

УДК 621.713.13:621.313

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ СИЛ РЕЗАНИЯ В МЕХАНООБРАБОТКЕ

Смирнова М.А.

(ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Введение

Совершенствование методов управления является существенным резервом повышения эффективности функционирования электромеханических систем. В связи с этим весьма актуальны задачи создания современных методик исследования электромеханических систем и анализа их параметров.

В настоящее время достаточно широкое распространение получили методы математического моделирования переходных и установившихся процессов функционирования электромеханических систем, позволяющие расчетным путем определять необходимые параметры их эксплуатации.

Знание состава высших гармонических в токах и напряжениях электроэнергетических систем позволяет оценить степень несимметрии, несинусоидальности, определить соответствие качества напряжения требованиям ГОСТ 13109-67, а также оценить эффективность применения фильтровых защитных устройств.

В работах [1, 2] предлагается способ определения гармонического состава фазных токов и напряжений, а также симметричных составляющих как для каждой из гармоник, так и в целом для фазных величин в электрических системах с резкопеременными случайными нагрузками в установившихся и в переходных режимах. Интерес представляет расширения области применения указанной методики для различных электромеханических систем.

В системах механообработки машиностроительных предприятий для обеспечения эффективной работы металлообрабатывающего оборудования с переменными случайными нагрузками в установившихся и переходных режимах необходимо совершенствование методов управления процессом резания. Использование в современных системах механообработки измерительных комплексов с аналогово-цифровыми преобразователями, имеющими значительные преимущества по способу хранения и обработки информации, скорости передачи данных, существенно расширяет возможности исследований параметров процесса резания [3]. Для анализа закономерностей формирования силовых нагрузок представляет интерес применение известной методики [4] для определения гармонического состава токов и напряжений, полученных с помощью натуральных осциллограмм при измерении сил резания.

Целью настоящей работы является оценка гармонического состава и коэффициента несинусоидальности для токов (напряжений) при измерении сил резания в механообработке.

Основное содержание и результаты работы

В данной работе выполняется разложение напряжений, возникающих при измерении сил резания в механообработке, на гармонические составляющие, а также определение коэффициентов несинусоидальности, позволяющих оценить степень влияния отдельных гармонических на результирующий сигнал.

Известно, что несинусоидальная периодическая функция может быть представлена в виде составляющих ряда Фурье [4]. Анализ осциллограмм сил, возникающих в процессе резания металлов, позволяет выявить периодический характер изменения этих сил и применить методику [4].

На выбранном интервале времени исходная величина (ток, напряжение) представляется в виде ряда Фурье:

$$i(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{mk} \cos(k\omega t - \varphi_k) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \sin k\omega t + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos k\omega t, \quad (1)$$

где A_0 – постоянная составляющая, определяемая как среднее значение n дискретно выделенных величин на интервале:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i(t) dt \approx \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n i_s(t); \quad (2)$$

I_{mk}, φ_k – амплитудное значение и начальная фаза тока (напряжения) k -й гармоники;

$$B_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i(t) \sin(k\omega t) dt \approx \frac{2}{n} i\left(s \frac{T}{n}\right) \sin\left(ks \frac{T}{n}\right); \quad (3)$$

$$C_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i(t) \cos(k\omega t) dt \approx \frac{2}{n} i\left(s \frac{T}{n}\right) \cos\left(ks \frac{T}{n}\right).$$

Здесь период T делится на n равных интервалов и в каждой точке деления вычисляются ординаты $i(sT/n)$, полагая $s = 1, 2, 3 \dots n$. Зная B_k и C_k , можем найти амплитуду и начальную фазу k -й гармоники:

$$I_{mk} = \sqrt{B_k^2 + C_k^2}; \quad \varphi_k = \arctg(B_k / C_k). \quad (4)$$

Теперь представляется возможным сформировать выражения для мгновенных комплексных значений периодических составляющих токов (напряжений) для каждой гармоники:

$$\underline{imgn}_{k_s} = I_{mk} (\cos(k\omega t_s - \varphi_{a_k}) + j \sin(k\omega t_s - \varphi_{a_k})); \quad (5)$$

