

# Информационные технологии

УДК 621.517,681.142.36

## ПОЛУЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ О ШЕРОХОВАТОСТИ С ЗАДАННОЙ ВЕРОЯТНОСТЬЮ ЕЁ РАСПОЗНАВАНИЯ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ

*А.Д. Абрамов*<sup>1</sup>

Самарский государственный технический университет,  
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

*Рассматривается оптико-электронный метод определения микрогеометрии поверхностей деталей машин и механизмов. В основу определения шероховатости положен вероятностный подход, основанный на вычислении средней амплитуды переменной составляющей автокорреляционной функции, которая получена по видеоизображениям исследуемой поверхности. Приведены результаты оценки шероховатости цилиндрической поверхности ролика подшипника после операции шлифования.*

**Ключевые слова:** *поверхность, микрогеометрия, оптико-электронный метод, компьютер, технология, шлифование, автокорреляция.*

**Введение.** Широко известно, что во многих случаях микрогеометрия поверхности деталей машин и механизмов определяет их надежность и долговечность. Так, например, шероховатость трущихся поверхностей различных деталей двигателя автомобиля, коробки передач, ступицы колеса и т.д. существенно влияет на его эксплуатационные характеристики. Кроме того, известно также, что очень часто разрушение многих изделий начинается с поверхности. В связи с этим получение достоверной информации о состоянии рабочей поверхности деталей машин и механизмов как при их изготовлении, так и при эксплуатации является важным фактором в процессе повышения качества выпускаемой продукции.

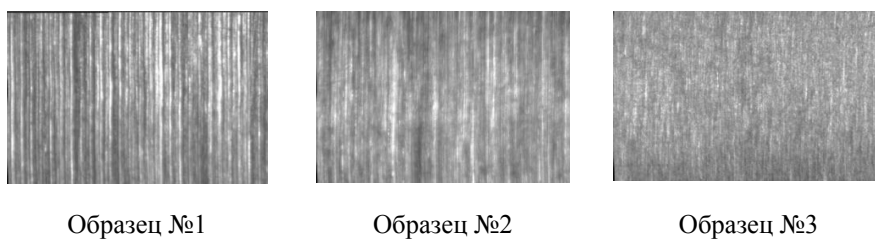
В настоящее время информацию о микро- и макронеровностях получают, как правило, с использованием профильных методов. Среди них наибольшее распространение получил шуповой метод, при котором алмазная игла перемещается по поверхности детали. Информация о колебаниях иглы при перемещении по поверхности является основой для определения таких параметров шероховатости, как среднее арифметическое отклонение профиля поверхности от средней линии ( $Ra$ ), высота неровностей профиля по десяти точкам ( $Rz$ ) и т.п. [1]. Достоинства и недостатки существующих профильных методов изложены в [2]. Там же описывается оптико-электронный комплекс, включающий оптическую систему, видеокамеру, компьютер и программное обеспечение, с помощью которого определялась шероховатость по-

---

<sup>1</sup> Абрамов Алексей Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент.

верхности лопаток газотурбинных двигателей. При этом оценка шероховатости выполнялась на основе измерения среднего периода колебания автокорреляционных функций, полученных по видеоизображениям исследуемых поверхностей.

**Основная часть.** В предлагаемой работе использовался тот же самый оптико-электронный комплекс, но с новой методикой, позволяющей определять шероховатость поверхности с заданной вероятностью её распознавания на основе вычисления средней амплитуды переменной составляющей автокорреляционной функции. Для исследования были изготовлены методом бесцентрового шлифования на станке СВА АКМ 25/1 абразивными кругами на вулканитовой основе три образца из стали ШХ15 с различной шероховатостью поверхности. Для этих же образцов на профилографе модели SJ-201P были записаны профилограммы и определены стандартные параметры шероховатости: образец №1 имел  $Ra=0,56\text{мкм}$ , образец №2 –  $Ra=0,13\text{мкм}$  и образец №3 –  $Ra=0,084\text{мкм}$ . Найденные значения среднего арифметического отклонения профиля представляют собой средние значения, вычисленные по 10-ти измерениям для каждого образца. С помощью оптико-электронного комплекса [2] были получены видеоизображения этих поверхностей формата  $320\times 240$  пикселей, приведенные на рис. 1.



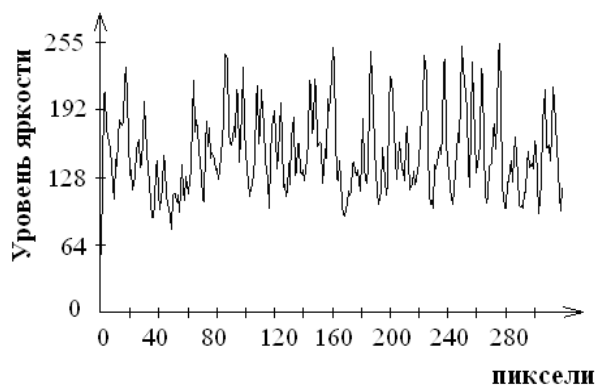
Р и с. 1. Видеоизображения исследуемых поверхностей

Как видно из приведенных рисунков, образцы, выбранные для исследования, существенно отличаются друг от друга по внешнему виду. В изображении их поверхностей наблюдается ориентированная в вертикальном направлении текстура в виде чередования черных и белых полос, при этом ориентация черных и белых компонент в текстуре поверхности для образца №1 с наибольшей шероховатостью выражена более четко, чем для образца №3 с меньшей шероховатостью.

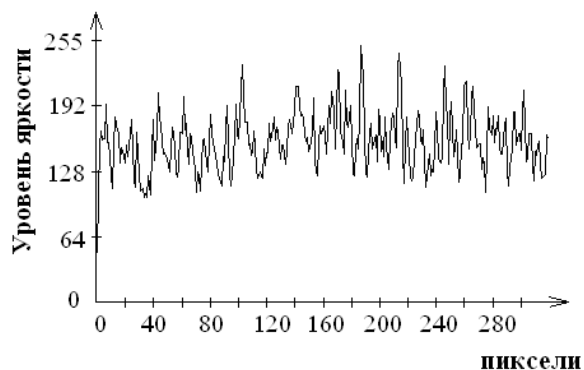
Характерные изменения уровня яркости видеосигнала по строке видеокадра поверхностей исследуемых образцов приведены на рис. 2.

Анализ приведенных видеосигналов показывает влияние шероховатости поверхности как на амплитуду видеосигнала, так и на его спектр. При этом наблюдается уменьшение амплитуды сигнала с уменьшением шероховатости. Можно было бы воспользоваться этой особенностью для идентификации шероховатости, если бы не существенная зависимость уровня видеосигнала не только от шероховатости, но и от множества других факторов, в частности, от общего уровня освещённости, от мощности падающего светового потока и т.п. Кроме того, в радиотехнике установлено, что амплитудная модуляция из всех известных обладает наименьшей устойчивостью к различным помехам [3].

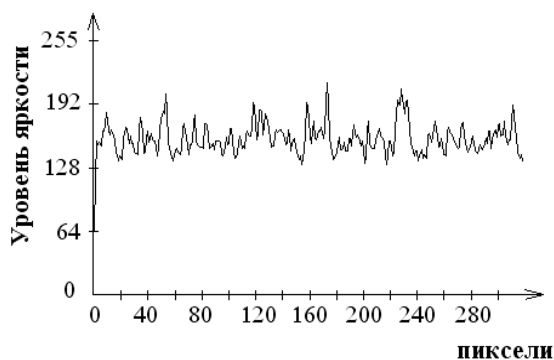
В связи с вышесказанным для определения признаков, по которым можно достаточно надежно идентифицировать исследуемую поверхность, т.е. отнести ее к тому



Образец №1



Образец №2

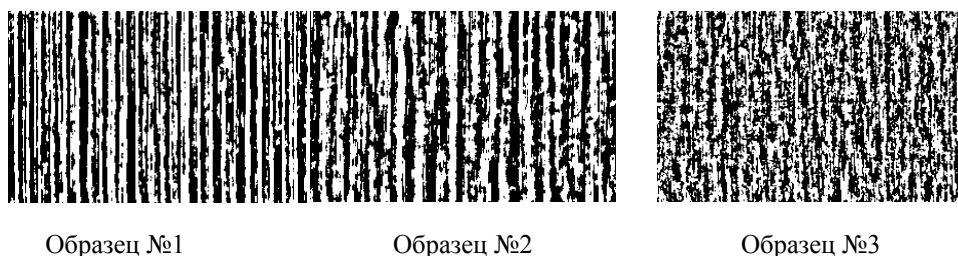


Образец №3

Р и с. 2. Уровень яркости видеосигналов исследуемых поверхностей образцов

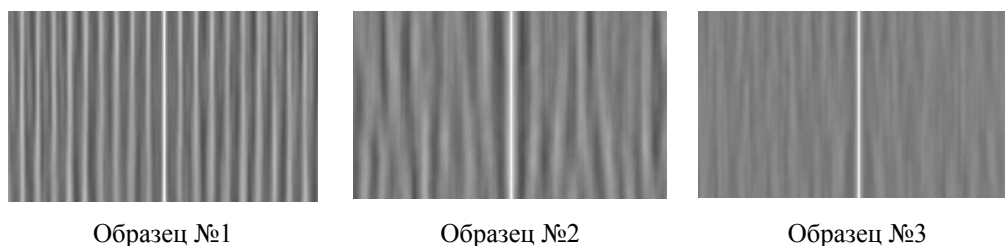
или иному диапазону шероховатости была применена методика, изложенная в работе [2]. Вначале полутоновое черно-белое изображение преобразовывалось в бинарное. Преобразование осуществлялось с использованием окна  $21 \times 21$  пиксель, которым сканировался весь кадр исходного изображения. В этом окне подсчитывался средний уровень яркости  $B_{cp}$ , на основании которого преобразовывался центральный элемент окна  $B_y$  по правилу:  $B_y = 0FFH$ , если  $B_y \geq B_{cp}$ , и  $B_y = 00H$ , ес-

ли  $B_u < B_{cp}$ . В результате такого преобразования получался бинарный кадр формата  $300 \times 200$  пикселей. Анализ полученных бинарных изображений (рис. 3) также показывает влияние шероховатости поверхности на её текстуру, а именно, образец №1 с более грубой шероховатостью имеет более четкую ориентацию черных и белых компонент (полос) в вертикальном направлении, чем образец №2. Для образца №3 указанные полосы сильно размыты, т.е. текстура изображения имеет более случайный характер.



