

УДК 621.317.714

В. В. Кухарчук, д. т. н., проф.; **В. И. Родинков, к. т. н., доц.;** **А. М. Коваль****ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ
ВЕЛИЧИН ПРИБОРОМ МАГНИТО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

В работе рассматривается проблема измерения токов и напряжений несинусоидальной формы. Представлена и решена математическая модель прибора магнито-электрической системы при измерении сигналов сложной формы. Показано, что при измерении несинусоидальных токов и напряжений возникает значительная погрешность измерений.

Ключевые слова: несинусоидальные токи и напряжения, математическая модель, погрешность измерения, измерительный прибор, измерительные величины, форма тока.

Введение. В последнее время всё больший интерес вызывают проблемы измерений несинусоидальных величин. Такие задачи возникают при измерениях в устройствах силовой преобразовательной техники, которые по своим характеристикам являются нелинейными элементами, поэтому в них протекают токи и напряжения сложной негармоничной формы. Средства измерения, используемые при измерениях таких величин и являющиеся комплектующими элементами промышленных образцов силовых преобразователей не удовлетворяют требованиям относительно точности измерений таких величин.

В частности с такой проблемой приходится сталкиваться при измерениях выпрямленных токов и напряжений управляемых и неуправляемых выпрямителей. Эти устройства построены таким образом, что указанные величины имеют пульсирующий характер и несинусоидальную форму, а их гармоничный состав зависит от разных режимов работы выпрямителя и его нагрузки. Такие величины большей частью измеряют электромеханическими приборами магнито-электрической системы, которые измеряют среднее значение [1]. Однако исследования проведенные в [2 – 4] показали, что при измерениях постоянных величин со значительной переменной составляющей данные приборы не обеспечивают необходимую точность измерения. Погрешность измерения зависит от формы измерительной величины и возрастает при увеличении переменной несинусоидальной составляющей до 10 – 15%.

Т. е. при наличии сменной составляющей измерительной величины стрелка прибора поворачивается на угол меньший, чем угол, соответствующий среднему значению этой величины. Это происходит вследствие механических свойств самого прибора, которых не учитывает уравнения преобразования прибора. Поэтому возникает задача создания математической модели прибора данной системы, которая бы учитывала механические свойства прибора при измерении постоянных пульсирующих токов и оценки погрешностей измерения указанных величин с ее помощью.

Целью предлагаемой работы является оценка точности измерения токов и напряжений стандартных форм (прямоугольной, треугольной, трапецевидной и т. д.), а также реальных форм, которые имеют место в устройствах преобразовательной техники.

Материал и результаты исследований. С целью оценки погрешностей измерения указанных выше величин создана математическая модель прибора данной системы, учитывающая его механические свойства. Данная математическая модель представляет собой дифференциальное уравнение второго порядка, в правой части которого содержится зависимость тока от времени:

$$J \cdot \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + P \cdot \frac{d \alpha}{dt} + W \cdot \alpha = BS \omega \cdot i(t), \quad (1)$$

где J – момент инерции подвижной части, P – коэффициент успокоения рамки, W – удельный противодействующий момент пружины, B – магнитная индукция, которую создает постоянный магнит в зазоре, S – площадь рамки, ω – количество витков обмотки, $i(t)$ – ток, протекающий в обмотке.

Решением данного уравнения является зависимость изменения угла отклонения стрелки прибора во времени при протекании через обмотку прибора токов разной формы. Сравнивая их со значением угла отклонения стрелки при протекании постоянного тока равного по величине среднему значению пульсирующего тока соответствующей формы, получаем погрешность, которая возникает при измерении токов такой формы.

В предлагаемой работе для исследования использовался амперметр М330. Его механические характеристики такие, что уравнение (1) приобретет вид:

$$0,87 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{d^2\alpha}{dt^2} + 9,835 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{d\alpha}{dt} + 185,5 \cdot 10^{-9} \cdot \alpha = 455,36 \cdot 10^{-6} \cdot i(t). \quad (2)$$

Проанализируем отклонение стрелки при протекании через рамку прибора идеального постоянного тока и, например, трапециевидного сигнала, аналитическая запись которого можно представить гармоничным рядом:

$$i_2(t) = 30 \cdot 10^{-3} + \frac{12 \cdot 30 \cdot 10^{-3}}{\pi^2} \left(\sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \sin(\omega t) + \frac{1}{3^2} \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \sin(3\omega t) + \frac{1}{5^2} \sin\left(\frac{5\pi}{3}\right) \sin(5\omega t) + \dots \right). \quad (3)$$

Исследуемые токи графически представлены на рис. 1, из которого видно, что среднее значение функции несинусоидального тока равно по величине идеальному постоянному току и составляет 30 мА.

