

УДК 621.30

Э. Н. МАНУКЯН, К. П. МАНУКЯН

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Предлагается метод оценки неизвестных параметров технологических процессов по результатам измерений параметров интегральных схем. Метод предполагает наличие коэффициентов чувствительностей и определяет решения, в которых число недопустимо смещенных внутренних параметров минимально.

Библиогр.: 1 назв.

Առաջարկվում է բնութագրալ սխեմաների չափված պարամետրերի արժեքների չիման վրա երանց արտադրության տեխնոլոգիական պրոցեսների ներքին պարամետրերի գնահատման եղանակ: Առաջարկվող եղանակը պարտադրում է զգալիության գործակիցների սովորաբար և ապահովում է լուծումներ, որոնցում նվազագույնի է հասցված տեխնոլոգիայի չափով չեղված ներքին պարամետրերի քանակը:

При производстве интегральных схем (ИС) важное значение имеет задача быстрого выявления причины ухудшения качества продукции. Такими причинами являются нарушение технологии, низкое качество материалов и ухудшение параметров технологического оборудования. Отсутствие полного математического описания сложных технологических процессов производства ИС обычно не позволяют однозначно выявить причину ухудшения качества. На ЭВМ можно возложить лишь функции определения списка возможных причин ухудшения качества. В данной работе предлагается метод выявления этих причин в следующих, характерных для практики ситуациях.

Причиной ухудшения качества является выход за допустимые пределы неконтролируемых параметров ИС, число которых превышает числа контролируемых параметров. Математическое описание технологического процесса представляется лишь матрицей коэффициентов чувствительности. Пусть качество ИС характеризуется вектором контролируемых параметров $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}^T$. Известна модель чувствительности в виде выражения [2]

$$Y_i - Y = A(X_0 - X), \quad (1)$$

где $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T$ — вектор параметров, влияющих на качество продукции; X_0 и Y_0 — значения векторов X и Y при оптимальном режиме функционирования технологического процесса; A — матрица размерности $n \times m$ ($n < m$) с элементами $a_{ij} = \partial y_i / \partial x_j$ при $X = X_0$ и $Y = Y_0$ ($i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$). Заданы также отличающиеся от Y_0 результаты измерения контролируемых параметров y_{ni} ($i = \overline{1, n}$).

Требуется определить список наиболее вероятных комбинаций значений x_j ($j = \overline{1, m}$), с помощью которых можно объяснить наблюдаемые значения y_{ki} ($i = \overline{1, n}$). Очевидно, что решение поставленной задачи сводится к решению системы уравнений $Y_0 = Y_1 A(X_0 - X)$ относительно элементов вектора X .

Введем в рассмотрение векторы B , Z и матрицу C с элементами $b_i = (y_{ki} - y_{ki})/y_{ki}$, $z_j = (x_{0j} - x_{kj})/x_{0j}$, $c_{ij} = a_{ij}x_{0j}/y_{ki}$. Тогда последнее можно представить в виде

$$B = CZ. \quad (2)$$

Обычно $n < m$ и уравнение (2) имеет бесконечное число решений. Тогда в качестве наиболее вероятных следует выбрать хорошо согласующихся с априорной информацией решения. Для хорошо отлаженного производства задача сводится к поиску решений уравнения (2) с максимальным числом z_j , удовлетворяющим условию $|z_j| \leq |(x_{0j} - x_{kj})/x_{0j}|$, где x_{kj} — допустимое значение x_j . Далее z_j , удовлетворяющих этому условию, будем принимать близкими к нулю.

Ниже предлагается неперборный метод решения этой задачи. Преобразуем уравнение (2) к виду: $B = C_1 Z_1 + C_2 Z_2$, где C_1 и C_2 — матрицы, состоящие из первых n и последних $m - n$ столбцов матрицы C соответственно, а Z_1 и Z_2 — из первых n и последних $m - n$ элементов вектора Z . Преобразуем последнее к виду: $F = EZ_1 + HZ_2$, где $F = C_1^{-1}B$, $H = C_1^{-1}C_2$, а E — единичная матрица. Отметим некоторые свойства полученного уравнения.

Свойство 1. Если вектор Z в (2) имеет r ($r \leq n$) ненулевых элементов и все находится в составе вектора Z_1 , то вектор F обязательно будем иметь $(n - r)$ нулевых элементов. Ненулевые элементы вектора F будут совпадать с искомыми ненулевыми элементами вектора Z .