Р и с. 3. Бинарные изображения исследуемых поверхностей

Полученные бинарные изображения использовались в дальнейшем для того, чтобы с большой достоверностью различать поверхности с различной шероховатостью. Для этого в бинарном изображении задавался эталон размером  $N \times N$  пикселя по центру полосы шириной в  $N$  пикселей. Этот эталон перемещался по всей выделенной полосе с шагом в 1 пиксель. При каждом совмещении эталона с текущим фрагментом изображения подсчитывалась сумма пикселей, совпавших в эталоне и текущем фрагменте. Этой сумме придавалось смысловое значение коэффициента корреляции. Для получения нормированного коэффициента корреляции найденная сумма делилась на  $N \times N$  пикселя. Таким образом, при полном совпадении эталона и текущего фрагмента изображения коэффициент корреляции принимал значение, равное 1, которому в памяти компьютера ставился в соответствие байт со значением  $OFFH$ . Нулевому значению коэффициента корреляции при полном несовпадении эталона и текущего фрагмента соответствовал байт со значением  $00H$ . После обработки первой полосы задавалась следующая полоса такой же высоты, но смещённая вниз на один пиксель, и в ней выполнялись те же действия. Таким образом, после обработки всего бинарного кадра для исследуемых образцов получались полутоновые автокорреляционные поверхности, характерный вид которых при размере эталона  $64 \times 64$  пикселя приведен на рис. 4.

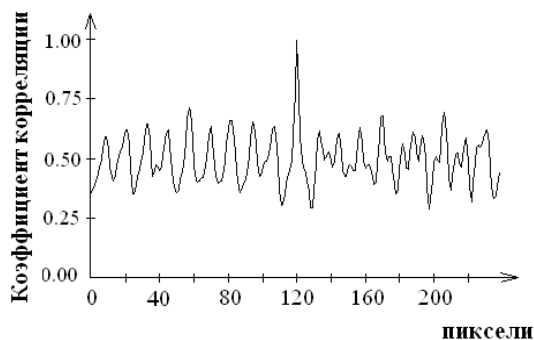


Р и с. 4. Нормированные автокорреляционные поверхности исследуемых образцов

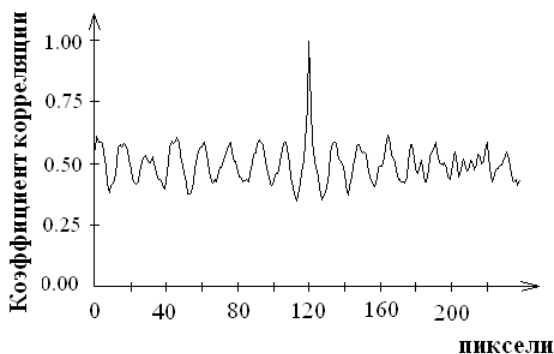
Их анализ показывает, что в этом случае также наблюдается ориентированная в вертикальном направлении текстура, и при этом ориентация также более четко вы-

ражена для поверхности с более грубой шероховатостью (образец №1). Характерные изменения нормированных корреляционных сигналов представлены на рис. 5.

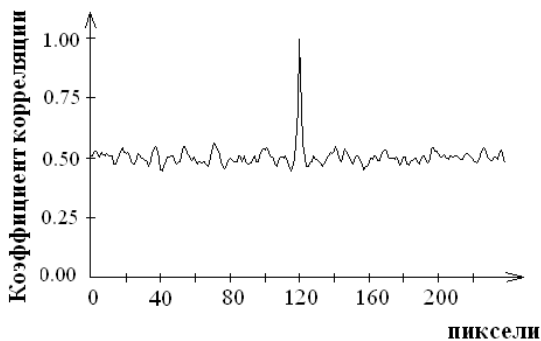
Из приведенных зависимостей также видно, что с увеличением шероховатости увеличивается частота колебаний автокорреляционной функции и увеличивается доля регулярной составляющей. При этом для поверхности с наилучшей шероховатостью (образец №3) наблюдается резкое падение амплитуды корреляционного сигнала от места взятия эталона, что может служить характерным признаком для идентификации (распознавания) изделий с заданными высокими показателями по качеству поверхности.



Образец №1



Образец №2



Образец №3

Р и с. 5. Графики изменения нормированных автокорреляционных сигналов для исследуемых поверхностей

Для введения количественной оценки, на основании которой можно с заданной вероятностью надёжно распознать оптико-электронным методом неизвестную шероховатость исследуемой поверхности, в предлагаемой работе был применен следующий алгоритм. В автокорреляционной поверхности вычислялся средний уровень яркости  $B_{cp}$ . Затем из каждого байта этой поверхности  $B_i$  вычиталось значение  $B_{cp}$  и подсчитывалась сумма всех разностей по абсолютной величине. После этого сумма делилась на площадь автокорреляционной поверхности:

$$U = \frac{\sum_{i=1}^S |B_i - B_{cp}|}{S}, \quad (1)$$

где  $S = N \times N$  – количество пикселей (байт) в анализируемой поверхности.

Полученной таким образом оценке  $U$  можно придать смысловое значение средней амплитуды переменной составляющей двумерной автокорреляционной функции. Отметим, что величина  $U$  также является безразмерной величиной, как и  $B_i$ . Путем применения рассмотренного алгоритма получения оценки шероховатости к исследуемым поверхностям для различных размеров эталонов были получены результаты, представленные в таблице.

Анализ приведенных данных показывает существенное влияние размера эталона как на среднюю амплитуду переменной составляющей автокорреляционной функции (АКФ), так и на её среднеквадратическое отклонение (СКО). При этом наилучшее различие по амплитуде и СКО для образцов с различной шероховатостью наблюдается при использовании эталона размером  $64 \times 64$  пикселя. Для этого случая на рис. 6 приведен график зависимости среднего арифметического отклонения профиля исследуемых поверхностей от средней амплитуды переменной составляющей АКФ.

Как видно из приведенного графика, с увеличением среднего арифметического отклонения профиля от средней линии возрастает и средняя амплитуда переменной составляющей в автокорреляционной функции. Для получения аналитической зависимости  $Ra = f(U)$  в данной работе был использован интерполяционный метод Лагранжа [4], который позволил получить уравнение для  $Ra$  в виде

$$Ra = (48 * U^3 - 1044 * U^2 + 7935 * U - 12069) * 10^{-5}, \text{ мкм} . \quad (2)$$

#### Зависимость средней амплитуды переменной составляющей автокорреляционной функции от размера эталона

$Ra$ , мкм	Средняя амплитуда $U$					
	Эталон $2 \times 2$	Эталон $4 \times 4$	Эталон $8 \times 8$	Эталон $16 \times 16$	Эталон $32 \times 32$	Эталон $64 \times 64$
0,084	$U = 70,8$ $\sigma = 3,6$	$U = 44,8$ $\sigma = 2,1$	$U = 26,9$ $\sigma = 1,4$	$U = 15,9$ $\sigma = 1,2$	$U = 9,6$ $\sigma = 1,1$	$U = 6,1$ $\sigma = 0,8$
0,13	$U = 76,2$ $\sigma = 8,4$	$U = 54,3$ $\sigma = 5,6$	$U = 37,1$ $\sigma = 4,8$	$U = 24,2$ $\sigma = 3,7$	$U = 16,3$ $\sigma = 2,8$	$U = 11,4$ $\sigma = 2,7$
0,56	$U = 79,6$ $\sigma = 9,8$	$U = 56,0$ $\sigma = 6,4$	$U = 38,1$ $\sigma = 5,1$	$U = 26,7$ $\sigma = 4,6$	$U = 21,0$ $\sigma = 3,5$	$U = 17,2$ $\sigma = 3,2$

Для определения доверительных интервалов  $I_\beta$ , в которые попадает случайная величина  $U$ , зададим вероятность распознавания шероховатости поверхности  $P=0,99$ . Проведенными исследованиями было установлено, что образец №1 имел среднеквадратическое отклонение от  $U$ , равное  $\sigma = 3,2$ , образец №2 –  $\sigma = 2,7$  и образец №3 –  $\sigma = 0,8$  (см. табл. 1), а сама случайная величина  $U$  подчиняется нормальному закону распределения. В этом случае число среднеквадратических отклонений  $t_\beta$ , которое нужно отложить вправо и влево от центра рассеивания для того, чтобы вероятность попадания случайной величины  $U$  в полученный интервал была  $P=0,99$ , имеет значение 2,576 [5]. Для каждого образца было обработано по 30 изображений с различных участков исследуемой поверхности, т.е.  $n=30$ . Тогда среднеквадратическое отклонение оценки для  $U$  определяется по формуле [5]

$$\sigma_T = \frac{\sigma_{cp}}{\sqrt{n}} . \quad (3)$$

Следовательно, для образца №1 имеем  $\sigma_T = 0,58$ , для образца №2  $\sigma_T = 0,49$  и для образца №3  $\sigma_T = 0,15$ . Через величины  $t_\beta$  и  $\sigma_T$  доверительный интервал выражается в виде

$$I_\beta = (U - t_\beta * \sigma_T; U + t_\beta * \sigma_T) . \quad (4)$$

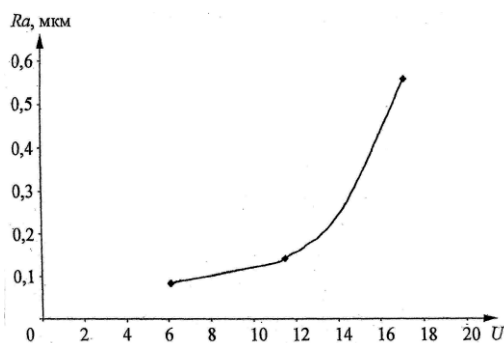
Округляя вычисленные значения  $t_\beta * \sigma_T$  в сторону увеличения, получим:

для образца № 1 –  $I_\beta = 1,5, \dots 15,7 \leq U \leq 18,7$ ;

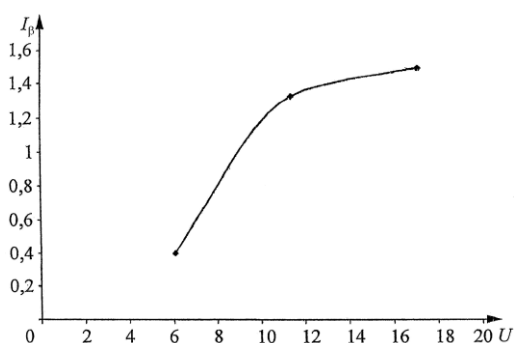
для образца № 2 –  $I_\beta = 1,3, \dots 10,1 \leq U \leq 12,7$ ;

для образца № 3 –  $I_\beta = 0,4, \dots 5,7 \leq U \leq 6,5$ .

Как видно из приведенных данных, доверительные интервалы для  $U$  с увеличением шероховатости возрастают и, что очень важно, не перекрываются. График зависимости  $I_\beta = f(U)$  приведен на рис. 7.



