

УДК 658.012:681.324

А.В. Скатков, профессор, д-р техн. наук,**И.А. Балакирева, доцент, канд. техн. наук***Севастопольский национальный технический университет,**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: kvt@sevgtu.sebastopol.ua***АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ КОНТРОЛЯ КМОП-ТЕХНОЛОГИЙ**

Выполнена постановка задачи определения частоты контроля при управлении технологиями производства изделий комплементарной логики на транзисторах металл-оксид-полупроводник (КМОП). Предложены правила принятия решений при оперативном управлении производством, на основании выполненных вычислительных экспериментов обсуждаются полученные результаты.

Ключевые слова: дрейф параметров, частота контроля, многономенклатурное производство, КМОП-технология, принятие решений.

КМОП-технологии в настоящее время являются ведущими при производстве изделий микроэлектроники, спектр применения которых охватывает и вычислительную технику, и устройства радиоэлектроники, и бытовой техники.

Автоматизация оперативного контроля производства изделий микроэлектроники позволяет быстро реагировать на изменение производственных условий с целью распознавания и, при необходимости, компенсации отклонений в ходе производственного цикла от нормативных условий.

В данной статье рассматривается подход к решению поставленной задачи, в котором разрабатываются правила принятия решений в ходе определения оптимального режима контроля при оперативном управлении многономенклатурным производством в условиях дрейфа параметров [1, 2].

Цель статьи заключается в постановке и решении задачи выбора оптимальной частоты операций контроля для формирования правила принятия решений при оперативном управлении технологическим процессом микроэлектроники. В качестве критериев оптимизации рассматриваются издержки, связанные с запуском изделий в производство, а также затраты, необходимые для организации контроля параметров технологического процесса (ТП).

Задача определения оптимальной частоты контроля параметров ТП рассматривается на примере многономенклатурного ТП производства процессоров, основанных на КМОП-технологии. Классификация процессоров производится по величине рассеиваемой мощности. Следуя обозначенной цели, необходимо сформулировать задачу управления ТП так, чтобы при выполнении плана по объему и номенклатуре минимизировать объем запуска изделий в производство при минимальных затратах на контроль параметров ТП.

Модель минимизации коэффициента запуска изделий в производство при условии выполнения плана по объему и номенклатуре, подробно описанная в [3], представляется следующим образом:

$$K_{\text{зан}}(M) \rightarrow \min. \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n p_{ij} \eta_j \geq q_i, \quad i = \overline{1, m}. \quad (2)$$

На основании модели (1), (2) определяется положение центров настройки ТП, а также интенсивности использования центров, минимизирующие объем запуска изделий в производство. На рисунке 1 показаны результаты решения задачи определения оптимальных параметров ТП.

В соответствии с ограничениями (2) вычисленный оптимальный объем выпуска изделий в i -ю номенклатурную группу q_i^* может быть равен плановому: $q_i^* = q_i$, или превышать его. В случае равенства планового и вычисленного объемов, номенклатурную группу является дефицитной. На рисунке 1 дефицитными являются первая и третья номенклатурные группы – уровень оптимального объема выпуска указан пунктирной линией. Подмножество дефицитных групп обозначим DEF . Во второй номенклатурной группе имеется перепроизводство изделий по отношению к плановому заданию.

В реальной ситуации под воздействием случайных факторов на параметры ТП центр настройки процесса постоянно смещается относительно вычисленных оптимальных координат, то есть имеет место дрейф параметров ТП $m_j^* + m(t)$, где m_j^* – вычисленное оптимальное положение j -го центра настройки. Такая ситуация может привести: во-первых, к невыполнению плана по номенклатуре в дефицитных

номенклатурных группах; во-вторых, к перепроизводству изделий в иных группах. И то, и другое влечет за собой снижение эффективности производства в целом.

