

РАЗДЕЛ II. КОМПОНЕНТЫ И МЕТОДЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Изготовленный импульсный стабилизатор тока, подтвердивший в испытаниях предъявляемые к нему требования по точности стабилизации выходного тока, совместно с «температурной эталонной» лампой накаливания ТРУ 1100-2350 в качестве модели «абсолютно черного тела», были использованы авторами в качестве основных блоков автоматизированного комплекса [2], обеспечивающего калибровку чувствительности ячеек ПЗС-фотоприемника. Откалиброванный ПЗС-фотоприемник, в свою очередь, применялся для регистрации интегрального теплового спектра частиц металлического порошка, «затопленного» в плазменную струю для напыления упрочняющих покрытий на изделия [2]. Метод «обращения» интегрального теплового спектра частиц [2], который позволяет определять распределение частиц по температурам в различных поперечных сечениях технологической струи, в том числе в непосредственной близости от напыляемой поверхности, можно использовать для контроля и управления режимными параметрами процесса напыления покрытий.

Вывод

Таким образом, предлагаемый метод, основанный на адаптации параметра скваж-

ности ШИМ-сигнала управления инвертором к динамике изменения режимов нагрузки за счет цифрового предсказания значения выходного тока стабилизатора по его измеренным значениям, позволяет обеспечить высокую точность стабилизации выходного тока стабилизатора не менее 99,98% в широком диапазоне значений от 1 до 25 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент 2366067 Российская Федерация, МПК Н 02 М 3/335. Способ управления импульсным стабилизатором тока [Текст] / В.Е. Балахонцев, А.И. Заико, В.Н. Зелепукин; приоритет от 14.04.08; опубл. 27.08.09. Бюл.И. № 24.
2. В.И. Иордан. Редукция температурного распределения частиц гетерогенных потоков методом «обращения» их интегрального теплового спектра / В.И. Иордан, А.А. Соловьев. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки.-2010.-№ 2(98).-С. 85-95.

Ассистент А.А. Соловьев – asus_work@mail.ru; к.ф.-м.н., доц. В.И. Иордан – jordan@phys.asu.ru; аспирант А.И. Постоев – alexstud@bk.ru - Алтайский Государственный университет, кафедра вычислительной техники и электроники, (385-2) 38-07-51.

УДК 53.082.56:534.647

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ЧАСТОТЫ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ВИБРАЦИИ, ОСНОВАННЫЙ НА ПРИМЕНЕНИИ УТЕЧКИ СПЕКТРА ДИСКРЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

Е.А. Зрюмов, С.П. Пронин, П.А. Зрюмов

В статье описан оптический метод контроля частоты гармонической вибрации. Применение эффекта утечки спектра при использовании дискретного преобразования Фурье позволяет значительно повысить чувствительность контроля.

Ключевые слова: оптический метод контроля, многоэлементный фотоприемник, дискретное преобразование Фурье, утечка спектра, обработка изображений.

В настоящее время актуальной проблемой является разработка высокочувствительных методов контроля частоты гармонической вибрации двигателей, турбин, строительных конструкций для предотвращения разрушений и аварий технических систем. Перспективным подходом является применение оптических методов с использованием многоэлементных фотоприемников, которые позволяют бесконтактно производить контроль параметров вибрации. Анализ параметров гармонической вибрации сводится к

поиску положения экстремумов в изображении тест-объекта. Для решения этих задач могут быть использованы методы спектральной обработки сигналов, обеспечивающие высокую помехозащищенность и точность измерений. Однако применение дискретного преобразования Фурье дает утечку спектра, которая искажает сигнал, но утечка спектра может быть информативным параметром при контроле частоты гармонической вибрации.

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ЧАСТОТЫ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ВИБРАЦИИ, ОСНОВАННЫЙ НА ПРИМЕНЕНИИ УТЕЧКИ СПЕКТРА ДИСКРЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

Целью работы является разработка и исследование оптического метода контроля частоты гармонической вибрации.

Для этого была создана экспериментальная установка на основе видеокамеры, фиксирующей изображение вибрирующего объекта с изменяемой кадровой частотой в диапазоне от 20 Гц до 2 кГц [1].

Видеокамера устанавливается от тест-объекта на расстояние 1 м и состоит из объектива Индустар-61л/3-МС и линейного ПЗС-фотоприемника VS-Ld-751 с электронным блоком ввода данных в персональный компьютер.