Теперь можно найти значение коэффициента несинусоидальности $K_{НС}$ [4]:

$$K_{НС} = 100 I_k / I_{НОМ}; \quad (7)$$

где $I_{НОМ}$ – действующее значение тока (напряжения): $I_{НОМ} = \sqrt{\sum_{s=1}^n i_s(t)^2 / n}$;

I_k – действующее значение тока (напряжения) k -й гармоники: $I_k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{s=1}^n \left(\text{Re}(\underline{imgn}_{k_s}) \right)^2}$.

Адекватность предложенного метода оценивается по степени совпадения исходной кривой сигнала с результирующей кривой, полученной по сумме гармонических составляющих.

По предложенному алгоритму разработана программа, позволяющая разложить исходную кривую тока (напряжения) в ряд Фурье с различным количеством гармоник и рассчитать коэффициент несинусоидальности.

Ниже приводится пример расчета мгновенных значений токов (напряжений) для каждой гармоники, постоянной составляющей, а также коэффициентов несинусоидальности по заданным исходным кривым тока (напряжения) при измерении силы резания P_z . В качестве исходных данных используется осциллограмма, представленная на рис.1, на которой зарегистрированы мгновенные значения напряжений, имеющие несинусоидальный характер.

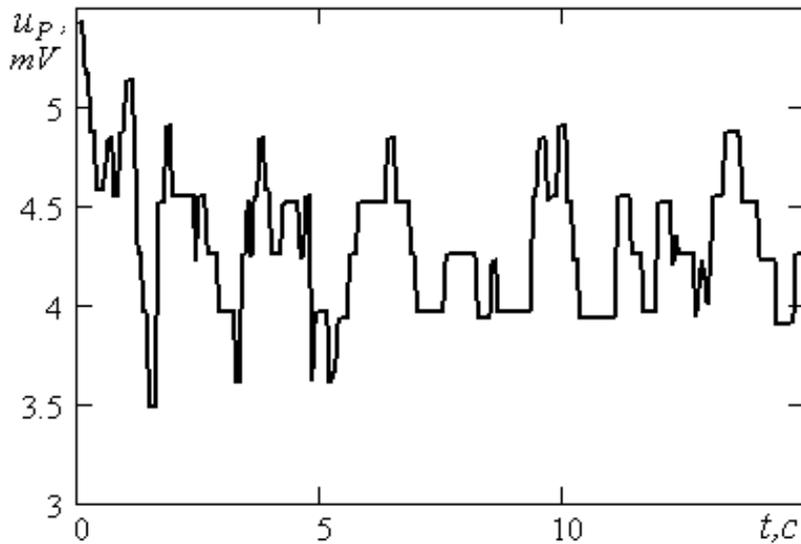


Рис.1. Исходная осциллограмма силы резания P_z

35мм; режимы обработки: глубина резания $t = 1$ мм; подача $s = 0,1$ мм/об; скорость резания $v = 70$ м/мин, частота вращения $n = 100$ с⁻¹.

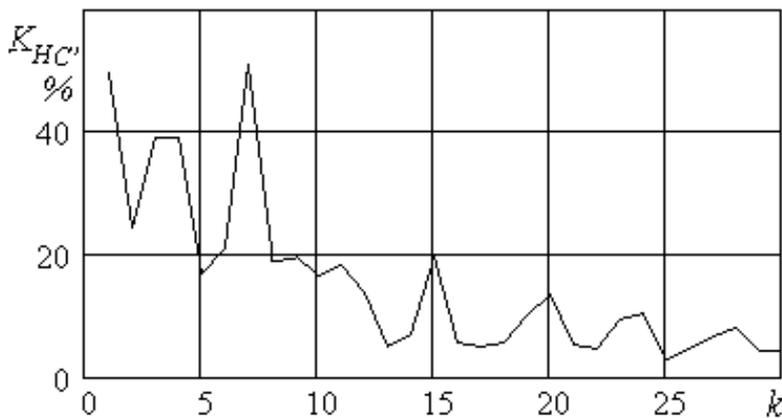


Рис. 2. Коэффициент несинусоидальности для различных гармоник в период t от 0 до 5с

степень влияния каждой из них на результирующий сигнал (рис.2).