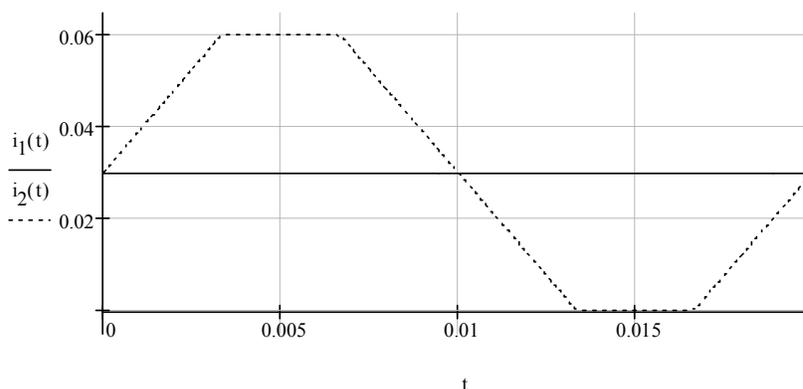


Рис. 1. Форма исследуемых сигналов

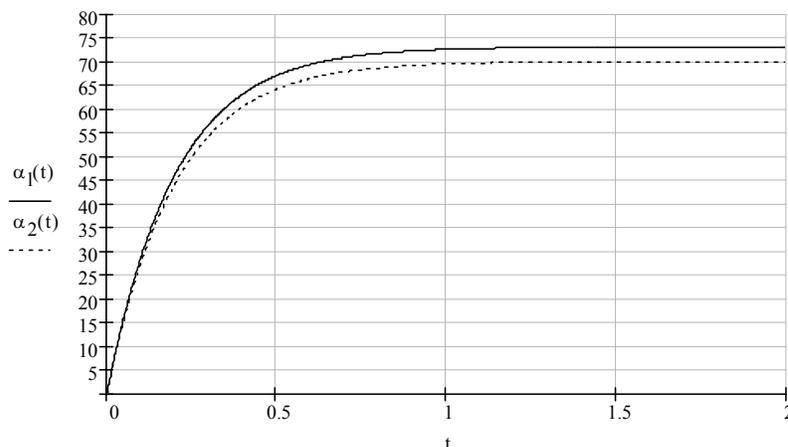


Рис. 2. Графики изменения угла отклонения стрелки во времени

На рис. 2 представлено графическое решение математической модели для двух указанных выше форм измерительных сигналов. Как видно из полученных зависимостей, конечный

угол отклонения стрелки разный для сигналов разной формы, хотя их среднее значение одинаковое. Угол отклонения при действии постоянного тока составляет 73° , и его можно считать углом, соответствующим среднему значению, а вторая зависимость моделирует отклонение стрелки при протекании через обмотку прибора тока сложной формы, которая в результате отклонилась на угол $69,9^\circ$. Из данных зависимостей можно найти относительную погрешность измерения трапециевидного сигнала:

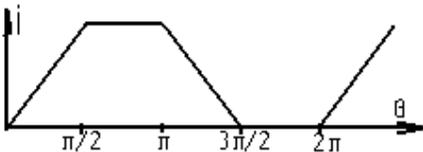
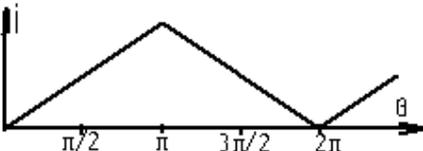
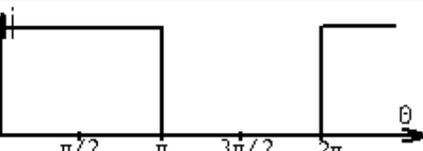
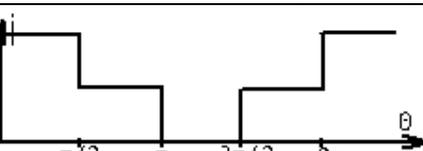
$$\delta = (73 - 69,9) * 100 \% / 73 = 4,2 \%$$

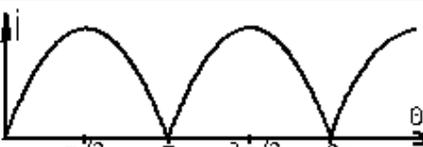
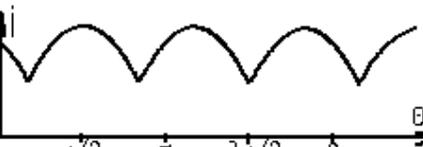
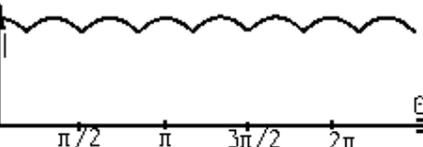
Проведем аналогичные расчеты для сигналов стандартных форм. В таблице 1 приведено графическое представление сигналов, аналитическая запись в виде тригонометрического ряда, а также указаны результаты моделирования и оценена относительная погрешность, возникающая при измерении тока соответствующей формы.