Видеокамеру устанавливают относительно тест-объекта так, чтобы оптическая ось объектива видеокамеры была ортогональна плоскости вибрации тест-объекта. Линейный датчик видеокамеры расположен параллельно направлению линейной вибрации поверхности. Штрихи тест-объекта располагают перпендикулярно направлению линейной вибрации.

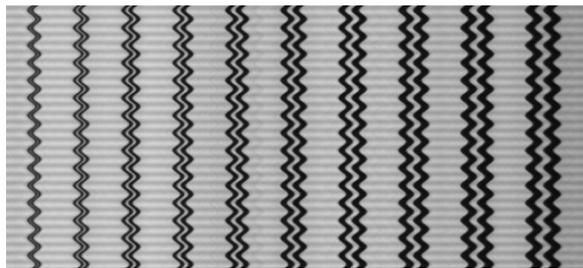


Рисунок 1 – Изображение тест-объекта

С помощью видеокамеры получают набор изображений тест-объекта с заданной кадровой частотой, по которым определяют изменение координаты края штриха тест-объекта от номера изображения (рисунок 1).

Гармонические вибрации, осуществляемые объектом с частотой f_0 и амплитудой A , имеют линейчатый спектр в виде двух δ -функций, сдвинутых на величину частоты вибрации f_0 в положительную и отрицательную стороны относительно начала координат [2].

В идеальном случае однозначно определяются частота и амплитуда гармонической вибрации по непрерывному линейчатому спектру, полученному с помощью преобразования Фурье. На практике аналоговый оптический сигнал преобразуется в дискретный электрический сигнал, который передается на персональный компьютер для дальнейшей обработки. При этом о параметрах гармонической вибрации судят по дискретному линейчатому спектру, который получают с помощью дискретного преобразования Фурье. В

частотной области линейчатый спектр уже не будет представлять собой пики в виде δ -функций [3].

Выполнение операции дискретного преобразования Фурье над гармонической функцией дает следующий спектр гармонической вибрации [4]:

$$F(m) = \frac{N \cdot A}{2} \cdot \frac{\sin[\pi(k - m)]}{\pi(k - m)}, \quad (1)$$

где N – количество точек дискретизации; m – дискретные отсчеты в частотной области; k – количество периодов гармонической функции на N отсчетах. Значение k может быть как целым, так и вещественным и определяется из соотношения:

$$k = \frac{N \cdot t_s}{T_0} = \frac{N \cdot f_0}{f_{TV}}$$

где T_0 – период гармонической вибрации; t_s – период смены кадров линейного ПЗС-фотоприемника; f_{TV} – кадровая частота линейного ПЗС-фотоприемника.

Дискретное преобразование Фурье дает точный результат измерения частоты и амплитуды гармонической вибрации тогда, когда входная последовательность данных содержит энергию точно на частоте $f(m)$, кратной f_{TV} / N , то есть k – целое число. Когда k имеет вещественную часть, происходит утечка, вызванная флуктуациями амплитудного спектра при N -точечном дискретном преобразовании Фурье. Это связано с тем, что амплитудно-частотная характеристика дискретных отсчетов в частотной области представляет собой функцию вида $\sin x / x$. Максимальная утечка спектра наблюдается при следующем условии:

$$F(m) = F(m + 1).$$

Тогда, согласно формуле (1) имеем

$$\frac{NA}{2} \cdot \frac{\sin[\pi(k - m)]}{\pi(k - m)} = \frac{NA}{2} \cdot \frac{\sin[\pi(k - m - 1)]}{\pi(k - m - 1)}.$$

Это равенство будет выполняться при следующем условии:

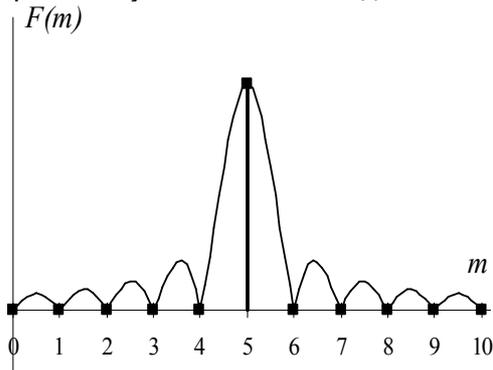
$$k = m + 0,5. \quad (2)$$

Будем рассматривать диапазон $(k - m) = [0; 0,5]$, на одном конце которого утечка отсутствует, а на другом – ее влияние максимально. На всех других диапазонах спектр изменяется аналогично.