Далее по выражению (2) выделяется постоянная составляющая для силы резания $A_0 = 4,45$ mV. Полученная постоянная составляющая выделяется из исходных напряже-

Осциллограмма получена для следующих условий обработки [3]: станок – токарный с ЧПУ 16К20Ф3; аналогово-цифровой преобразователь модели ADC-16; тензометрический усилитель ТА-5; тензометрические датчики типа НМТ-450-5-100А: базовая длина 5мм, диапазон измеряемых деформаций (+-) 2000мкм/м ; обрабатываемый материал – сталь 45; инструментальный материал Т15К6; диаметр обработки $d =$

Предварительный анализ позволяет выделить участок осциллограмм в начальный период времени (≈ 5 с), на котором амплитуда выше, чем на последующих. Поэтому сначала рассматривается период t от 0 до 5с, разбивающийся на 500 точек. На нем по выражению (7) рассчитывается коэффициент несинусоидальности $K_{НС}$ для 30 гармоник, позволяющий оценить

ний, в результате чего при дальнейшем разложении на гармонические составляющие напряжения изменяются от 0 и оцениваются в относительных координатах. На рис. 3 приведены результаты разложения периодической составляющей напряжения при измерении силы резания P_Z на гармонические составляющие $u_1, u_2, u_3, u_4, u_6, u_7$, имеющие наибольшее влияние на результирующий сигнал в соответствии с коэффициентом несинусоидальности ($K_{НС} > 20\%$). На этом же рис. 3 представлены графики результирующего напряжения u_{Σ} , полученного путем суммирования мгновенных значений напряжений u_i , в сравнении с исходными значениями напряжений $u_{эксп}$, свидетельствующие о достаточно хорошем их совпадении (погрешность не превышает 10%).