Полученные результаты показывают, что измерения несинусоидальных токов и напряжений сопровождаются значительными погрешностями, достигающими 10%, что выходит за пределы класса точности исследуемого прибора, и зависящими от формы измерительного сигнала. Эти погрешности обусловлены механическими свойствами данного прибора и совпадают с результатами экспериментальных исследований проведенных в [2 – 4].

Таблица 1

Результаты расчетов погрешностей измерения токов разных форм.

№	Форма тока и его аналитическое представление	Отклонение стрелки при действии		Погрешность, %
		постоянного тока	переменного тока	
1	 $i(t) = 30 \cdot 10^{-3} + \frac{12 \cdot 30 \cdot 10^{-3}}{\pi^2} \left(\sin \frac{\pi}{3} \cdot \sin \omega t + \frac{1}{9} \sin \pi \cdot \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin \frac{5\pi}{3} \cdot \sin 5\omega t + \dots \right)$	73	69,9	4,2
2	 $i(t) = 30 \cdot 10^{-3} + \frac{8 \cdot 30 \cdot 10^{-3}}{\pi^2} \left(\sin 314t - \frac{1}{9} \sin 3 \cdot 314t + \frac{1}{25} \sin 5 \cdot 314t - \dots \right)$	73	68,5	6,1
3	 $i(t) = 30 \cdot 10^{-3} + \frac{4 \cdot 30 \cdot 10^{-3}}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right)$	73	66,3	9,2
4		73	66,7	8,4

	$i(t) = 30 \cdot 10^{-3} + \frac{4 \cdot 30 \cdot 10^{-3}}{\pi} \left(\sin \frac{\pi}{3} \cdot \cos \omega t + \frac{1}{3} \sin 3 \cdot \frac{\pi}{3} \cdot \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5 \cdot \frac{\pi}{3} \cdot \cos 5\omega t + \dots \right)$			
5	 $i(t) = 60 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \cdot \cos \omega t + \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \dots \right)$	73	63,4	13,2
6	 $i(t) = 60 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t + \dots \right)$	73	70,4	3,5
7	 $i(t) = 60 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2 \cdot 4} \cos 3\omega t - \frac{1}{5 \cdot 7} \cos 6\omega t + \dots \right)$	73	72,1	1,3
8	 $i(t) = 30 \cdot 10^{-3} \left(1 + \frac{2 \cos 6\omega t}{5 \cdot 7} - \frac{2 \cos 12\omega t}{11 \cdot 13} + \dots \right)$	73	72,7	0,37

Выводы

В ходе проведенного исследования была создана математическая модель прибора магнито-электрической системы при измерении несинусоидальных токов и напряжений. Её решение для серийного прибора свидетельствует, что при измерении сигналов сложной формы возникает значительная погрешность, которая выходит за пределы класса точности данного прибора. Созданная модель математически обосновывает экспериментальные данные, полученные на предыдущих этапах исследования. Полученные с ее помощью результаты могут быть использованы для оценки и коррекции погрешностей измерений несинусоидальных токов и напряжений магнито-электрическими измерительными приборами. В частности, результаты, полученные в опытах № 5 – 8 могут быть использованы для оценки точности измерения в устройствах силовой преобразовательной техники, где протекают токи и напряжения указанных форм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудольф Лаппе Измерение в энергетической электронике: [Перевод с нем. В.А. Лабунцова] / Фридрих Фишер. – М.: Энергоиздатом, 1986. – 230 с.
2. Родінков В. Оцінка точності вимірювання струмів та напруг складної форми у трифазному однофазному керуваному випрямлячі / В. І. Родінков, А. М. Коваль // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2005. – № 1. – С. 51 – 55.
3. Родінков В. Вплив параметрів фільтруючих установок на точність вимірювання електричних величин в трифазному мостовому випрямлячі / В. І. Родінков, А. М. Коваль // Вісник Кременчуцького державного Наукові праці ВНТУ, 2009, № 2

політехнічного університету. – 2006. – № 3 (1). – С.113 – 115.

4. Родінков В. Вплив параметрів Г-подібних фільтрів на точність вимірювання електричних величин в трифазному мостовому випрямлячі / В. І. Родінков, А. М. Коваль // Вісник Хмельницького національного університету. – 2006. – № 5. – С.124 – 127.

Кухарчук Василь Васильевич – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой теоретической электротехники и электрических измерений, тел.: (0432)-598-444.

Родинков Валерий Иванович – к. т. н., доцент кафедры теоретической электротехники и электрических измерений, тел.: (0432)-598-444.

Коваль Андрей Николаевич – аспирант кафедры теоретической электротехники и электрических измерений, тел.: (0432)-598-444.

Винницкий национальный технический университет.