Р и с. 6. Зависимость  $Ra, мкм = f(U)$



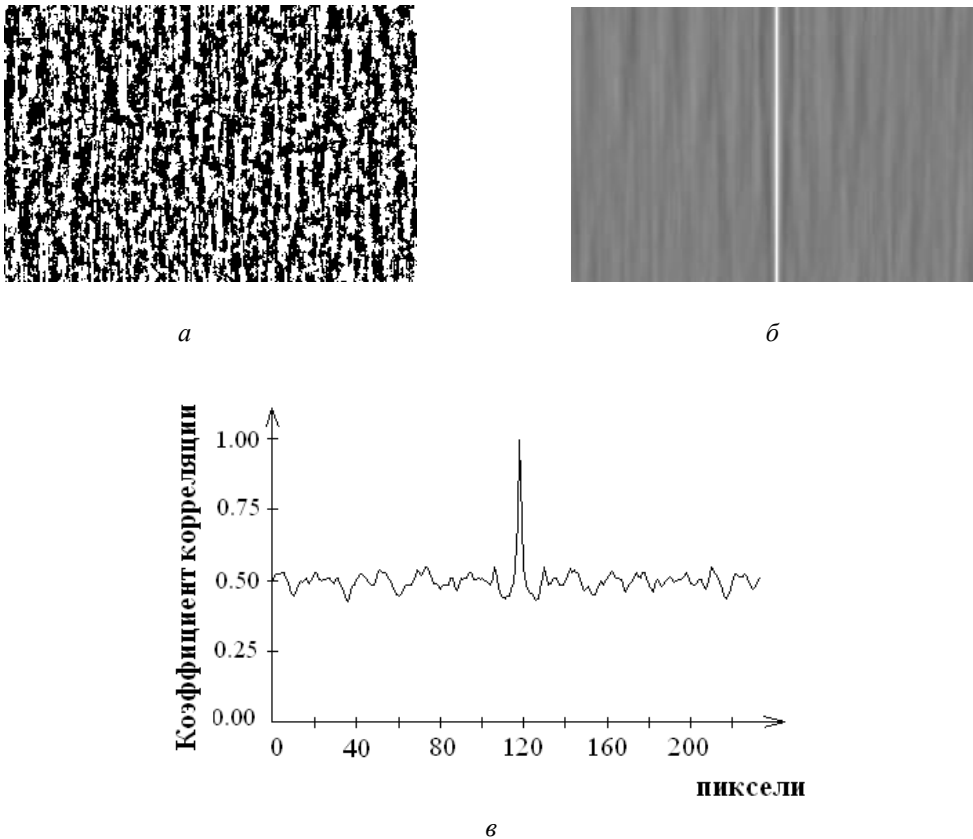
Р и с. 7. Зависимость доверительного интервала от средней амплитуды переменной составляющей автокорреляционной функции

Как видно из графика, зависимость  $I_\beta = f(U)$  имеет нелинейный характер. Используя и в этом случае интерполяционный метод Лагранжа, получили для доверительного интервала аналитическое выражение в виде

$$I_{\beta} = (-1,2 * U^2 + 38,3 * U - 150) * 10^{-2}. \quad (5)$$

**Закключение.** Рассмотренная выше методика была применена для оценки шероховатости цилиндрической поверхности бомбинированного ролика подшипника ступицы колеса автомобиля ВАЗ. Отметим, что исследуемые образцы №1,...,№3 были изготовлены на том же оборудовании и по той же технологии, что и ролик. Для ролика режим шлифования был следующим: скорость абразивного круга 50 м/с, скорость ведущего круга 70 м/с, снимаемый припуск 0,01 мм, скорость продольной подачи 300 м/мин, работа с охлаждением и периодической правкой алмазным карандашом.

Бинарное изображение участка цилиндрической поверхности ролика, а также результаты преобразования этого изображения по рассмотренной выше методике приведены на рис. 8.



Р и с. 8. Результаты обработки исходного изображения участка цилиндрической поверхности ролика:  
*а* – бинарное изображение; *б* – автокорреляционная поверхность; *в* – график изменения коэффициента автокорреляции

В связи с тем, что цилиндрическая поверхность ролика из-за своей кривизны по-разному отображается в фокальной плоскости видеосистемы (рис. 9), для вычисления  $U$  был взят центральный участок поверхности размером  $239 \times 80$  пикселей. Обработка 30 бинарных изображений автокорреляционных поверхностей дали значение  $U = 7,3$ . Подставляя это значение в формулу (5), получаем  $I_{\beta} = 0,66$ . Следова-



тельно,  $U_{\min} = 6,64$  и  $U_{\max} = 7,96$ . Используя найденные значения в формуле (2), получим:  $Ra = 0,089 \text{ мкм}$ ,  $Ra_{\min} = 0,086 \text{ мкм}$  и  $Ra_{\max} = 0,091 \text{ мкм}$ . Найденные значения среднего арифметического отклонения профиля цилиндрической поверхности ролика вполне согласуются со значениями, определёнными с помощью профилографа модели SJ-201P.

Таким образом, рассмотренный оптико-электронный комплекс и методика определения стандартных параметров шероховатости на основе компьютерной обработки видеоизображений анализируемых участков позволяют оценивать качество поверхности различных изделий, не нанося ей механических повреждений и в тех местах, где применение других методов не представляется возможным. Кроме того, этот комплекс позволяет организовать оперативный 100%-ный контроль качества выпускаемых изделий непосредственно в ходе их производства.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дунин-Барковский И.В., Карташова А.Н. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. – М: Машиностроение, 1987. – 232 с.
2. Абрамов А.Д. Оценка микрогеометрии поверхности лопаток ГТД на основе анализа их автокорреляционных функций // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. – 2007. – №2.
3. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости. – М.: Радио и связь, 1998. – 151 с.: ил.
4. Мышкис А.Д. Математика для технических вузов. Специальные курсы. 2-е изд. – СПб.: Лань, 2002. – 632 с.
5. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник для вузов. 5-е изд. – М.: Высшая школа, 1998. – 576 с.

*Статья поступила в редакцию 6 октября 2008 г.*

UDC 621.517,681.142.36

### INFORMATION OF SURFACE ROUGHNESS WITH DETERMINATED PROBABILITY ON BASE OF COMPUTER TECHNOLOGIES OF OPTIC-ELECTRONIC MEANS

**A.D. Abramov**<sup>1</sup>

Samara State Technical University,  
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100.

*In this article is offered optic-electronic method of determination surface microgeometry of machine and mechanism details. In the foundation of this method is laid in probable approach based on the calculation average amplitude of alternating component of autocorrelative function as result of computer technologies of optic-electronic surface means. Here is estimation of roughness cilindric roll surface after grinding.*

**Key words:** *surface, microgeometry, optic-electronic means, computer, technologies, grinding, autocorrelation.*

---

<sup>1</sup> *Aleksey D. Abramov, Candidate of Technical Sciences, Associate professor.*

**МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ  
О МНОГОКООРДИНАТНЫХ СМЕЩЕНИЯХ ТОРЦОВ ЛОПАСТЕЙ  
ВИНТОВЕНТИЛЯТОРА С РАЗНОВРЕМЕННЫМ  
ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ СИГНАЛОВ КЛАСТЕРНЫХ ДАТЧИКОВ.  
ЧАСТЬ 1. ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА И ЕГО ОПИСАНИЕ**

**Л.Б. Беленький, С.Ю. Боровик, Б.К. Райков, Ю.Н. Секисов,  
О.П. Скобелев, В.В. Тулунова<sup>1</sup>**

Институт проблем управления сложными системами РАН,  
443020, Самара, ул. Садовая, 61.

*Рассматривается метод получения измерительной информации о многокоординатных смещениях торцов лопастей винтовентиляторного газотурбинного двигателя, предусматривающий использование кластерного одновиткового вихретокового датчика с разновременным преобразованием индуктивностей его чувствительных элементов в напряжение на выходе измерительной цепи и соответствующий цифровой код.*

**Ключевые слова:** винтовентиляторный авиационный двигатель, смещения торцов лопастей, кластерный одновитковый вихретоковый датчик, разновременный опрос, бесконтактные ключевые элементы, влияние остаточных параметров

Одним из направлений современного авиационного двигателестроения является разработка и создание экономичных и надежных винтовентиляторных газотурбинных силовых установок. В процессе их доводочных испытаний особое место занимает задача получения информации о радиальных зазорах (РЗ) между торцами лопаток и статором компрессора и турбины, между лопастями винтовентилятора и его статорной оболочкой, поскольку от величины РЗ зависит как экономичность, так и надежность газотурбинного двигателя (ГТД) [1, 2].

Изменения РЗ в винтовентиляторах (ВВ) в основном связаны с деформациями, из которых наиболее значимы изгиб лопастей под действием тяговых усилий, их вытяжка в радиальном направлении под действием центробежных сил и изменений температуры. Кроме того, лопасти ВВ совершают принудительные угловые перемещения (в несколько десятков градусов), определяющие режим работы ГТД. Иначе говоря, торцы лопастей в процессе вращения винта совершают многокоординатные смещения в системе отсчета, жестко связанной со статорной оболочкой ВВ, а изменения РЗ вызваны изменениями лишь одной из координат – смещениями торца лопасти в радиальном направлении (например, координаты  $u$  в прямоугольной системе отсчета  $OXYZ$ ).

В работе [3] приводится описание метода получения измерительной информации о РЗ в ВВ, предусматривающего применение одновиткового вихретокового дат-

---

<sup>1</sup> Беленький Лев Борисович, кандидат технических наук, научный сотрудник.

Боровик Сергей Юрьевич, кандидат технических наук, ученый секретарь, с.н.с.

E-mail: borovik@iccs.ru

Райков Борис Константинович, старший научный сотрудник.

Секисов Юрий Николаевич, доктор технических наук, заведующий лабораторией.

Скобелев Олег Петрович, доктор технических наук, главный научный сотрудник.

Тулунова Виктория Владимировна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

чика (ОВТД) с чувствительным элементом (ЧЭ) в виде отрезка проводника. Индуктивность ЧЭ датчика зависит не только от РЗ (изменений координаты  $y$ ), но и от всех прочих координат смещений торцов лопастей. Чтобы учесть их влияние, предусматривается применение штатного потенциометрического датчика угла поворота лопастей ( $\varphi$ ) с токосъемником, а также модели изгибных деформаций лопастей, функционирующей в реальном времени с учетом текущих значений параметров режима и обеспечивающей определение соответствующих изгибу координат смещений ( $x, z$ ). Искомые РЗ вычисляются с помощью семейства градуировочных характеристик (ГХ), представленных в виде полиномиальной функции нескольких переменных (координат смещений торцов лопастей  $x, y, z, \varphi$ ).

Однако в системе, реализующей этот метод, используется существенно упрощенная модель, вполне совместимая с программным обеспечением реального времени, но ограниченная по точности. Вместе с тем более совершенные модели с повышенной точностью вычисления деформаций лопастей отличаются сложностью и значительной длительностью расчетных операций, а потому их применение в указанных системах практически невозможно. Кроме того, точность моделирования при проведении бортовых экспериментов снижается из-за отсутствия прямых измерений тяговых усилий – одного из параметров режима, необходимого для функционирования модели. Понижена и надежность получения информации об угловых перемещениях лопастей из-за наличия контактов в штатном датчике и токосъемнике.