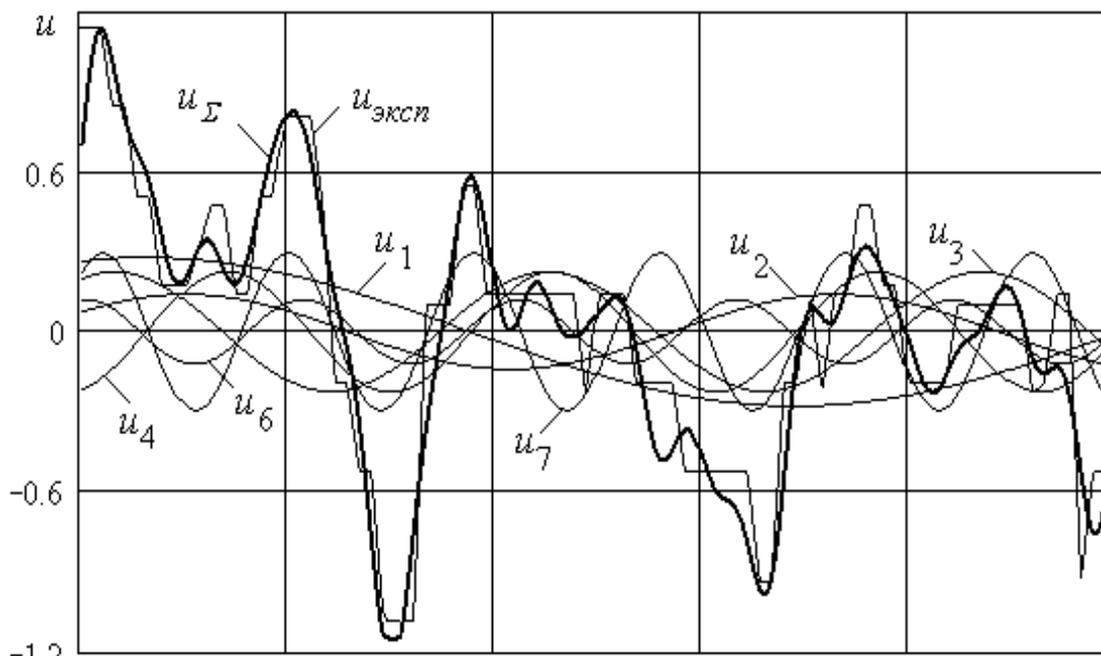


Рис. 3. Гармонический состав напряжений при измерении силы резания P_Z по результатам разложения в период t от 0 до 5с

Затем рассматривается установившийся период t_1 от 5 до 15с, который разбивается на 1000 точек, на нем выделяется постоянная составляющая $A_{O1} = 4,28 \text{ mV}$.

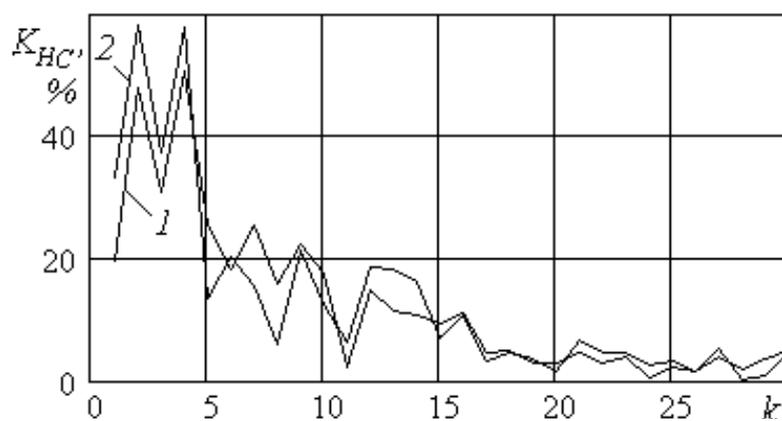


Рис. 4. Коэффициент несинусоидальности для различных гармоник в период t_1 от 5 до 15с – 1, в период t_2 от 5 до 10с – 2

Результаты расчета коэффициента несинусоидальности $K_{НС}$ для 30 гармоник представлены кривой 1 на рис.4. Здесь же представлены результаты расчета коэффициента несинусоидальности $K_{НС}$ для периода t_2 от 5 до 10с, который разбивается на 500 точек (кривая 2) с $A_{O2} = 4,28 \text{ mV}$.

Сравнение представленных графиков

позволяет установить, что как по постоянным составляющим, так и по структуре гармонического ряда и степени влияния на результирующий сигнал, коэффициенты несинусоидальности для периода t_1 от 5 до 15с и для периода t_2 от 5 до 10с практически совпадают (погрешность не превышает 10%). Следовательно, для адекватного описания сигнала при измерении сил резания в установившийся период достаточно рассматривать интервал времени 5 с.

На рис. 5 приведены результаты разложения периодической составляющей напряжения при измерении силы резания P_Z на гармонические составляющие $u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_7$, имеющие наибольшее влияние на результирующий сигнал в соответствии с коэффициентом несинусоидальности ($K_{НС} > 20\%$). На этом же рис. 5 представлены графики результирующего напряжения u_{Σ} , полученного путем суммирования мгновенных значений напряжений u_i , в сравнении с исходными значениями напряжений $u_{эксп}$, свиде-