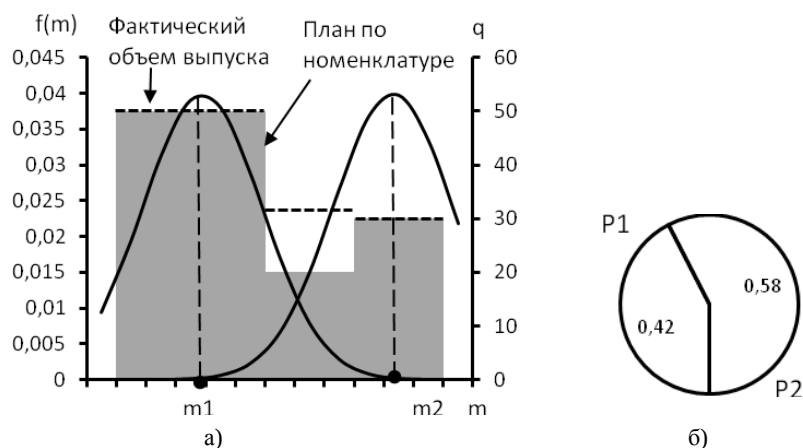


Рисунок 1 – Распределение классификационного признака изделий при оптимальных центрах настройки ТП: а) положение центров настройки ТП; б) интенсивности использования центров

В связи с этим необходимо организовать проведение контроля положения центра настройки и компенсировать его отклонение от оптимального положения. Контроль и компенсация параметров ТП ведут к определенным материальным затратам. В такой ситуации целесообразно поставить задачу определения частоты контрольных операций, при которой потери, связанные с дрейфом параметров были бы минимальными. Функцию потерь можно представить, как

$$F(\tau_j) = C_{\partial p}^- \vartheta_{\partial p}^-(\tau_j) + C_{\partial p}^+ \vartheta_{\partial p}^+(\tau_j) + C_k \vartheta_k(\tau_j), \quad (3)$$

где τ_j – интервал времени между операциями контроля параметров ТП при использовании j -го центра настройки; $\vartheta_{\partial p}^-$ и $\vartheta_{\partial p}^+$ – соответственно относительный объем потерь, связанный с невыполнением плана в дефицитных номенклатурных группах и перепроизводством в иных; ϑ_k – относительный объем потерь, связанных с контролем параметров ТП; $C_{\partial p}^-$, $C_{\partial p}^+$, и C_k – весовые коэффициенты, соответственно определяющие цену потерь при дрейфе, а также контроле и компенсации параметров. Коэффициенты $C_{\partial p}^-$, $C_{\partial p}^+$, и C_k устанавливаются на основе функции предпочтений ЛПР. Область изменения каждого из них является отрезком с границами $[0, 1]$, и сумма их равна $C_{\partial p}^- + C_{\partial p}^+ + C_k = 1$.

Пусть время проведения ТП равно T , а T_j – время использования j -го центра, $\sum_{j=1}^n T_j = T$. Дрейф j -го центра настройки происходит за время T_j . Разобьем интервал времени T_j на l отрезков $\Delta t = \frac{T_j}{l}$, тогда за время Δt центр настройки сместится на величину Δm . Вероятность выпуска изделий в i -ю группу при использовании j -го центра зависит от координаты центра настройки ТП, которая, в свою очередь, является функцией времени – $p_{ij}(m(t))$. За время T_j вероятность выхода изделий в i -ю группу равна:

$$p_{ij}(T_j) = \sum_{k=1}^l p_{ij}(m_j^* + k\Delta m(t)) \frac{\Delta t}{T_j} = \frac{1}{T_j} \sum_{k=1}^l p_{ij}(m_j^* + k\Delta m(t)) \Delta t. \quad (4)$$

При $\Delta t \rightarrow 0$ и в предположении непрерывности переменной t выражение (4) примет вид

$$p_{ij}(T_j) = \frac{1}{T_j} \int_0^{T_j} p_{ij}(m_j^* + m(t)) dt. \quad (5)$$

Поскольку различные центры m_j используются в ходе ТП последовательно, то предлагается решать поставленную задачу для каждого из используемых центров в отдельности.