В работе [4] рассматривается метод получения информации о координатах смещений торцов лопастей, в котором нет необходимости применения моделирования, так как вместо ОВТД используются их кластерные разновидности, названные в работах [5, 6] кластерными ОВТД (КОВТД). Число ЧЭ в КОВТД определяется числом искомым координат, а выходные сигналы датчиков после цифрового преобразования фиксируются в момент прохождения основанием лопасти геометрического центра (г.ц.) в торцевой части КОВТД. При этом искомые координаты смещений торцов лопастей и РЗ вычисляются путем решения системы уравнений на основе семейств ГХ и цифровых кодов, соответствующих выходным сигналам измерительной цепи (ИЦ) с датчиком в указанный момент времени. Недостаток метода связан с взаимным электромагнитным влиянием ЧЭ, которое негативно сказывается на семействах ГХ, вызывая снижение чувствительности к искомым координатам или сужение рабочих диапазонов их изменений [7].

Следует отметить, что при реализации первого метода [4], ориентированного на применение ОВТД, предполагается использование ИЦ, в одно из плеч которой включен рабочий ЧЭ, взаимодействующий с торцами лопастей, а во второе – компенсационный ЧЭ, не взаимодействующий с торцами лопастей, но подверженный примерно тем же температурным воздействиям, что и рабочий ЧЭ<sup>1</sup>. Что касается второго метода, то его реализация также связана с дифференциальными ИЦ, в которые включаются кластерные датчики – рабочий и компенсационный. Число таких ИЦ определяется числом ЧЭ в рабочем КОВТД, образующих пары с соответствующим ЧЭ в компенсационном КОВТД, причем последний (согласно [5]) должен быть расположен на статорной оболочке ВВ с таким расчетом, чтобы в момент фиксации кодов его ЧЭ находились в максимальном удалении от ближайших торцов лопастей, т. е. вне зоны чувствительности. Для компенсационного КОВТД требуется дополнительное установочное отверстие, наличие которого нежелательно из-за возможного

---

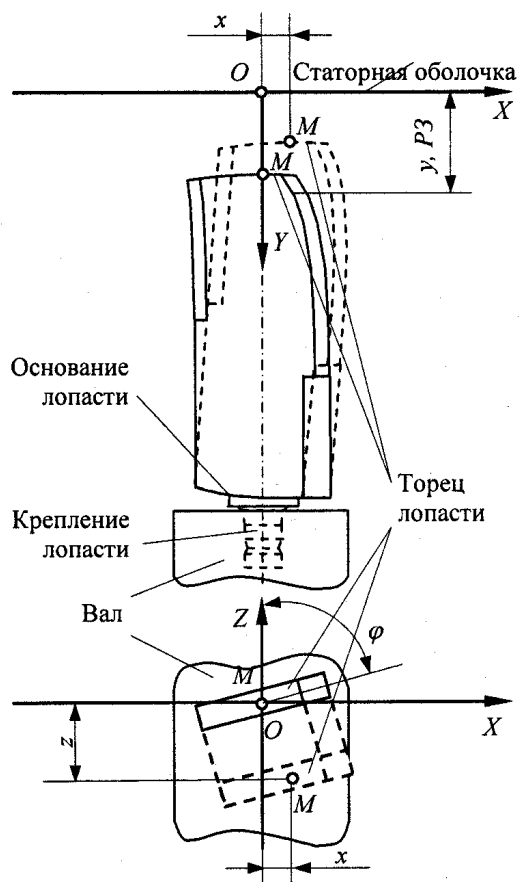
<sup>1</sup> Компенсационный ЧЭ встроен в корпус ОВТД и находится в той его части, что противоположна месту расположения рабочего ЧЭ.

риска потери прочности статорной оболочки, а потому является недостатком второго метода. Поэтому с учетом изложенного представляется необходимой разработка нового метода, свободного от перечисленных недостатков. Результатам разработки этого метода и посвящена первая часть настоящей статьи. Во второй части рассматриваются вопросы реализуемости разработанного метода.

На рис. 1 представлено упрощенное изображение лопасти в момент прохождения ее основанием г.ц. КОВТД в точке  $O$  на внутренней поверхности статорной оболочки. На том же рисунке показана прямоугольная система отсчета  $XYZ$  с началом в точке  $O$ . Предполагается также, что смещение торца лопасти (точки  $M$ ) происходит по трем координатам ( $x, y, z$ ), причем изменениям РЗ соответствуют изменения  $y$ . Как уже отмечалось, в существующих авиационных ВВ предусмотрен также принудительный разворот лопасти, т.е. дополнительное смещение торца лопасти по четвертой угловой координате  $\varphi$  относительно собственной продольной оси лопасти (координатной оси  $Y$ ). При этом следует иметь в виду, что лопасти ВВ вместе с валом вращаются относительно оси  $X$ , но размещение каждой из них на валу задается угловым положением основания лопасти относительно «метки», также размещенной на валу ВВ. Момент прохождения «метки»<sup>1</sup> принимается за начало отсчета по времени при вычислении моментов прохождения основанием каждой лопасти г.ц. КОВТД (точки  $O$  – начала системы отсчета).

Предлагаемый метод, как и один из методов, изложенных во вводной части статьи, ориентирован на применение КОВТД. Если при этом отказаться от использования штатного потенциометрического датчика угла поворота лопастей и контактного токосъемника, обеспечивающих получение информации о координате  $\varphi$  и обладающих известными недостатками, то число ЧЭ в КОВТД должно быть равно четырем для преобразования смещений торцов лопастей по всем четырем координатам  $x, y, z, \varphi$ .

Однако осевые смещения винта (координата  $x$ ) ограничены упорными подшипниками, а потому реальные смещения торцов лопастей в том же направлении в основном связаны с их изгибом и, следовательно, зависят от координат  $z$  и  $\varphi$ , т.е.



Р и с. 1. Схематическое изображение лопасти. Система отсчета

<sup>1</sup> «Метка» и дополнительный датчик, выдающий сигнал в момент ее прохождения, используются также для измерения скорости вращения вала (по периоду или частоте его вращения).

координату  $x$  с определенной степенью приближения можно считать функцией координат  $z$  и  $\varphi$ . Но это означает, что для решения практически любых задач экспериментальных исследований ВВ, в которых предусмотрено получение информации о смещениях торцов лопастей, достаточно трех ЧЭ (описание существующих КОВТД с тремя ЧЭ приведено в работах [6, 7]).

Чтобы добиться уменьшения электромагнитного влияния ЧЭ друг на друга, которое приводит к потере чувствительности или сужению диапазонов измерения искомых координат, в предлагаемом методе предусматриваются разновременные (поочередные, последовательные во времени) преобразования индуктивностей ЧЭ в напряжение на выходе ИЦ и фиксация соответствующих цифровых кодов. Кроме того, вместо компенсационного КОВТД с тем же числом ЧЭ предлагается использование датчика с одним ЧЭ, выполняющего компенсационные функции. Если при этом рабочий КОВТД конструируется по модульному принципу [7], то модуль с компенсационным ЧЭ встраивается в корпус КОВТД аналогично конструкции ОВТД, описание которой приведено в работе [3]. При этом исчезает необходимость в дополнительном установочном отверстии для компенсационного КОВТД.

Предполагается, что изменения смещений торцов лопастей во времени и соответствующих координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\varphi$  имеют медленно меняющийся (квазистатический) характер, и в связи с этим преобразование и фиксация кодов могут осуществляться с разрывом во времени на один или несколько периодов вращения винта. Вместе с тем периода вращения более чем достаточно для выбора пары «рабочий – компенсационный ЧЭ», в которой функции компенсационного выполняет один и тот же ЧЭ, а функции рабочего – поочередно ЧЭ в составе КОВТД.

На рис. 2 в качестве примера представлен КОВТД с тремя ЧЭ и топологией их размещения типа «треугольник» [5]. На этапе 1 преобразования и фиксации кодов (первом периоде вращения винта) в ИЦ функционирует пара ЧЭ<sub>1</sub>-Р и ЧЭ-К, на этапе 2 (втором периоде вращения) – пара ЧЭ<sub>2</sub>-Р и ЧЭ-К, на этапе 3 (третьем периоде вращения) – пара ЧЭ<sub>3</sub>-Р и ЧЭ-К<sup>1</sup>. Сформированные пары ЧЭ сведены в таблицу, представленную на том же рисунке. Далее (на следующих этапах (периодах)) процесс повторяется, причем поочередное формирование указанных пар реализуется с помощью ключевых элементов коммутатора, используемых в ИЦ (см. вторую часть статьи).

Преобразованию и фиксации кодов, как и в известном методе [3], предшествует определение периода вращения и вычисление моментов прохождения оснований каждой лопасти начала отсчета в точке  $O$  (г.ц. КОВТД) на всех трех этапах. В вычисленные моменты времени производятся преобразования сначала индуктивности ЧЭ<sub>1</sub> (этап 1), а затем индуктивностей ЧЭ<sub>2</sub> и ЧЭ<sub>3</sub> (этапы 2 и 3 соответственно) для каждой лопасти ( $1, 2, \dots, n_l$ ).

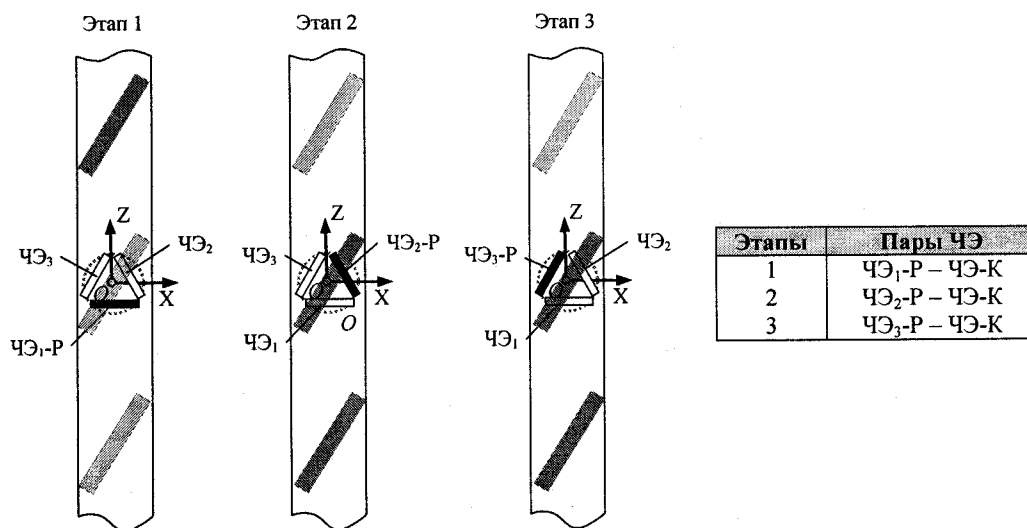
На основе результатов преобразований и фиксаций соответствующих кодов производится вычисление искомых координат – решается система уравнений, каждое из которых представляет собой семейство ГХ, полученное экспериментально или расчетным путем на моделях [8-10] при конкретных значениях кодов ( $C_1, C_2, C_3$ ) в моменты прохождения основаниями лопастей точки  $O$ :

$$\begin{cases} C_1 = f_1(x, y, z, \varphi), \\ C_2 = f_2(x, y, z, \varphi), \\ C_3 = f_3(x, y, z, \varphi), \end{cases} \quad (1)$$

---

<sup>1</sup> Рабочие ЧЭ на каждом этапе изображены затемненными.