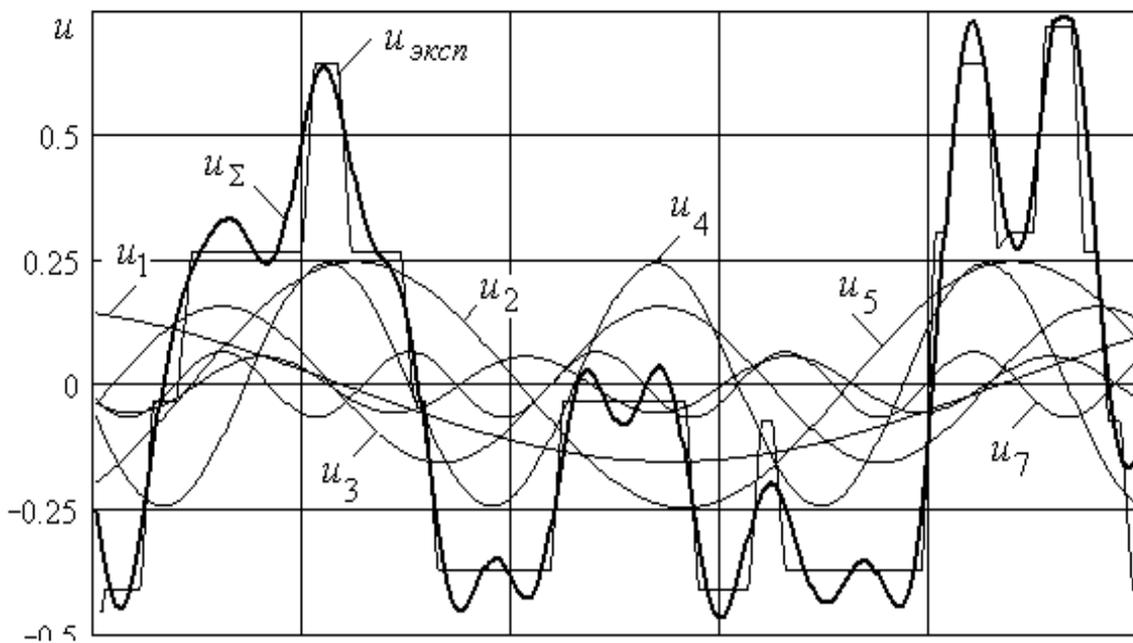


Рис. 5. Гармонический состав напряжений при измерении силы резания P_Z

по результатам разложения в период t от 5 до 10с

свидетельствующие о достаточно хорошем их совпадении (погрешность не превышает 10%).

Графики изменения коэффициентов несинусоидальности для различных гармоник (рис.2, 4) свидетельствуют о том, что для гармоник выше 16, его значение не превышает 10%, то есть степень влияния этих гармоник на результирующий сигнал незначительна. Результаты разложения напряжения при измерении сил резания в период t от 5 до 10с в ряд Фурье представлены в табл. 1 коэффициентом несинусоидальности $K_{НС}$; коэффициентами B_k, C_k ; амплитудным значением и начальной фазой тока (напряжения) – I_{mk}, φ_k , действующим значением тока $I_{НОМ}$; действующим значением тока (напряжения) k -й гармоники – I_k .

Математическое описание сигналов, полученных при измерении сил резания по результатам разложения в соответствии с табл. 1 для периода t от 5 до 10 с:

$$u(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{16} B_k \sin k\omega t + \sum_{k=1}^{16} C_k \cos k\omega t; \text{ при } 5c < t < 10c; \quad 8)$$