Для минимизации потерь, связанных с выполнением плана по номенклатуре необходим контроль изменения координат центра настройки и их компенсация. Пусть контроль осуществляется периодически

с временным интервалом τ_j . В этом случае вероятность выпуска изделий $p_{ij}(m(t))$ с учетом выражения (5) представляется как:

$$p_{ij}(\tau_j) = \frac{1}{T_j} \int_0^{\tau_j} p_{ij}(m_j^* + m(t)) dt. \quad (6)$$

Потери выпуска изделий в дефицитную номенклатурную группу за время τ_k при дрейфе j -го центра равны:

$$\vartheta_{op}^-(\tau_k) = q_{ij}^* - q_{ij}^{\text{факт}} = q_{ij}^* - N^* p_{ij}(t). \quad (7)$$

Здесь q_{ij}^* и N^* – соответственно вычисленные оптимальные значения выпуска изделий в i -ю группу при j -м центре настройки и объем запуска изделий в производство, $q_{ij}^{\text{факт}}$ – фактический объем выпуска изделий в i -ю группу при дрейфе j -го центра.

Если группа не является дефицитной, то в ходе дрейфа параметров ТП возможно как увеличение объема перепроизводства изделий в номенклатурную группу $q_{ij}^* < q_{ij}^{\text{факт}}$, что является не желательным фактором, так и уменьшение объема перепроизводства, если $q_{ij}^* \geq q_{ij}^{\text{факт}}$, что не приводит к потерям, связанным с дрейфом параметров. Разнообразие подобных условий определяется номенклатурным планом и оптимальным положением центров настройки. Если возникает ситуация $q_{ij}^* < q_{ij}^{\text{факт}}$, то она ведет к потерям, равным:

$$\vartheta_{op}^+(\tau_k) = q_{ij}^{\text{факт}} - q_{ij}^* = N^* p_{ij}(\tau_k) - q_{ij}^*.$$

Количество контрольных операций n_j^k при использовании j -го центра настройки связано с временными параметрами соотношением

$$n_j^k = \frac{T_j}{\tau_j}, \quad (8)$$

тогда общие затраты на операции контроля в ходе ТП определяются как $\vartheta_k = C_k n_j^k$.

Учитывая (4) – (8), а также, просуммировав потери от дрейфа параметров для всех номенклатурных групп, можно выразить цель задачи оптимизации операции контроля в условиях дрейфа j -го центра. Таким образом, выражение (3) примет вид:

$$F(\tau_j) = C_{op}^- \sum_{i \in DEF} \left(q_{ij}^* - \frac{1}{T_j} \int_0^{\tau_j} p_{ij}(m_j^* + m(t)) dt \right) + C_{op}^+ \sum_{i \notin DEF} \left(\frac{1}{T_j} \int_0^{\tau_j} p_{ij}(m_j^* + m(t)) dt - q_{ij}^* \right) + C_k \frac{T_j}{\tau_j}. \quad (9)$$

Таким образом, учитывая (9) и просуммировав потери при использовании всех центров настройки в ходе ТП, можно определить потери в течение всего производственного цикла $F = \sum_{j=1}^n F(\tau_j)$.

Если цена потерь, связанная как с невыполнением плана в дефицитных группах, так и с перепроизводством в недефицитных одна и та же, т.е. $C_{op}^- = C_{op}^+ = C_{op}$, то выражение (9) можно упростить. В этом случае оно примет вид:

$$F(\tau_j) = C_{op} \sum_{i=1}^m \left| q_{ij}^* - \frac{1}{T_j} \int_0^{\tau_j} p_{ij}(m_j^* + m(t)) dt \right| + C_k \frac{T_j}{\tau_j}, \quad q_{ij}^* < q_{ij}^{\text{факт}} \cup i \notin DEF. \quad (10)$$

Для исследования влияния параметров задачи на характер изменения целевой функции проведен вычислительный эксперимент. Эксперимент проводился при следующих условиях. Исходные данные для вычислительного эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики производственного плана выпуска КМОП-процессоров

Номенклатурные группы	I	II	III
Границы групп, Вт	33...60	60...75	75...85
План выпуска процессоров, доли	0,50	0,20	0,30

Результаты определения оптимального технологического режима, изображенные на рисунке 1, являются следующими: коэффициент запуска – $K_{\text{зап}}=1,375$; координаты центров настройки ТП – $M^* = (m_1^*; m_2^*) = (47; 79)$ Вт; интенсивности использования центров $P = (P_1^*; P_2^*) = (0,43; 0,57)$.