Свойство 2. Пусть из r ($r \leq n$) ненулевых элементов вектора Z ($r - 1$) элементов находятся в составе Z_1 и один — в составе Z_2 . Тогда Z^n можно определить следующим образом: определяется матрица S с элементами $s_{ij} = f_i h_{ij}$ ($i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$), где f_i и h_{ij} — элементы векторов F и H соответственно. Определяется номер столбца i матрицы S , имеющего максимальное число совпадающих элементов, и индексы первого из них. Составляется вектор F^n с элементами $f_i^n = f_i h_{ii} - f_r h_{ri}$ при $i \neq r$ или $f_i^n = f_i h_{ii}$ при $i = r$. Нулевые элементы f_i^n и их индексы представляют собой значения и индексы искоемых ненулевых элементов вектора Z^n . Выбирается столбец из H , соответствующий ненулевому элементу Z^n , находящемуся в составе вектора Z_2 . Выбирается второй столбец из матрицы C , соответствующий одному из нулевых элементов вектора Z_1 , находящегося в составе вектора Z^n . Найденные столбцы переставляются местами, возмущенная матрица E приводится к диагональному виду и

получаются f_i^n новые значения f_i^0 элементов вектора E . Так как в результате этих операций все нулевые элементы вектора Z^0 уже будут собраны в составе Z_0 , то согласно свойству 1 элементы f_i^0 будут совпадать с искомыми ненулевыми элементами вектора Z .

Свойство 3. Если вектор Z^0 имеет r ($r < n$) ненулевых элементов, из которых два или более элементов находятся в составе вектора Z_0 и организуется перестановка столбцов матриц F и H с последующей диагонализацией возмущенной матрицы E и фиксацией значения F^0 получаемого вектора F , содержащего наибольшее число нулевых элементов, то искомое значение Z^0 определяется как $Z^0 = Z/Z_0$, где $Z = F^0$, $Z_0 = 0$. Доказательство этого свойства непосредственно вытекает из свойства 1.

Используя свойство 3, можно разработать конкретные алгоритмы, в которых организуется перестановка столбцов матриц E и H методом целенаправленного поиска вектора F^0 . При этом на каждом шаге поиска из матрицы E выбирается столбец, удовлетворяющий условию $P(z_s = 0) = \max P(z_s = 0)$, ($s = \overline{h+1, m}$). Ввиду невозможности определения $P(z_s = 0)$ ($s = \overline{1, n}$) или $P(z_s = 0)$, $s = \overline{n-1, m}$, в эвристических алгоритмах вместо $P(z_s = 0)$ можно использовать оценки этих величин или другие, легко вычисляемые и монотонно-возрастающие от них величины. В качестве такой величины предлагается использовать $d = \|B - BP\|$, где $P = C_1 (C_1^T C_1)^{-1} C_1^T \times C_1^T$ — оператор проектирования на векторное пространство $L(C_1)$, представляемое столбцами матрицы, C_1, C_1^T — матрица размерности $n \times P$ ($P < m$), все столбцы которой выбраны из столбцов матрицы C в (2). Известно, что проекция вектора B на пространство $L(C_1)$, т. е. PB является решением задачи аппроксимации вектора B с помощью линейной комбинации столбцов матрицы C_1 : $\|B - PB\| < \|B - U\|$ для всех, отличных от PB векторов $U \in L(C_1)$. Величина d , являясь расстоянием B от векторного пространства C_1 , характеризует аппроксимационные свойства столбцов матрицы C . Если матрица C_1^0 будет составлена из столбцов матрицы C , соответствующих ненулевым элементам вектора Z , то получим

$$d = \|B - C_1^0 (C_1^{0T} C_1^0)^{-1} C_1^{0T}\| = 0.$$

Последовательная замена столбцов матрицы C_1^0 столбцами матрицы, соответствующими нулевым элементам вектора Z_0 , приведет к последовательному увеличению величины d . Поэтому, если двум произвольным матрицам C_1 и C_1^0 одинаковой размерности соответствуют расстояния вектора B от пространства $L(C_1)$ и $L(C_1^0)$, соответственно d' и d'' и при этом $d' > d''$, то можно утверждать, что $P(z_s = 0) < P(z_s = 0)$, где z_s и z_s^0 — элементы векторов, соответствующие случайно выбранным столбцам из матриц C_1 и C_1^0 соответственно.

В алгоритмах поиска вектора B вместо $P(z_i = 0)$ можно использовать $d_i = \sum_{j=1}^m d_{ij}$, $j = i$, $i = \overline{1, m}$, где d_{ij} — расстояние вектора от векторного пространства, определяемое i -ым и j -ым столбцами матрицы C . Величина d_i характеризует аппроксимационные свойства i -ого столбца матрицы C и не меняется при линейном преобразовании строк матрицы.

Для проверки предложенной здесь методики на ЭВМ проводилась серия численных экспериментов: генерировались случайные матрицы с размерностями $n = 6$ и $m = 12$. Элементам вектора Z задавались случайные ненулевые $r = 1, 4$ и $(m - r)$ нулевые значения. Рассчитывался вектор B и далее предложенным выше методом отыскивались искомые значения Z_i . Для каждой r эксперимент повторялся 200 раз. Результаты приведены в таблице, указывающей распределение частот удачного завершения поиска в зависимости от количества шагов поиска k .

таблица

$r \backslash k$	1	2	3	4	5	6	7
1	102	98	0	0	0	0	0
2	48	101	32	18	1	0	0
3	19	46	80	31	15	7	2
4	9	22	20	25	27	38	45

Приведенные результаты показывают практическую эффективность предложенного метода диагностирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Розенблассер Е. Н., Югнов Р. Р. Чувствительность систем автоматического управления — Л.: Энергия, 1969. — 208 с.

Ер1111 им. К. Маркса

8. IV 1986