где  $x$  – координата, которая определяется известной функцией  $x=F(z, \varphi)$ , например,  $x=-z \cdot \text{ctg}(\varphi)$ <sup>1</sup>.



Р и с. 2. Этапы преобразования и фиксации кодов пары ЧЭ в дифференциальной ИЦ

Решение системы уравнений (1) производится после завершения этапа 3 и повторяется для каждой из  $n_r$  лопастей.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Прокopcец А.О., Ревзин Б.С., Рожков А.В.* Необходимость диагностирования радиальных зазоров в проточной части газотурбинных двигателей // Газотурбинные технологии. – 2004. – №4. – С. 5-7.
2. Некоторые вопросы проектирования авиационных газотурбинных двигателей / Е.А. Гриценко, В.П. Данильченко, В.П. Лукачев, Ю.Л. Ковылев, В.Е. Резник, В.И. Цыбизов. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2002. – 527 с.
3. *С.Ю. Боровик, Б.К. Райков, В.В. Тулунова.* Система измерения радиальных смещений торцов лопастей винтовентилятора // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – №7. – С. 35-40.
4. *Боровик С.Ю., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.* Методы получения информации о многокоординатных смещениях торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды VIII Международной конференции, Самара, Россия, 24-29 июня 2006 г. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2006. – С. 232-239.
5. *Беленький Л.Б., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.* Одновитковые вихретоковые датчики: от кластерных композиций к кластерным конструкциям // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды VI Международной конференции, Самара, Россия, 14-17 июня 2004 г. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2004. – С. 437-443.
6. *Райков Б.К.* Кластерный вихретоковый датчик для измерения смещений торцов лопастей винтовентилятора по трем координатам // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды VII Международной конференции, Самара, Россия, 27 июня – 01 июля 2005 г. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2005. – С.175-180.
7. *Райков Б.К.* Модульные конструкции кластерных одновитковых вихретоковых датчиков. Особенности работы при последовательном и параллельном опросе модулей // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды VIII Международной конференции, Самара, Россия, 24-28 июня 2006 г. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2006. – С. 240-245.

<sup>1</sup> Система уравнений (1) фактически содержит три неизвестные координаты  $u, z, \varphi$  и имеет решение при выполнении некоторых дополнительных условий (см. вторую часть статьи).

8. Методы и средства измерений многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. Ю.Н. Секисова, О.П. Скобелева. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2001. – 188 с.
9. Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Тулупова В.В. Функции преобразования кластерного одновиткового вихретокового датчика // Автометрия. – 2008. – №1. – С. 47-58.
10. Бельский Л.Б., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Тулупова В.В. Функции преобразования кластерного одновиткового вихретокового датчика с тремя чувствительными элементами // Вестник СамГТУ. Сер. «Технические науки». – 2008. – №1. – С. 63-68.

*Статья поступила в редакцию 11 января 2007 г.*

UDC 681.518

**METHODS FOR DATA ACQUISITION ABOUT BLADE TIPS  
MULTI-COORDINATE DISPLACEMENTS IN PROP-FAN ENGINES  
ON BASIS OF DELAYED TRANSFORMATION OF CLUSTERED  
SENSORS SIGNALS. PART 1. MEASUREMENT TECHNIQUES:  
REASONING AND DESCRIPTION**

***L.B. Belenki, S.Yu. Borovik, B.K. Raykov, Yu.N. Sekisov,  
O.P. Skobelev, V.V. Tulupova***<sup>1</sup>

Institute for the Control of Complex Systems, RAS,  
61, Sadovaya str., Samara, 443020/

*The method for data acquisition about blade tips multi-coordinate displacements in prop-fan gas-turbine engines is considered. It basis on using of clustered single-coil eddy-current sensor with delayed transformation of it sensitive elements inductance in output voltage and then in digital code.*

***Keywords:*** prop-fan gas-turbine engine, blade tips displacements, clustered single-coil eddy-current sensor, delayed scanning, contactless switches, the effect of influence of residual parameters.

---

<sup>1</sup> *Lev B. Belenki, Candidate of Technical Sciences, Scientist.  
Sergey Yu. Borovik, Candidate of Technical Sciences, Academic secretary, Senior scientist.  
Boris K. Raykov, Senior scientist.  
Yuriy N. Sekisov, Doctor of Technical Sciences, Head of laboratory.  
Oleg P. Skobelev, Doctor of Technical Sciences, Chief scientist.  
Viktoria V. Tulupova, Candidate of Technical Sciences, Senior scientist.*

## МЕТОД ОЦЕНКИ КОЛИЧЕСТВА ИНФОРМАЦИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

*В.А. Зеленский*<sup>1</sup>

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королева, 443086, Самара, Московское шоссе, 34.

*Рассмотрены вопросы интеллектуализации автоматизированных систем управления. Предложен энтропийный метод оценки количества новой информации, в основе которого лежит применение модели переходов. Метод наглядно демонстрирует, что полученные об объекте новые знания позволяют более достоверно предсказать его поведение, чем обусловлено снижение времени отклика системы управления и рисков принятия ошибочного решения.*

**Ключевые слова:** автоматизированная система управления, объект управления, количество информации, вероятность, энтропия, модель переходов, граф модели.

Одной из важнейших проблем современных автоматизированных систем управления и контроля с интеллектуальной обработкой данных является принятие решений в условиях неопределенности [1, 2]. Неопределенность, в частности, возникает из-за отсутствия или недостаточного объема информации об объекте управления. В процессе эксплуатации или наблюдения за объектом накапливаются определенные сведения, позволяющие прогнозировать дальнейшее развитие событий, принимая на основе обработки полученных данных если не оптимальные, то, во всяком случае, приемлемые решения. Однако задача определения того, в какой степени вновь полученные данные меняют наше представление об объекте управления, во многих случаях с трудом поддается формализации. Другими словами, представляется актуальным определить изменение энтропии объекта при появлении о нем новой информации, что и будет являться количественной оценкой такого изменения [3].

Рассмотрим случай, когда интересующий нас объект может находиться в  $n$  дискретных состояниях без учета времени нахождения в каждом из них. Под состоянием объекта понимается некоторая уникальная характеристика, содержащая, например, информацию о сигналах установленных датчиков и положении исполнительных устройств. Информация обо всех изменениях запоминается и анализируется в том числе с целью предсказания следующего состояния. Это позволяет минимизировать время реакции системы управления, снизить вероятность принятия ошибочного решения. Если в процессе мониторинга собрано достаточное число статистических данных, можно считать, что энтропия объекта [4]

$$I_c = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i, \quad (1)$$

где  $p_i$  – вероятности различных состояний объекта;

$n$  – число возможных состояний.

Данная модель энтропии применяется при отсутствии другой дополнительной

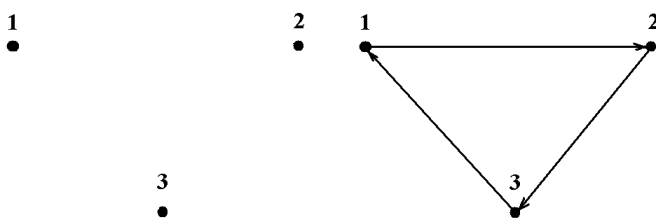
---

<sup>1</sup> Зеленский Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент.  
E-mail: vl.z@mail.ru



информации об объекте. Предположим, что стали известны не только возможные состояния объекта, но возможные варианты переходов объекта из одного состояния в другое. Направления переходов определяются особенностями процессов, происходящих в объекте управления, и имеют в общем случае вероятностный характер [5].

Интересен случай, когда объект последовательно и циклично изменяет свои состояния от 1 до  $n$ . Значение  $n$  для данного случая не принципиально, поэтому с целью простоты изложения примем  $n = 3$ . Устройство обработки данных фиксирует состояния 1, 2, 3, 1, 2, 3 и т.д., частота появления каждого из которых при достаточно длинной последовательности будет стремиться к вероятности  $p_1 = p_2 = p_3 = 0,33(3)$ . Поскольку все состояния объекта получаются равновероятными, энтропия данной модели (назовем ее статистической моделью) согласно формуле (1) максимальна и равна  $I_s = 1,585$ . На рис. 1 статистическая модель представлена пустым графом с вершинами, номера которых соответствуют состояниям объекта.



Р и с. 1. Граф модели объекта до (слева) и после (справа) появления новой информации

При появлении информации о последовательности переходов (смены состояний) модель объекта в виде нуля-графа уже не может нас удовлетворить. В свете новых представлений об объекте логично воспользоваться моделью переходов в виде ориентированного графа с простым циклом (рис. 1). Нетрудно видеть, что знание текущего состояния объекта позволяет однозначно предсказать последующее, что означает нулевую энтропию.

Рассмотренный выше пример является предельным с точки зрения сравнения моделей. В общем случае для определения энтропии при наличии информации о графе переходов будем руководствоваться подходом, изложенным в работе [6]. Энтропия предложенной модели (назовем ее моделью переходов) рассматривается как условная энтропия первого порядка, поскольку вероятность состояния в общем случае зависит от вероятности перехода. Энтропия  $i$ -того состояния определяется как

$$I_i = - \sum_{j=1}^m q_j \log_2 q_j, \quad (2)$$

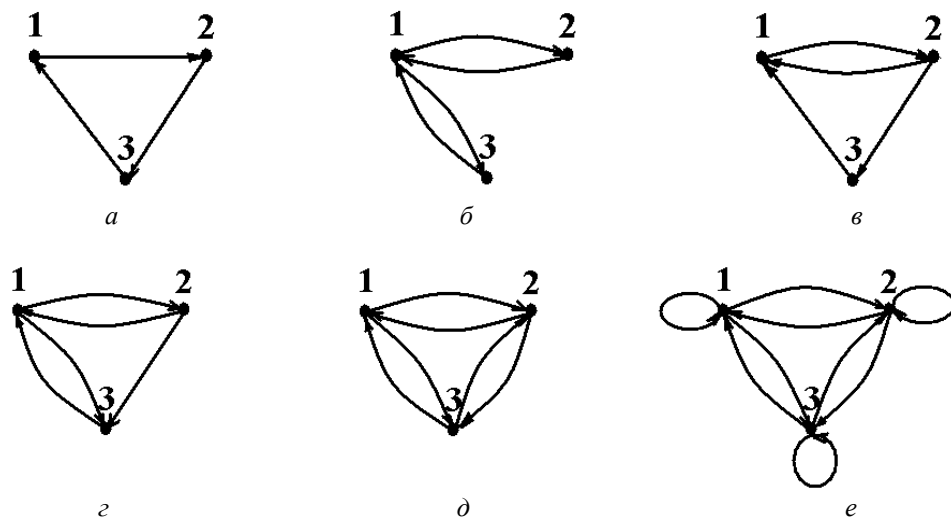
где  $q_j$  – вероятность  $j$ -того перехода;  $m$  – количество возможных переходов.

