДонНТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. 2017. № 1 (30). С. 6–16.
5. Невлюдов И.Ш., Бортникова В.О. Імітаційна модель технологічного процесу виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів. Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського Серія: Технічні науки. 2018. Т. 29 (68) № 1. Ч. 1. С. 210–216.
6. Сб. матер. конф. «Нечеткие системы, мягкие вычисления и интеллектуальные технологии». Т. 2. Санкт-Петербург, 3–7 июля 2017 г.
7. Оверзгельдыев А.О., Петров Э.Г., Петров К.Э. Синтез и идентификация моделей многофакторного оценивания и оптимизации. Киев: «Наукова думка». 2002. 163 с.

References

1. Tesljuk V.M., Denisjuk P.Ju. Avtomatizacija proektuvannja mikroelektromehanichnih sistem na komponentnomu rivni. Monografija. L'viv: Vidavnicтво L'vivs'koї politehniky, 2011. 192 s. (in Russ.)

2. Accelerometer parameters Decomposition model for technological process design automation / I. Nevludov [et al.] // Visn. Nacional'nogo universitetu «L'vivs'ka politehnika». Zbirnik naukovih prac'. Serija: Komp'juterni sistemi proektuvannja teorija i praktika. 2015. № 828. S. 11–15.
3. Nevljudov I.Sh., Ponomareva A.V., Bortnikova V.O. Model' prinjatija reshenija na jetape proektirovanija tehnologicheskogo processa izgotovlenija MJeMS akselerometrov. Visn. NTU «HPI». Serija: Mehaniko-tehnologichni sistemi ta kompleksi. 2016. № 4 (1176). S. 63–67. (in Russ.)
4. Nevljudov I.Sh., Bortnikova V.O. Strukturno-parametricheskaja model' tehnologicheskogo processa izgotovlenija MJeMS akselerometra. Naukovi praci DonNTU. Serija: Obchisljuval'na tehnika ta avtomatizacija. 2017. № 1 (30). S. 6–16. (in Russ.)
5. Nevljudov I.Sh., Bortnikova V.O. Imitacijna model' tehnologichnogo procesu vigotovlennja mikroelektromehaničnih akselerometriv. Vcheni zapiski Tavrijs'kogo nacional'nogo universitetu im. V.I. Vernads'kogo Serija: Tehnichni nauki. 2018. T. 29 (68) № 1. Ch. 1. S. 210–216. (in Russ.)
6. Sb. mater. konf. «Nechetkie sistemy, mjagkie vychislenija i intelektual'nye tehnologii». T. 2. Sankt-Peterburg, 3–7 ijulja 2017 g. (in Russ.)
7. Overzgel'dyev A.O., Petrov Je.G., Petrov K.Je. Sintez i identifikacija modelej mnogofaktornogo ocenivanja i optimizacii. Kiev: «Naukova dumka». 2002. 163 s. (in Russ.)

Сведения об авторах

Невлудов И.Ш., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники Харьковского национального университета радиоэлектроники.

Хрусталеv К.Л., к.т.н., старший преподаватель кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники Харьковского национального университета радиоэлектроники.

Бортникова В.О., ассистент кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники Харьковского национального университета радиоэлектроники.

Information about the authors

Nevliudov I.Sh., D.Sci., professor, head of department of computer-integrated technologies, automation and mechatronics of Kharkiv national university of radioelectronics.

Khrustalev K.L., PhD, senior lecturer of department of computer-integrated technologies, automation and mechatronics of Kharkiv national university of radioelectronics.

Bortnikova V.O., assistant of department of computer-integrated technologies, automation and mechatronics of Kharkiv national university of radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

61166, Украина,
г. Харьков, пр. Науки, 14,
Харьковский национальный
университет радиоэлектроники
тел. +38 (057) 702-14-86;
e-mail: viktorii.a.bortnikova@nure.ua
Бортникова Виктория Олеговна

Address for correspondence

61166, Ukraine,
Kharkov, Nauka ave., 14
Kharkiv national
university of radioelectronics
tel. +38 (057) 702-14-86;
e-mail: viktorii.a.bortnikova@nure.ua
Bortnikova Viktoriia Olegivna