На рисунке 2 представлены теоретические спектры гармонической вибрации для различных значений k . На рисунке 2, а представлен спектр гармонической вибрации для

РАЗДЕЛ II. КОМПОНЕНТЫ И МЕТОДЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

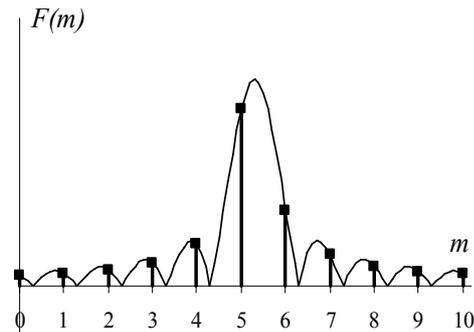
$k = 5,0$, когда частота вибрации точно совпадает с центром дискретного отсчета $m = 5$. В данном случае спектр гармонической вибрации содержит только одно ненулевое значение. На рисунке 2, б представлен спектр гармонической вибрации для $k = 5,2$, когда частота вибрации не совпадает с центром дискретного отсчета $m = 5$. При этом происходит утечка, и спектр гармонической вибрации содержит ненулевые значения для всех m . На



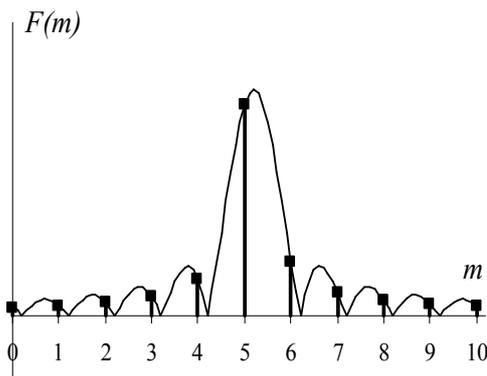
а) $k = 5,0$ о.е.

рисунке 2, г значение $k = 5,5$, при этом влияние утечки спектра максимально, так как частота вибрации находится посередине между двумя дискретными отсчетами $m = 5$ и $m = 6$.

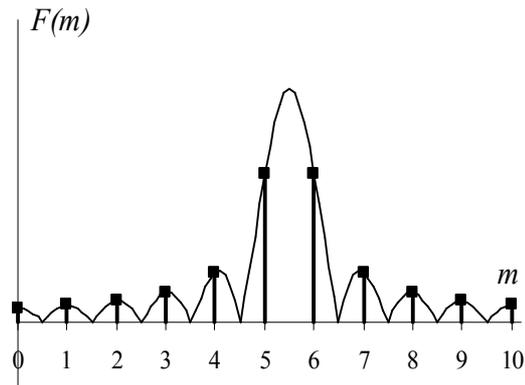
Утечка спектра искажает сигнал, для его восстановления применяют специальные методы цифровой обработки, например, метод весовых функций [5]. Однако утечка спектра может быть информативным параметром при контроле частоты вибрации.



г) $k = 5,3$ о.е.



б) $k = 5,2$ о.е.



е) $k = 5,5$ о.е.

Рисунок 2 – Теоретический дискретный спектр гармонической вибрации

Как видно из формулы (1) утечка спектра гармонической вибрации определяется параметром k . Найдем участки максимальной чувствительности значения спектра к изменению частоты гармонической вибрации:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial k^2} = \frac{\partial^2}{\partial k^2} \left(\frac{N \cdot A}{2} \cdot \frac{\sin[\pi(k-m)]}{\pi(k-m)} \right) = 0.$$

Полученное уравнение трансцендентное, поэтому получить аналитическое решение невозможно, численные методы решения данного уравнения дают следующий результат, ближайший к рассматриваемому диапазону $[0; 0,5]$:

$$k \approx m + 0,66 \quad (3)$$

Это означает, что при этом значении k функция $F(m)$ имеет перегиб. Так как функция $F(m)$ при $k - m = 0$ имеет максимум и на рас-

сматриваемом диапазоне $[0; 0,5]$ вогнута вверх, то при $k \rightarrow m$ модуль тангенса угла наклона функции уменьшается, а при $k \rightarrow m + 0,5$ модуль тангенса угла наклона функции увеличивается. Значит, при $k = m + 0,5$ модуль тангенса угла наклона функции $F(m)$ максимален на рассматриваемом диапазоне, следовательно, при наибольшей утечке спектра чувствительность значения спектра к изменению частоты гармонической вибрации на рассматриваемом дискретном отсчете также максимальна.

Используем явление утечки спектра для построения нового высокочувствительного метода контроля частоты гармонической вибрации.