Для корректного сравнения энтропий объекта до и после появления новой информации примем условие о равной вероятности переходов между состояниями  $q_1 = q_2 = \dots = q_j = \dots = q_m$ . Тогда для энтропии модели переходов справедливо выражение

$$I_n = 1/n \sum_{i=1}^n I_i. \quad (3)$$

Руководствуясь формулами (2), (3), получаем нулевое значение энтропии при появлении новой информации об объекте (рис. 1), что соответствует нашим интуитивным представлениям.

Некоторые другие характерные случаи для числа состояний объекта  $n=3$  представлены на рис. 2.



Р и с. 2. Графы моделей переходов состояний объекта

Необходимо отметить, что равной вероятности переходов не обязательно соответствуют равные вероятности состояний объекта, что характерно для нерегулярных графов б, в, г. Сравнительные данные расчета энтропии для различных моделей объекта приведены в таблице.

#### Сравнительные данные расчета энтропии

Описание графа модели объекта	Вариант графа модели переходов	Значение энтропии	
		Статистическая модель	Модель переходов
Регулярный орграф с простым циклом	а	1,585	0
Орграф с двумя парами сильносвязанных вершин («маятник»)	б	1,500	0,333
Орграф с одной парой сильносвязанных вершин и контуром	в	1,521	0,333
Орграф с двумя парами сильносвязанных вершин и контуром	г	1,571	0,667
Регулярный сильносвязанный орграф	д	1,585	1,000
Регулярный сильносвязанный орграф с петлями («хаос»)	е	1,585	1,585

Буквенные обозначения в таблице соответствуют видам графа на рис. 2.

Анализ полученных данных приводит к следующим выводам.

1. Предложенный метод дает количественную оценку новой информации об объекте в виде разности значений энтропий.

2. Предложенный метод наглядно демонстрирует, что новые знания, полученные об объекте, позволяют более достоверно предсказать его последующие состояния, снижая тем самым время реакции системы управления и риски, связанные с принятием неверного решения.

3. Данный метод с учетом упомянутых ограничений может быть применен для решения задач интеллектуализации автоматизированных систем управления и контроля.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. *Жданов А.А.* Накопление и использование информации при управлении в условиях неопределенности // Информационная технология и численные методы анализа распределенных систем: сборник трудов РАН. – М.: ИФТП РАН, 2002. – С. 112-133.
2. *Павлов А.Н., Соколов Б.В.* Принятие решений в условиях нечеткой информации. – М.: ГУАП, 2006. – 72 с.
3. *Мартин Н., Ингленд Дж.* Математическая теория энтропий. – М.: Мир, 1988. – 251 с.
4. *Шеннон К.* Работы по теории информации и кибернетике: пер.с англ. – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – 830 с.
5. *Бухарев Р.Г.* Основы теории вероятностных автоматов. – М.: Наука, 1985. – 288 с.
6. *Зеленский В.А.* Повышение надежности системы управления с помощью интеллектуальных методов обработки информации // Надежность и качество: труды международного симпозиума. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2008. – С. 42-43.

*Статья поступила в редакцию 7 ноября 2008 Г.*

UDC 681.518.25

## **ESTIMATION METHOD OF INFORMATION CONTENTS ON THE CHANCE MODIFYING OF CONTROL OBJECT MODEL**

***V.A. Zelenskiy***<sup>1</sup>

Samara State Aerospace University name of Sergey.P. Korolev,  
34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086

*Problems of intelligent computer control systems are considered. Entropy estimation method of new information contents based on transit model is offered. Method show demonstrably that new object findings allow qualify object behaviour more authentically, therefore control system response time and mistake risk get less.*

***Key words:*** *computer control system, control object, information contents, probability, entropy, transit model, graph of model.*

---

<sup>1</sup> *Vladimir A. Zelenskiy, Candidate of Technical Sciences, Associate professor*

## МЕТОД ОЦЕНКИ ВЗАИМОСВЯЗНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

*Н.О. Куралесова*<sup>1</sup>

ОАНО ВПО «Волжский университет им. Н.В. Татищева» (институт),  
445020, Россия, Самарская область, г. Тольятти, ул. Ленинградская, 16.

*Проблема оценки эффективности организационных структур наукоемкого производства тесно связана с развитием новых форм его организации. Статья затрагивает вопрос влияния фактора взаимосвязности элементов при формировании организационной структуры гибкого виртуального производства.*

**Ключевые слова:** эффективность структуры, взаимосвязность, метод оценки

Кризис гибкого виртуального производства в машиностроительной отрасли связан с множеством проблем инфраструктуры предприятий. Например, интеграция непрерывного и дискретного пространства в принятии решений по оценке эффективности деятельности предприятий приобретает все большее значение и начинает оказывать серьезное влияние на процесс формирования организационной структуры наукоемкого производства.

В современных методиках оценки эффективности организационных структур слабым звеном остается оценка взаимосвязности элементов организационной системы с точки зрения роста системы рисков [1].

Метод СВ-90 (методология, разработанная Робертом Бенсоном) позволяет получить основные показатели эффективности организационной системы, анализируя множество положительных и отрицательных рисков, качественно и количественно мотивируя принятие решения, но при этом взаимосвязность элементов организационной системы не учитывается.

Сложность определения взаимосвязности как показателя обусловлена его физической природой, поэтому можно предположить, что использование понятия «синергетика связей» позволит оценить влияние взаимосвязности на принятие решений по экономическим рискам.

Современная организационная структура наукоемкого производства является сложной многоуровневой системой. Используем стандартный прием агрегирования подсистем, для описания которых можно применить методы математического моделирования.

Рассмотрим основные элементы такой модели.

Для изучения структурных свойств системы представим их в виде графа без петель  $G = \{A, B\}$ , где  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  совокупность узлов сети (вершин графа),  $B = \{b_{ij}\}$  – множество ребер, соединяющих узлы  $a_i$  и  $a_j$  и соответствующих всем линиям или каналам связи между этими узлами.

В реальной системе, как правило, для связи между заданными узлами используются не все возможные пути, а только пути, выделенные по какому-либо показателю или обладающие некоторыми заданными свойствами. В некоторых случаях прихо-

---

<sup>1</sup> Куралесова Наталья Олеговна, кандидат технических наук, доцент.  
kuralesovano@vuit.ru

дится рассматривать независимые (по ребрам или узлам) пути, т.е. пути, не включающие одни и те же ребра или не проходящие через одни и те же узлы.

Для многофункциональной системы, состоящей из элементов, разнородных по своим свойствам, показателям взаимосвязности, назначению, ресурсам и т.д., можно выделить два основных аспекта взаимосвязности: производственный и структурный. Под производственным аспектом будем понимать проблему взаимосвязности элементов производства, отдельных служб и их элементов, включая каналы. Структурный аспект отражает функционирование системы в целом в зависимости от устойчивости системы или функциональности узлов или ребер (линий, магистралей) системы, т.е. он связан с возможностью существования в системе путей согласованности информации.

Взаимосвязность узла определяется как вероятность пребывания узла в состоянии повышенного риска и может быть вычислена по следующему выражению:

$$P_a = 1 - T_a / 365, \quad (1)$$

где  $T_a$  – число дней в году, когда узел находился в состоянии повышенного риска. Так как вероятность выхода узла из области риска очень мала по сравнению с вероятностью согласованного риска между узлами, то можно согласованность узла принять равной единице.

Структурная взаимосвязность ребра определяется аналогично взаимосвязности узла и должна учитывать субъективное мнение аналитика. Структурная взаимосвязность обычно чувствительна к возможности разрушения связи в результате действия согласованных рисков.

Для расчета рисковости аспекта взаимосвязности и метрики каждого типа потребляемого ресурса используются нормативные требования и характеристики ресурса. Взаимосвязность метрики по ресурсному каналу  $P_{cm}^{ed}$  характеризует производственную составляющую связи ресурса данного типа, приведенную к единице производительности. Взаимосвязность всего канала зависит от его производительности  $L_{ij}$  и может быть вычислена по следующему соотношению (считая канал последовательным соединением участков единичной производительности):

$$P_{ij}^{an} = \left( P_{cm}^{ed} \right)^{L_{ij}}. \quad (2)$$

Производительность ребра  $L_{ij}$  может вычисляться с использованием метрики или задаваться аналитиком. Можно учесть реальную емкость ресурса или принять метрику всех ребер равной единице, что не сделает предпочтительными более короткие ребра при выборе оптимальных соединений. Так как при реальных расчетах значения производительности ресурса могут иметь большой разброс, то приходится нормировать метрику каждого ребра. Предложено использовать для этих целей следующую формулу:

$$L_{ij}^{norm} = 1 + \frac{L_{ij} - L_{\min}}{L_{\max} - L_{\min}}. \quad (3)$$

При этом значения метрики ребер будут лежать в интервале [1,2]. Если все производительности одинаковые, то предлагается в качестве метрики ребра брать единицу.

Структурная взаимосвязность каждого ребра  $P_{cm}^{ij}$  задается аналитиком на основе имеющейся статистики рисков, слияния условий рынка, а также личной интуиции.

Надежность ребра вычисляется по формуле

$$P^{ij} = P_{an}^{ij} * P_{cm}^{ij}. \quad (4)$$

Путь  $\mu_{ab}$  между узлами  $a$  и  $b$  задается как упорядоченная последовательность ребер. Считая ребра независимыми друг от друга и соединенными последовательно, взаимосвязность всего пути можно найти как произведение взаимосвязности ребер:

$$P(\mu_{ab}) = \prod_k P_k * \prod_{\mu_{ab}} P_{ij}, \quad (5)$$

где  $P_k$  – взаимосвязность узлов, входящих в путь ресурсного потока.

Между любыми двумя пунктами системы, как правило, можно построить множество путей. Связью между двумя узлами  $a$  и  $b$  системы будем называть совокупность  $S_{ab}$  независимых по ребрам путей между этими узлами. Порядком связи будем называть число составляющих связь путей. За метрику связи будем принимать метрику минимального риска. Рангом связи будем считать ранг минимального суммарного риска. Множество путей связи упорядочено по возрастанию метрики пути, поэтому первым всегда рассматривается путь с минимальной суммарной метрикой. Емкостью связи будем называть суммарную емкость путей связи. Связь называется полной, если она включает все независимые по ребрам пути. Кроме полной можно рассматривать связи, ограниченные по длине пути, по рангу пути, по порядку связи, по емкости путей.

Взаимосвязность между двумя узлами  $a$  и  $b$  определим как совокупность альтернативных путей:

$$P(S_{ab}) = 1 - \prod_{S_{ab}} (1 - P(\mu_{ab})). \quad (6)$$

Взаимосвязность всей системы можно рассчитать как интегральный показатель.