Та-

№ п/п k	Значения параметров в разложении Фурье для гармоник $k = 1 \dots 16$						
	$K_{нс k}$	C_k	B_k	I_{mk}	φ_k	$I_{ном k}$	I_k
1	0.334	0.143	-0.057	0.154	-0.381	0.298	0.099
2	0.582	-0.198	0.147	0.247	2.504	0.298	-0.173
3	0.374	-0.041	0.151	0.156	1.839	0.298	-0.111
4	0.578	-0.056	-0.237	0.243	-1.803	0.298	-0.172
5	0.135	-0.035	-0.044	0.057	-2.245	0.298	- 0.04
6	0.202	$-8.299 \cdot 10^{-3}$	0.084	0.085	1.669	0.298	- 0.06
7	0.156	-0.027	-0.06	0.066	-1.992	0.298	-0.046
8	0.059	-0.02	-0.015	0.025	-2.494	0.298	-0.018
9	0.212	$2.867 \cdot 10^{-3}$	-0.09	0.09	-1.539	0.298	-0.063
10	0.125	-0.045	-0.027	0.053	-2.596	0.298	0.037
11	0.063	0.019	0.018	0.026	0.776	0.298	0.019
12	0.185	0.073	-0.026	0.078	-0.342	0.298	-0.055
13	0.183	-0.03	-0.07	0.076	-1.972	0.298	-0.054
14	0.163	-0.021	0.066	0.069	1.873	0.298	0.048
15	0.069	$-1.392 \cdot 10^{-3}$	-0.029	0.029	-1.619	0.298	-0.021
16	0.107	0.02	-0.041	0.045	-1.122	0.298	-0.032

блиця 1. Результаты разложения Фурье

Заключение

С применением методики разложения в ряд Фурье выполнена оценка гармонического состава и коэффициента несинусоидальности для токов (напряжений) при измерении сил резания. В результате расчетов устанавливается вклад каждой гармоники в результирующий сигнал, определяются значения постоянной составляющей и коэффициентов ряда Фурье, что позволяет дать аналитическое описание исследуемого сигнала с заданной точностью.

Предложенная методика позволяет выполнять более качественный анализ закономерностей формирования сил резания и может найти широкое применение для моделирования и управления процессами механообработки.

Список литературы: 1. Сивокобыленко В.Ф., Меженкова М.А. Метод определения мгновенных значений симметричных составляющих токов и напряжений в переходных режимах // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Львів: Львівська політехніка, №403. – 2000. – С. 149-156. 2. Сивокобыленко В.Ф., Меженкова М.А. Оценка степени несимметрии трехфазных напряжений и токов в переходных режимах электрических систем // Зб. праць IV Міжнар. наук. конф. "Ефективність і якість електропостачання промислових підприємств". – Маріуполь: ПриазДТУ. – 2000. – С. 109-113. 3. Матвиенко А.В., Феник Л.Н. К вопросу о влиянии ЭДС резания на шероховатость обработанной поверхности // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Международный сборник научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2006. – Вып.

32. – С. 74-77. 4. Электротехнический справочник: В 3 т. Т. 1. /Под общ. ред. В.Г. Герасимова и др. – 7-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 488 с.

ВИЗНАЧЕННЯ ГАРМОНІЙНОГО СКЛАДУ СТРУМІВ І НАПРУГИ
ПРИ ВИМІРЮВАННІ СИЛ РІЗАННЯ В МЕХАНООБРОБЦІ

Смірнова М.А.

Представлена методика визначення миттєвих значень струмів (напруги) з будь-яким гармонійним складом, заснована на розкладанні в ряд Фур'є. Із застосуванням вказаної методики виконана оцінка гармонійного складу і коефіцієнта несінусоїдальності для струмів (напруги) при вимірюванні сил різання.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ
ПРИ ИЗМЕРЕНИИ СИЛ РЕЗАНИЯ В МЕХАНООБРАБОТКЕ

Смирнова М.А.

Представлена методика определения мгновенных значений токов (напряжений) с любым гармоническим составом, основанная на разложении в ряд Фурье. С применением указанной методики выполнена оценка гармонического состава и коэффициента несинусоидальности для токов (напряжений) при измерении сил резания.

DETERMINATION OF HARMONIC COMPOSITION OF CURRENTS
AND VOLTAGES AT MEASURING OF CUTTING FORCES IN TOOLING

Smirnova M.A.

The method of determination of instantaneous values of currents (voltages) with any harmonic composition based on decomposition in the Fourier row is presented. Using the indicated method the estimation of harmonic composition and nonsinusoidal coefficient for currents (voltages) at measuring of cutting forces is executed.

Рецензент: д.т.н., доц. Гусев В.В.