При исследовании влияния дрейфа параметров на значение целевой функции (10) предполагалось, что дрейф центров настройки происходит линейно $M(t) = M^* + at$, где a – скорость дрейфа – параметр, определяемый эмпирически. Скорость дрейфа измеряется в ваттах, отнесенных к относительным единицам времени.

В ходе вычислительного эксперимента разработана статистическая модель ТП, позволяющая установить изменение объема выпуска изделий в различные номенклатурные группы. При этом исследовалось влияние дрейфа параметров на объемы выпуска процессоров в различные номенклатурные группы при варьировании скоростей и направлений дрейфа за время использования центра настройки $m_1^* = 47$ Вт. Результаты эксперимента представлены таблице 2.

Таблица 2 – Фактический объем выпуска КМОП-процессоров при дрейфе параметров

Скорость дрейфа, Вт/усл.ед.времени	Доли объема выпуска процессоров при положительном дрейфе			Доли объема выпуска процессоров при отрицательном дрейфе		
	I группа	II группа	III группа	I группа	II группа	III группа
$a_1=23.81$	0,39	0,44	0,31	0,39	0,25	0,29
$a_2=28.02$	0,35	0,47	0,32	0,35	0,25	0,30
$a_3=34.91$	0,29	0,51	0,34	0,29	0,25	0,30

На рисунке 2 изображен процесс изменения во времени объема выпуска изделий в различные номенклатурные группы при различных направлениях дрейфа и при минимальной скорости дрейфа $a_1=23,81$ Вт/усл. ед. времени.

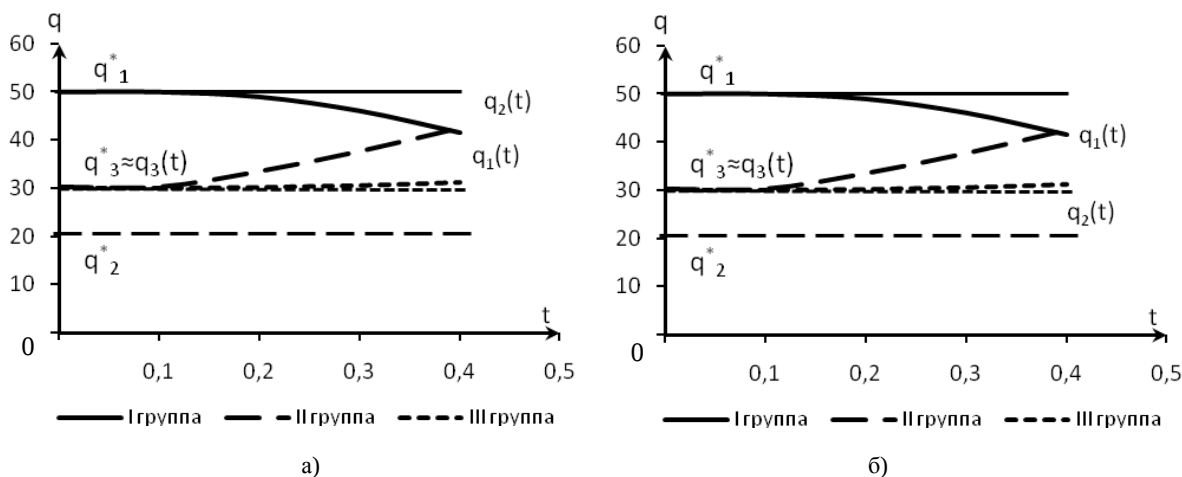


Рисунок 2 – Изменение объемов выпуска изделий в номенклатурные группы при дрейфе параметров ТП:

а) дрейф центра настройки осуществляется вправо $m(t) = m_1^* + at$;

б) дрейф центра настройки осуществляется влево $m(t) = m_1^* - at$

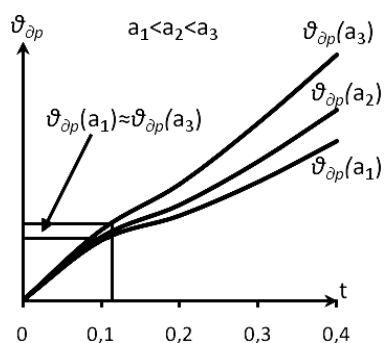


Рисунок 3 – Изменение вида функции потерь относительно скорости дрейфа

В результате исследования установлено, что при определенной скорости дрейфа центра m_1 первая номенклатурная группа (рисунок 2) становится дефицитной независимо от направления дрейфа. В двух других группах изменяется уровень перепроизводства в разной степени для каждой из групп, а также для различных направлений дрейфа центра.