Если учесть, что не все связи в системе равнозначны, то для подсчета взаимосвязности системы можно использовать матрицу приоритетов связей  $F(S_{ab})$ , где  $(0 < F_{ij}(S_{ab}) \leq 1)$ , которая определяет важность конкретной связи по отношению к другим. Сумма всех элементов матрицы  $F(S_{ab})$  равна единице. Если все связи равнозначны, то элементы матрицы приоритетов равны. В этом случае получим усредненную взаимосвязность. Общая взаимосвязность системы определяется выражением

$$P_N^1 = \sum \{P(S_{ab}) * F(S_{ab})\}. \quad (7)$$

Риск взаимосвязности зависит от его производительности  $L_{ij}$ , емкости ресурса  $V_{ij}$  и метрики стандартного ресурса  $c_t$ :

$$C_{ij} = c_t \cdot V_{ij} \cdot L_{ij}. \quad (8)$$

Можно использовать также другие зависимости цены ребра от его приоритетности и емкости.

При необходимости можно учесть влияние обратных связей по затратам стоимости выполненных работ, затраты на дублирование функций системы.

Так как основной вклад в формирование общей цены при построении системы приносит стоимость изготавливаемого продукта, а переход на непрерывные системы осуществляется в основном за счет новых технологий, то в модели не учитываются затраты на внедрение новых технологий, так как при этом дополнительные ресурсные связи имеют временное смещение.

Предлагаемая модель оценки взаимосвязности элементов организационной структуры производства позволяет проводить общий анализ эффективности производственных систем, определять характеристики влияния на риски взаимосвязности всей сети и отдельных ее элементов.

Предложенная математическая модель требует определения допустимых и оптимальных ресурсных путей между каждой парой узлов при наложенных ограничениях. Задачей оптимизации при этом будем считать вариантность организационной структуры производства.

Критериями оптимальности ресурсных путей могут быть метрики пути, приоритетность пути, комплексный критерий, включающие ряд специфических критериев.

Ограничения, которые необходимо при этом учесть:

- максимально допустимое значение метрики пути;
- максимально допустимый приоритет пути;
- заданные пути между всеми парами узлов.

Для решения задачи поиска оптимального пути используются стандартные методы. Найденные оптимальные пути составляют связь между выбранными узлами системы.

Схему распределения ресурсных путей можно определить, основываясь на структурно-организационных документах. При распределении ресурсных путей необходимо учитывать следующие ограничения:

- уже имеющееся число стандартных ресурсных путей для каждого ребра (заданная емкость):
  - способ распределения ресурсов по путям между парой узлов (если заданы);
  - дополнительное увеличение емкости связи для каждой пары узлов (в процентах);
  - способ определения взаимосвязности системы.

Схема распределения ресурсов определяется метриками путей связи. Имеется несколько способов автоматического определения весов путей связи:

- пропорционально емкости пути;
- в зависимости от ранга путей;
- из таблицы весов путей.

И как частный случай:

- только по кратчайшему пути;
- только по самому длинному пути;
- одинаковый для всех путей.

Среди основных причин мотивации использования сетевых организационных структур можно выделить следующие:

- повышенная потребность в организационной гибкости и необходимость управления в реальном времени;
- повышенный интерес к наукоемким производствам и технологиям;
- снижение рыночной неопределенности и доступ к рынкам сбыта.

Предлагаемый сетевого подход позволяет разделять затраты и комбинировать ресурсы, а также распределять по системе риски неудачного организационного решения.

Развитие метода может позволить решить проблемы оценки эффективности решений агрегации логистики, сервиса и т.п.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стратегическое управление организационно-экономической устойчивостью фирмы: логистикоориентированное проектирование бизнеса / А. Д. Канчавели, А. А. Колобов, И. Н. Омельченко и др. Под ред. А. А. Колобова, И. Н. Омельченко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 600 с.

*Статья поступила в редакцию 20 февраля 2009 г.*

UDC 658.012.-11.56.621

## **METHOD OF EVALUATION OF ELEMENTS INTERCONNECTION IN ORGANIZATION SYSTEM**

***N.O. Kuralesova***<sup>1</sup>

Volzhsy University named by V.N. Tatischev,  
16, Leningradskaya str., Togliatti, Samara region, Russia, 445020.

*The Problem of an estimation of efficiency of organizational structures in the high technology production is closely linked to development of new forms of the organization of production. Article deals with a problem of influence of the factor of elements interconnection units when creating of organizational structure of virtual floppy production.*

***Key words:*** structure efficiency, interdependence, method of assessment.

---

<sup>1</sup> *Natalia O. Kuralesova, Candidate of Technical Sciences, Associate professor.*



## МЕТОДЫ РАЗДЕЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВУХПОЛЮСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ<sup>1</sup>

*В.С. Мелентьев*<sup>2</sup>

Самарский государственный технический университет,  
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Рассматриваются методы раздельного определения параметров двухполюсных электрических цепей по мгновенным значениям переходных процессов, возникающих при подключении напряжения постоянного тока к линейной измерительной цепи. Методы обеспечивают одновременное определение двух параметров, например, как индуктивности, так и активного сопротивления обмотки катушки.*

**Ключевые слова:** *переходный процесс, мгновенные значения, двухполюсная электрическая цепь.*

Емкостные, индуктивные преобразователи и преобразователи сопротивлений относятся к числу наиболее часто используемых в информационно-измерительной технике при построении первичных измерительных преобразователей (датчиков).

В реальных условиях при преобразовании указанных параметров часто приходится иметь дело не с отдельными элементами, а с двухполюсной электрической цепью (ДЭЦ), схема замещения которой содержит не только элемент, параметр которого подлежит преобразованию, но и ряд других элементов, параметры которых в подобных случаях обычно называют паразитными.

Однако на практике часто возникает задача измерения нескольких параметров ДЭЦ. В частности, подобная задача имеет место при определении параметров катушек индуктивности: непосредственно индуктивности и активного сопротивления обмотки.

В настоящее время успешно развивается направление, связанное с определением параметров линейных электрических цепей (ПЭЦ) по отдельным мгновенным значениям переходного процесса, возникающего при подключении к измерительной цепи напряжения постоянного тока. За счет обработки мгновенных значений переходных процессов обеспечивается значительное сокращение времени измерения.

Известные методы определения ПЭЦ по мгновенным значениям одного или нескольких переходных процессов [1, 2] не обеспечивают возможности учета активного сопротивления катушки индуктивности  $R_X$ , которое уменьшает постоянную времени измерительной цепи  $\tau$ , и, следовательно, приводит к погрешности определения  $L_X$ .

В статье предлагаются и исследуются новые методы, позволяющие одновременно определять два параметра ДЭЦ, например, индуктивность и активное сопротивление катушки.

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 08-08-00288-а).

<sup>2</sup> Мелентьев Владимир Сергеевич, доктор технических наук, профессор.

Ток в измерительной цепи, учитывающей активное сопротивление катушки (рис. 1), описывается выражением

$$i(t) = \frac{U_0}{R_0 + R_X} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

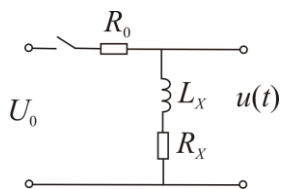
где  $\tau = \frac{L_X}{R_0 + R_X}$ ;  $U_0$  – напряжение постоянного тока;  $R_0$  – образцовое сопротивление.

Напряжение на зажимах катушки

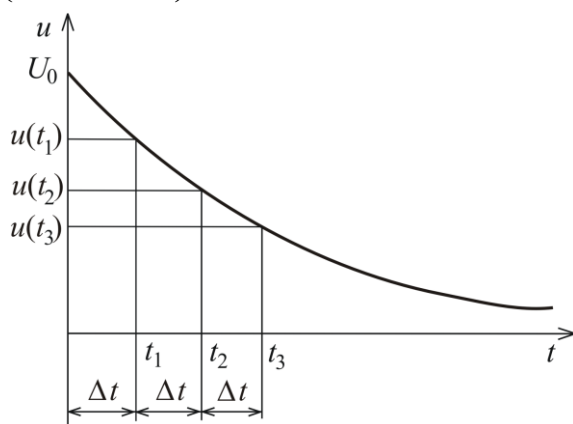
$$u(t) = \frac{U_0}{R_0 + R_X} \left( R_X + R_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \right).$$

Переходный процесс, который возникает в измерительной цепи, содержащей катушку с индуктивностью  $L_X$  и активным сопротивлением  $R_X$  и образцовое сопротивление  $R_0$ , имеет в общем случае пять параметров:  $L_X$ ,  $R_X$ ,  $R_0$ ,  $U_0$  и текущее время  $t$ , поскольку процесс неперiodический, два из его параметров известны. Для упрощения решения задачи определения ПЭЦ будем измерять мгновенные значения переходного процесса через образцовый интервал времени  $\Delta t$  с момента подачи напряжения  $U_0$ . В этом случае составим систему из трех уравнений:

$$\begin{cases} \frac{U_0}{R_0 + R_X} \left( R_X + R_0 e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right) = u(t_1); \\ \frac{U_0}{R_0 + R_X} \left( R_X + R_0 e^{-\frac{2\Delta t}{\tau}} \right) = u(t_2); \\ \frac{U_0}{R_0 + R_X} \left( R_X + R_0 e^{-\frac{3\Delta t}{\tau}} \right) = u(t_3). \end{cases} \quad (1)$$



Р и с. 1. Схема измерительной цепи для первого метода



Р и с. 2. Временные диаграммы, поясняющие первый метод

Предлагаемый метод основан на решении системы уравнений (1). Метод заключается в том, что на измерительную цепь, состоящую из последовательно включен-

ных образцового резистора с известным значением сопротивления  $R_0$  и катушки индуктивности, подают напряжение постоянного тока  $U_0$ ; через образцовый интервал времени  $\Delta t$  с момента подачи напряжения измеряют первое мгновенное значение напряжения на катушке индуктивности  $u(t_1)$ ; через такой же интервал времени с момента первого измерения измеряют второе мгновенное значение напряжения на катушке индуктивности  $u(t_2)$ ; через такой же интервал времени измеряют третье мгновенное значение напряжения на катушке индуктивности  $u(t_3)$  и определяют неизвестные индуктивность и активное сопротивление катушки по измеренным значениям.

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 2.

С учетом мгновенных значений переходного процесса (1) определим следующие отношения:

$$\frac{u(t_3) - u(t_2)}{u(t_2) - u(t_1)} = e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}; \quad (2)$$

$$\frac{u(t_1)}{u(t_2) - u(t_1)} = \frac{R_X + R_0 e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}}{R_0 e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \left( e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} - 1 \right)}. \quad (3)$$

Используя выражения (2) и (3), после преобразований получим

$$R_X = \frac{[u(t_3) - u(t_2)][u(t_1)u(t_3) - u^2(t_2)]R_0}{[u(t_2) - u(t_1)]^3};$$

$$L_X = (R_X + R_0) \left[ \frac{\Delta t}{\ln \left[ \frac{u(t_3) - u(t_2)}{u(t_2) - u(t_1)} \right]} \right].$$

Недостатком метода является непосредственная связь момента подачи напряжения на измерительную цепь с моментом начала измерения, что не всегда выполнимо в реальных условиях.