Для этого необходимо с помощью видеокамеры получить набор изображений тест-объекта с кадровой частотой f_{TV} , определить

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ЧАСТОТЫ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ВИБРАЦИИ, ОСНОВАННЫЙ НА ПРИМЕНЕНИИ УТЕЧКИ СПЕКТРА ДИСКРЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

изменение координаты края штриха тест-объект от номера изображения. Далее необходимо осуществить дискретное преобразование Фурье к полученному сигналу таким образом, чтобы выполнялось следующее условие: были равны значения спектра двух соседних дискретных отсчетов, то есть контролируемое значение частоты находилось посередине между ними. Так как разрешение дискретного преобразования Фурье равно f_{TV}/N , то данное условие можно представить в виде:

$$\frac{1}{2} \left(\frac{f_{TV}}{N} \cdot m + \frac{f_{TV}}{N} \cdot (m+1) \right) = f_0.$$

Следовательно,

$$m = \frac{N \cdot f_0}{f_{TV}} - \frac{1}{2} = N \cdot f_0 \cdot t_s - 0,5. \quad (4)$$

Формула (4) определяет начальные параметры метода контроля частоты гармонической вибрации, при которых значение m должно быть целым. Для того, чтобы получить целое значение m можно изменять кадровую частоту видеокамеры f_{TV} или количество точек дискретизации N . Изменение f_{TV} , приведет к тому, что для начального значения кадровой частоты видеокамеры необходимо сформировать изображение тест-объекта и обработать его. Если в результате обработки было получено дробное значение m , то необходимо изменить кадровую частоту видеокамеры повторить эти операции до тех пор, пока значение m не будет целым.

Нужно отметить, что далеко не все высокоскоростные видеокамеры поддерживают изменение кадровой частоты. В случае изменения количества точек дискретизации N нужно получить лишь одно изображение тест-объекта, которое необходимо обрабатывать с помощью дискретного преобразования Фурье для различных значений N до тех пор, пока значение m не будет целым. Второй вариант является более производительным, так как не требует многочисленных обращений к видеокамере.

Приведенный выше подход не гарантирует для контролируемого значения частоты гармонической вибрации f_0 нахождения значений f_{TV} и N , при которых m будет целым. Связано это с тем, что количество точек дискретизации N может принимать только целое значение, кадровая частота видеокамеры f_{TV} также является дискретной и зависит от шага изменения периода смены кадров видеокамеры. Именно эти параметры будут определять порог чувствительности разработанного

метода контроля. Найдем погрешность нахождения номера дискретного отсчета m в частотной области по формуле теории ошибок [6]:

$$\Delta m = \frac{\partial m}{\partial N} \Delta N + \frac{\partial m}{\partial f_0} \Delta f_0 + \frac{\partial m}{\partial t_s} \Delta t_s \quad (5)$$

Так как контролируемое значение частоты гармонической вибрации не изменяется, то формула (5) примет вид:

$$\Delta m = f_0 \cdot t_s \cdot \Delta N + N \cdot f_0 \cdot \Delta t_s,$$

или

$$\Delta m = f_0 \cdot (t_s \cdot \Delta N + N \cdot \Delta t_s).$$

Зная разрешение дискретного преобразования Фурье, можно найти порог чувствительности метода контроля частоты гармонической вибрации, основанного на использовании утечки спектра:

$$\begin{aligned} \Delta f_0 &= \Delta m \cdot \frac{f_{TV}}{N} = \frac{\Delta m}{N \cdot t_s} = \\ &= \frac{f_0}{N \cdot t_s} \cdot (t_s \cdot \Delta N + N \cdot \Delta t_s). \quad (6) \end{aligned}$$

Для подтверждения (6) были проведены экспериментальные исследования разработанного метода контроля на экспериментальной установке. Зададим гармоническую вибрацию объекта частотой $f_0 = 40$ Гц и амплитудой $A = 1$ мм. Установим кадровую частоту видеокамеры $f_{TV} = 1$ кГц и получим 2000 изображений тест-объекта, по которым определим изменение координаты края штриха тест-объект от номера изображения. Затем полученный сигнал обработаем с помощью дискретного преобразования Фурье.

Если частота гармонической вибрации f_0 кратна разрешению дискретного преобразования Фурье, то утечка спектра отсутствует (рисунок 3, а). Количество дискретных отсчетов N будем изменять таким образом, чтобы утечка спектра была максимальна, при которой значения спектра двух соседних дискретных отсчетов были равны, то есть частота гармонической вибрации f_0 равно удалена от каждого отсчета (рисунок 3, г).