На объем потерь, связанных с невыполнением плана по номенклатуре значительное влияние оказывает скорость дрейфа параметров ТП.

На рисунке 3 изображены графики, соответствующие объему потерь при различных скоростях дрейфа параметров. При этом учитывались потери, связанные как с

невыполнением плана в дефицитных группах, так и перепроизводство изделий в остальных. Тем не менее, при определенной длительности использования центра настройки, потери, связанные с невыполнением номенклатурного плана, практически не зависят от скорости дрейфа параметров ТП, что и показано на рисунке 3. В связи с этим, в процессе принятия решения о контроле и компенсации параметров ТП, необходимо учитывать также длительность использования того или иного центра настройки.

Влияние стоимости операции контроля и компенсации параметров ТП на значение функции потерь (10) очевидно. При одних и тех же параметрах ТП значение функции потерь тем больше, чем больше стоимость контрольных операций.

В качестве модели для определения оптимального интервала между контрольными операциями в ходе вычислительного эксперимента использовалась целевая функция (10), т. е. задача оптимизации решалась при условии, что стоимость потерь как при невыполнении плана в дефицитной группе, так и при перепроизводстве изделий в бездефицитные группы равны: $C_{dp}^- = C_{dp}^+ = C_{dp}$. Решаемая задача является нелинейной и зависит от единственного параметра τ_j – интервала времени между контрольными операциями. В качестве метода решения использовался метод золотого сечения.

Результаты решения задачи при различных стоимостях операций контроля и компенсации параметров ТП представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Оптимальные периоды контроля и компенсации параметров ТП

Относительная стоимость контроля и компенсации параметров ТП	Период контроля при положительном дрейфе, условные единицы времени	Период контроля при отрицательном дрейфе, условные единицы времени
$C_1=0,08$	0,22	0,31
$C_2=0,15$	0,26	0,43 ($\tau_1 = T_1$, на границе области)
$C_3=0,20$	0,28	0,43 ($\tau_1 = T_1$, на границе области)

Семейство функций, изображенных на рисунке 4 представляет характер изменения функции потерь при дрейфе и контроле параметров ТП. Задача решена для процесса, соответствующего дрейфу параметров, представленному на рисунке 2.

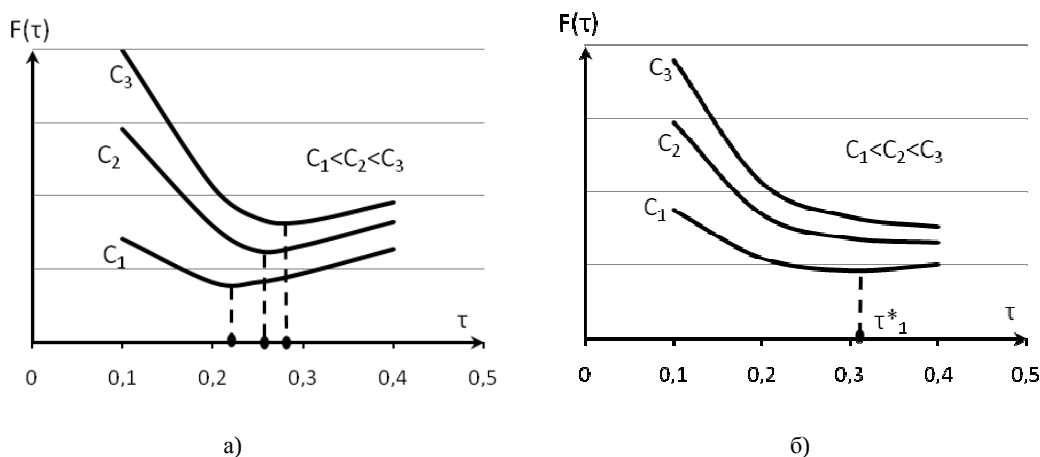


Рисунок 4 – Характер изменения целевой функции при различных направлениях дрейфа параметров ТП: а) положительное направление дрейфа параметров; б) отрицательное направление дрейфа параметров

В результате вычислительного эксперимента установлено, что целевая функция (10), выражающая производственные потери, связанные с дрейфом параметров достигает минимума в области определения $0 < \tau_j \leq T_j$. Минимум целевой функции может быть достигнут в двух случаях. В одном случае минимум функции достигается внутри области (рисунок 4 а, а так же 4 б при значении стоимости контроля и компенсации параметров C_1).