Следующий метод обеспечивает устранение данного недостатка за счет использования мгновенных значений двух переходных процессов.

Метод заключается в том, что на измерительную цепь, состоящую из последовательно включенных образцового резистора с известным значением сопротивления  $R_0$ , катушки индуктивности и второго образцового резистора  $R_0$ , подают напряжение постоянного тока  $U_0$ ; в произвольный момент времени  $t_1$  одновременно измеряют первые мгновенные значения напряжения на катушке индуктивности  $u_1(t_1)$  и втором образцовом резисторе  $u_2(t_1)$  относительно общей шины; через образцовый интервал времени с момента первого измерения измеряют второе мгновенное значение напряжения на втором образцовом резисторе  $u_2(t_2)$  относительно общей шины; через такой же интервал времени измеряют третье мгновенное значение напряжения на втором образцовом резисторе  $u_2(t_3)$  относительно общей шины и определяют

неизвестные индуктивность и активное сопротивление катушки по измеренным значениям.

Напряжения на катушке индуктивности и образцовом резисторе изменяются в соответствии с выражениями

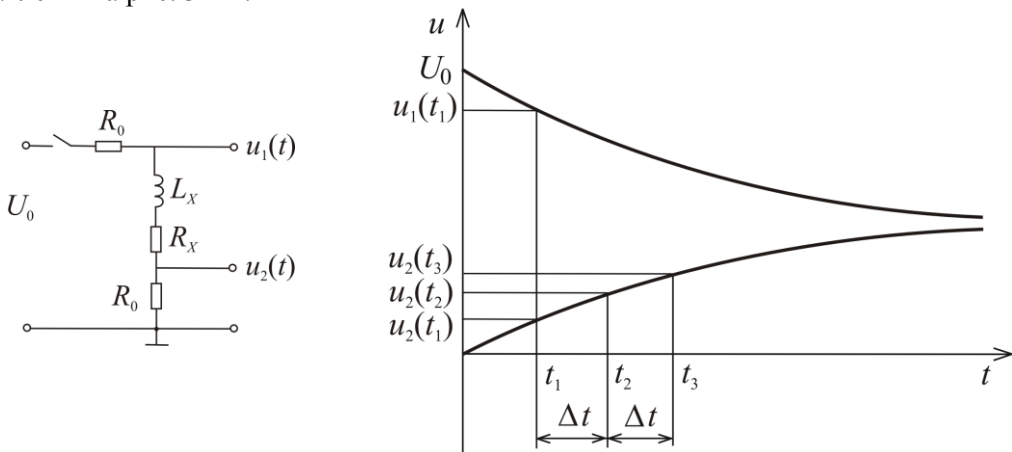
$$u_1(t) = \frac{U_0}{2R_0 + R_X} \left( R_0 + R_X + R_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \right); \quad u_2(t) = \frac{U_0 R_0}{2R_0 + R_X} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right).$$

Учитывая, что момент начала измерения  $t_1$  неизвестен, составим систему четырех уравнений

$$\begin{cases} \frac{U_0}{2R_0 + R_X} \left( R_0 + R_X + R_0 e^{-\frac{t_1}{\tau}} \right) = u_1(t_1); \\ \frac{U_0 R_0}{2R_0 + R_X} \left( 1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}} \right) = u_2(t_1); \\ \frac{U_0 R_0}{2R_0 + R_X} \left( 1 - e^{-\frac{t_1 + \Delta t}{\tau}} \right) = u_2(t_2); \\ \frac{U_0 R_0}{2R_0 + R_X} \left( 1 - e^{-\frac{t_1 + 2\Delta t}{\tau}} \right) = u_2(t_3), \end{cases} \quad (4)$$

где  $\tau = \frac{L_X}{2R_0 + R_X}$ .

Схема измерительной цепи и временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 3 и 4.



Р и с. 3. Схема измерительной цепи для второго метода

Р и с. 4. Временные диаграммы, поясняющие второй метод

С учетом мгновенных значений переходных процессов (4) определим следующие отношения:

$$\frac{u_2(t_3) - u_2(t_2)}{u_2(t_2) - u_2(t_1)} = e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}; \quad (5)$$

$$\frac{u_2(t_1)}{u_2(t_2) - u_2(t_1)} = \frac{1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}}{e^{-\frac{t_1}{\tau}} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}\right)}; \quad (6)$$

$$\frac{u_1(t_1)}{u_2(t_1)} = \frac{R_0 + R_X + R_0 e^{-\frac{t_1}{\tau}}}{R_0 \left(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}\right)}. \quad (7)$$

Из выражений (5) и (6) следует:

$$e^{-\frac{t_1}{\tau}} = \frac{[u_2(t_2) - u_2(t_1)]^2}{[2u_2(t_2) - u_2(t_3) - u_2(t_1)]u_2(t_2)}. \quad (8)$$

Используя выражения (5), (7) и (8), после преобразований получим

$$R_X = R_0 \frac{[u_1(t_1) - u_2(t_1)][2u_2(t_2) - u_2(t_3) - u_2(t_1)] - 2}{[2u_2(t_2) - u_2(t_3) - u_2(t_1)]u_2(t_2)}$$

$$L_X = (R_X + 2R_0) \left\{ -\frac{\Delta t}{\ln \left[ \frac{u_2(t_3) - u_2(t_2)}{u_2(t_2) - u_2(t_1)} \right]} \right\}.$$

Дальнейшее сокращение времени измерения обеспечивает следующий метод, который заключается в том, что на измерительную цепь, состоящую из последовательно включенных образцового резистора с известным значением сопротивления  $R_0$  и катушки индуктивности, подают напряжение постоянного тока  $U_0$ ; через образцовый интервал времени  $\Delta t$  с момента подачи напряжения одновременно измеряют первые мгновенные значения напряжений на элементах измерительной цепи относительно их общего вывода; через такой же интервал времени с момента первого измерения измеряют второе мгновенное значение напряжения на образцовом резисторе и определяют неизвестные индуктивность и активное сопротивление катушки по измеренным значениям.

Напряжения на катушке индуктивности и образцовом резисторе изменяются в соответствии с выражением

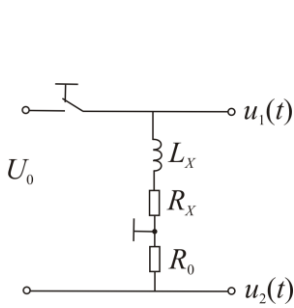
$$u_1(t) = \frac{U_0}{R_0 + R_X} \left( R_X + R_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \right); \quad u_2(t) = -\frac{U_0 R_0}{R_0 + R_X} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right).$$

Составим систему трех уравнений

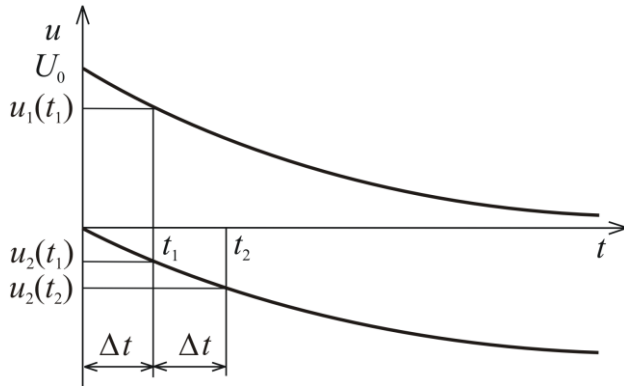
$$\begin{cases} \frac{U_0}{R_0 + R_X} \left( R_X + R_0 e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right) = u_1(t_1); \\ -\frac{U_0 R_0}{R_0 + R_X} \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right) = u_2(t_1); \\ -\frac{U_0 R_0}{R_0 + R_X} \left( 1 - e^{-\frac{2\Delta t}{\tau}} \right) = u_2(t_2), \end{cases} \quad (9)$$

где  $\tau = \frac{L_X}{R_0 + R_X}$ .

Схема измерительной цепи и временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 5 и 6.



Р и с. 5. Схема измерительной цепи для третьего метода



Р и с. 6. Временные диаграммы, поясняющие третий метод

С учетом мгновенных значений переходного процесса (9) определим следующие отношения:

$$\frac{u_2(t_2) - u_2(t_1)}{u_2(t_1)} = e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}; \quad (10)$$

$$\frac{u_1(t_1)}{u_2(t_1)} = \frac{R_X + R_0 e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}}{R_0 \left( e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} - 1 \right)}. \quad (11)$$

Используя выражения (10) и (11), после преобразований получим

$$R_X = \frac{R_0}{u_2(t_1)} \left\{ \frac{u_1(t_1)}{u_2(t_1)} [u_2(t_2) - 2u_2(t_1)] - u_2(t_2) + u_2(t_1) \right\};$$

$$L_X = (R_X + R_0) \left[ - \frac{\Delta t}{\ln \left[ \frac{u_2(t_2) - u_2(t_1)}{u_2(t_1)} \right]} \right].$$

В предлагаемых методах время определения неизвестных параметров катушки индуктивности не зависит от постоянной времени измерительной цепи, а определяется в основном длительностью временного интервала  $\Delta t$ . Интервал  $\Delta t$  ограничен только временем измерения мгновенных значений переходного процесса.

Обработка мгновенных значений переходных процессов расширяет функциональные возможности методов и средств измерения ПЭЦ, поскольку позволяет определять не только основные параметры, но и дополнительные (паразитные). Рассмотренный подход может быть использован для определения не только параметров катушек индуктивности, но и других ДЭЦ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мелентьев В.С. Методы и средства измерения параметров электрических цепей на постоянном токе. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2004. – 120 с.
2. Батищев В.И., Мелентьев В.С. Аппроксимационные методы и системы промышленных измерений, контроля, испытаний, диагностики. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 393 с.

*Статья поступила в редакцию 25 августа 2008 г.*

UDC 621.317.33

### METHODS OF THE SEPARATE DETERMINATION OF THE DOUBLE-POLE ELECTRIC CIRCUIT'S PARAMETERS

**V.S. Melentyev**<sup>1</sup>

Samara State Technical University,  
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100.

*The methods of the separate determination of the double-pole electric circuit's parameters on instant importances of the connecting processes, appearing at connection of the direct current's voltage to linear measuring circuit, are considered. The methods provide the simultaneous determination of two parameters, for instance, both inductance, and active resistance of the spool's winding.*

**Key words:** *connecting process, instant importances, double-pole electric circuit.*

---

<sup>1</sup> Vladimir S. Melentiev, Doctor of Technical Sciences, Professor.