Теоретическая и экспериментальная чувствительности метода контроля частоты вибрации при частоте $f_0 = 40$ Гц и амплитуде $A = 1$ мм приведены на рисунке 4. Анализируя полученные результаты, можно сделать следующий вывод. При количестве точек дискретизации $N = 2000$ значение исследуемого дискретного отсчета соответствует амплитуде гармонической вибрации, при

РАЗДЕЛ II. КОМПОНЕНТЫ И МЕТОДЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

уменьшении количества точек дискретизации значение исследуемого дискретного отсчета уменьшается и уже не равно амплитуде заданной гармонической вибрации.

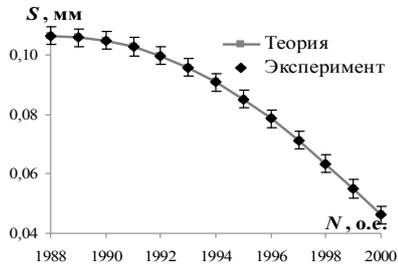
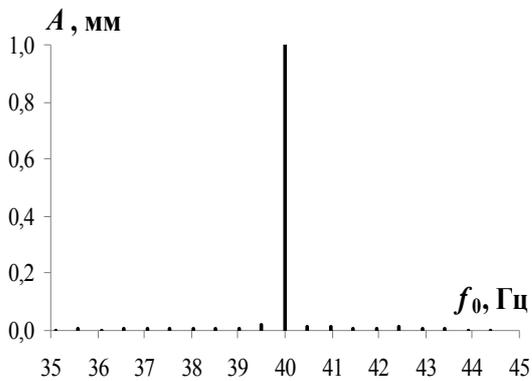
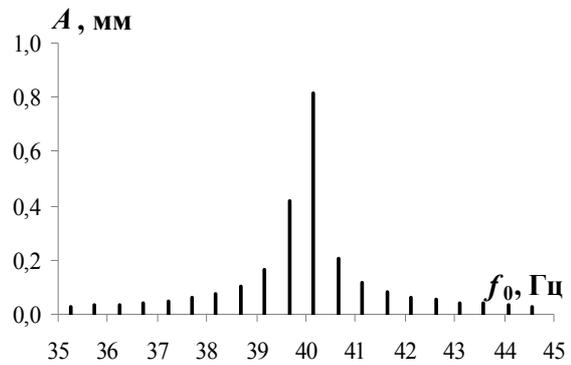


Рисунок 4 – Теоретическая и экспериментальная чувствительность метода контроля частоты вибрации при частоте $f_0 = 40$ Гц и амплитуде $A = 1$ мм

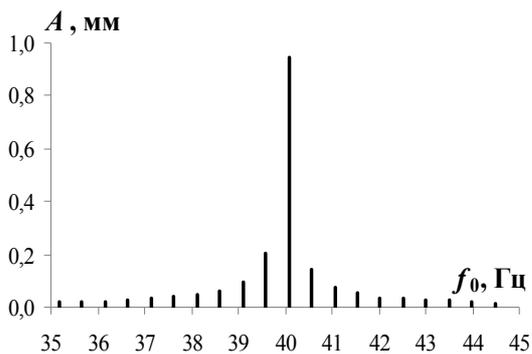
Однако чувствительность при этом увеличивается, она становится максимальной при минимальном значении исследуемого дискретного отсчета. Как было установлено ранее, в этом случае значения соседних дискретных отсчетов равны, малейшее изменение частоты гармонической вибрации от контролируемого значения приведет к нарушению равенства значений соседних дискретных отсчетов, что будет свидетельствовать об отклонении частоты от контролируемого значения. Такой дифференциальный подход обеспечивает высокую чувствительность контроля.