При этом τ_j^* является временным интервалом между операциями контроля и компенсации параметров, то есть, контроль необходимо проводить в моменты времени $\tau_j^*, 2\tau_j^*, 3\tau_j^*, \dots$ до тех пор, пока выполняется условие $\tau_j^* < T_j$. Соответствующая ситуация изображена на рисунке 5, количество контрольных операций определяется в соответствии с выражением (8). В другом случае минимум

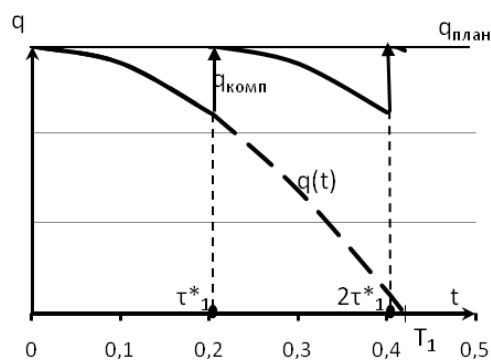


Рисунок 5 – Процесс компенсации объема выпуска изделий в дефицитную группу

использования центра T_1 и величина интервала между двумя соседними операциями контроля и компенсации τ_1^* приведены в условных временных единицах, представляющих собой долю времени длительности ТП.

Задача определения оптимальной частоты операций контроля при дрейфе параметров ТП решена для одного центра настройки. Аналогично эта же задача может быть решена для всех центров настройки, используемых в ходе ТП.

Представленная модель позволяет определять оптимальную частоту контрольных операций в условиях дрейфа параметров ТП. Различные направления и скорость дрейфа оказывают значительное влияние на значение оптимальных параметров контроля. Представленная модель позволяет учитывать условия дрейфа параметров ТП и может быть использована в системах поддержки принятия решений при оперативном управлении ТП микроэлектроники.

В качестве перспективного направления в дальнейших исследованиях целесообразно рассмотреть модель, которая учитывает различные стоимости потерь при невыполнении производственного плана в дефицитных группах, а также при перепроизводстве изделий в иных номенклатурных группах.

Бibliографический список использованной литературы

1. Остром К. Введение в стохастическую теорию управления / К. Остром, Н. Райбман: пер. с англ. — М.: Мир, 1973. — 324 с.
2. Соколов Ю.Н. Компьютерный анализ и проектирование систем управления: учеб. пособие / Ю.Н. Соколов. — Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2010. — Ч. 5: Нелинейные системы. — 344 с.
3. Балакирева И.А. Обеспечение гарантоспособности системы управления многономенклатурным производством КМОП БИС / И.А. Балакирева, А.В. Скاتков // Радиозлектронные и компьютерные системы. — Харьков, 2009. — № 6 (40). — С. 26–31.

Поступила в редакцию 27.09.2011 г.

Скатков О.В., Балакірева І.А. Автоматизоване управління параметрами контролю КМОП-технологій

Виконано постановку завдання визначення частоти контролю під час управління КМОП-технологіями. Запропоновано правила ухвалення рішень за оперативного управління виробництвом, на підставі виконаних обчислювальних експериментів обговорюються отримані результати.

Ключові слова: дрейф параметрів, частота контролю, багатомноменклатурне виробництво, КМОП-технологія, ухвалення рішень.

Skatkov A.V., Balakireva I.A. Automated parameter control problem in the sphere of CMOS-technology

The statement of the problem control frequency in the sphere of CMOS-technology control is conducted. Suggested are the rules for decision making at production control based on performed calculation experiments.

Keywords: drift of parameters, control frequency, multinomenclature production, CMOS-technology, decision-making.