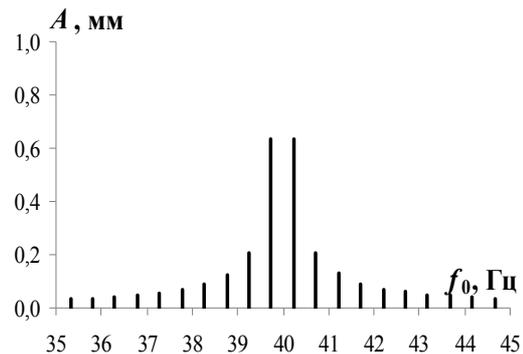
а) $N = 2000$



е) $N = 1992$



б) $N = 1996$



в) $N = 1988$

Рисунок 3 – Экспериментальный дискретный спектр гармонической вибрации при частоте $f_0 = 40$ Гц и амплитуде $A = 1$ мм

Порог чувствительности Δf_0 разработанного метода контроля частоты вибрации для проведенного эксперимента можно рассчитать по формуле (6) при следующих условиях: контролируемая частота вибраций $f_0 = 40$ Гц, кадровая частота видеокамеры $f_{TV} = 1$ кГц, период смены кадров $t_s = 1000$ мкс, погрешность периода смены кадров видеока-

меры VS-Ld-751 $\Delta t_s = 1$ мкс, количество точек дискретизации $N = 1988$, погрешность определения количества точек дискретизации $\Delta N = 1$.

$$\Delta f_0 = \frac{40 \text{ Гц}}{2000 \cdot 1000 \text{ мкс}} \times$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ СИСТЕМ

$$\times (1000 \text{ мкс} \cdot 1 + 1988 \cdot 1 \text{ мкс}) \approx 0,06 \text{ Гц.}$$

Порог чувствительности разработанного метода контроля определяется инструментальной погрешностью видеокамеры, которая в настоящее время может быть на порядки меньше представленного значения в эксперименте, значит, на порядки уменьшится и порог чувствительности Δf_0 .

Вывод

Разработан высокочувствительный метод контроля частоты гармонической вибрации, основанный на применении утечки спектра дискретного преобразования Фурье. Для этого необходимо получить изображение тест-объекта для заданной частоты видеокамеры fTV, обработать его с помощью дискретного преобразования Фурье для различных значений N до тех пор, пока значение m в (4) не будет целым. При этом значения спектра для двух соседних дискретных отсчетов, между которыми находится контролируемое значение частоты гармонической вибрации, будут равны. Отклонение частоты от контролируемого значения приведет к появлению разности между значениями спектра, по кото-

рой производится контроль частоты гармонической вибрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пронин С.П. Программно-аппаратный комплекс для измерения размаха и частоты гармонических вибраций / С. П. Пронин, Е. А. Зрюмов, А. В. Юденков, П. А. Зрюмов // Приборы и техника эксперимента – М . : Изд-во МАИК Наука. – 2010. – №2. – С. 151-152.
2. Гребенников О.Ф. Основы записи и воспроизведения изображения / О. Ф. Гребенников. – М . : Искусство, 1982. – 240 с.
3. Каули Дж. Физика дифракции / Дж. Каули. – М . : Мир, 1979. – 432 с.
4. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов / Р. Лайонс. – М . : Бином-пресс, 2006. – 656 с.
5. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – СПб . : Питер, 2003. – 604 с.
6. Биргер И.А. Техническая диагностика / И.А. Биргер. – М . : Машиностроение, 1978. – 240 с.

Е.А. Зрюмов - к.т.н., доцент, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, e.zrumov@mail.ru. С.П. Пронин - д.т.н., профессор, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, spronin@mail.ru. П.А. Зрюмов, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, pzrumov@yandex.ru.

УДК 621.317.18

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ СИСТЕМ

Д.Е. Кривобоков

Предложено использовать в качестве элементов самоорганизующейся системы автогенераторы с дополнительными внутренними обратными связями между их колебательными параметрами. Представлены результаты применения. Введение дополнительной обратной связи позволяет обеспечить направленность и повысить эффективность взаимодействия автогенераторов.

Ключевые слова: автогенератор, связанные колебания, активный элемент, самоорганизация, обратная связь, взаимодействия

Введение

Всё чаще интеллектуальные методы обработки информации и управления находят применение в измерительной технике, в том числе в аналитических приборах контроля. Во многом этому способствует повышение сложности решаемых задач или неопределённость состояния объекта измерений, для которого сложно, а иногда и невозможно, построить адекватную математическую модель, и поэтому применение детерминированных алгоритмов весьма затруднительно. Но использование классических методов создания интеллектуальных систем, на основе нейро-

сетей, в приборах контроля во многих случаях малоэффективно. Причиной тому является необходимость обеспечить огромный объем экспериментальных данных для обучения и тестирования подобных систем. В условиях производства, в технологических циклах которого применяются подобные приборы контроля, весьма затруднительно проводить «широкомасштабные» эксперименты для «адаптации» средства измерений к изменившимся или новым свойствам объекта измерений. В результате возникает ситуация «недостаточности» информации для применения интеллектуальных возможностей приборов