

УДК 621.396.96

УВЕЛИЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

Исаев А.В., Суходолов Ю.В., Ершениа Т.С., Черняк А.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Одной из наиболее актуальных проблем современной диагностики является максимально достоверное измерение временных параметров исследуемых сигналов в том числе в условиях нестабильности самих формируемых сигналов. С учетом современных технических возможностей погрешность от нестабильности некоторых исходных параметров существенно влияет на точность результата. По этому основной целью данной работы является разработка метода измерения временных интервалов исследуемых временных процессов, существенно уменьшающего погрешность, связанную с нестабильностью задающих частот.

Ключевые слова: прерывистая импульсная последовательность, время задержки импульсной последовательности, погрешность от нестабильности параметров.

INCREASING THE ACCURACY OF MEASURING TIME PARAMETERS WITH INSTABILITY OF THE PARAMETERS OF PULSE SIGNALS

Isaev A., Suchodolov U., Eroshenya T., Cherniak A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. One of the most pressing problems of modern diagnostics is the maximally reliable measurement of the time parameters of the signals under study, including under conditions of instability of the generated signals themselves. Taking into account modern technical capabilities, the error from the instability of some initial parameters significantly affects the accuracy of the result. Therefore, the main goal of this work is to develop a method for measuring the time intervals of the studied time processes, which significantly reduces the error associated with the instability of the driving frequencies.

Key words: discontinuous pulse train, pulse train delay time, error from parameter instability.

Адрес для переписки: Исаев А.В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: isaev0302@gmail.com

Одной из наиболее важных проблем современного диагностики является максимально достоверное измерение параметров исследуемых процессов. А с учетом возможностей современного мира, когда исследуемые параметры и характеристики минимизируются, это проблема становится все более актуальной. Не обошла эта проблема и измерения различных временных параметров. Так измерение малых временных интервалов требует не только высокой чувствительности фиксируемых параметров, но и минимальной погрешности от нестабильности самих формируемых сигналов. Однако, у наиболее широко распространенных на сегодняшний день способов есть основной недостаток – это существенная зависимость точности измерения временного интервала от технических параметров используемого оборудования и ограниченный учет влияния нестабильности входных параметров на получаемый конечный результат. Целью работы является разработка метода измерения временных интервалов исследуемых временных процессов, существенно уменьшающего погрешность, связанную с нестабильностью задающих частот.

Анализируя последовательности сигналов с различными параметрами было получено, что наиболее оптимальными для достижения цели является сложная последовательность, состоящая из двух двойных импульсных последовательностей прямоугольной формы (рис. 1).

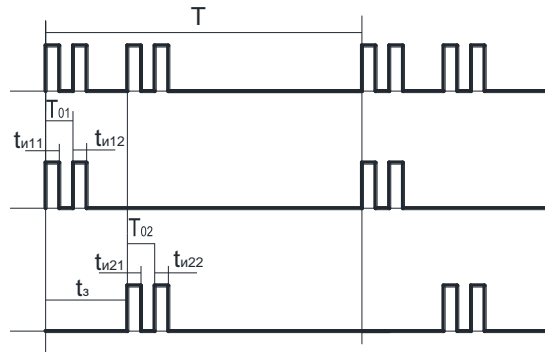


Рисунок 1 – Исследуемая импульсная последовательность

Учитывая, что: $t_{и11} = t_{и12} = t_{и21} = t_{и22} = t_{и}$ и $T_{01} = T_{02} = T_0$, комплексные амплитуды n-ой гармоники такой последовательности импульсов можно определить как:

Для первой прерывистой последовательности с импульсами 1 и 2.

Уравнение для первого импульса имеет вид

$$|U_1| = \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_{и}}). \quad (1)$$

Для второго

$$|U_2| = \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_{и}}) e^{-0jn\omega k T_0}, \quad (2)$$

учитывая, что

$$|U_{n1}| = |U_1| + |U_2|,$$

то

$$\begin{aligned} |U_{n1}| &= \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_n}) + \\ &+ \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_n}) e^{-jn\omega k T_0} = \\ &= \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_n}) (1 + e^{-jn\omega k T_0}), \end{aligned} \quad (3)$$

где E – амплитуда импульсов; T_0 – период импульсов в последовательности; t_n – длительность импульсов; n – номер гармоники; ω – циклическая частота.

Аналогично для второй прерывистой последовательности с импульсами 3 и 4.

Уравнение для третьего импульса имеет вид

$$|U_3| = \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_n}) e^{-jn\omega k t_3}, \quad (4)$$

где t_3 – время задержки второй импульсной последовательности.

И для четвертого:

$$\begin{aligned} |U_4| &= \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_n}) e^{-jn\omega k (t_3 + T_0)} = \\ &= \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_n}) e^{-jn\omega k t_3} e^{-jn\omega k T_0}, \end{aligned} \quad (5)$$

следовательно,

$$\begin{aligned} |U_{n2}| &= |U_3| + |U_4| = \\ &= \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_n}) e^{-jn\omega k t_3} + \\ &+ \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_n}) e^{-jn\omega k t_3} e^{-jn\omega k T_0} = \\ &= \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_n}) e^{-jn\omega k t_3} (1 + e^{-jn\omega k T_0}), \end{aligned} \quad (6)$$

где t_3 – время задержки второй импульсной последовательности.

Тогда, комплексная амплитуда n -ой гармоники представленной прерывистой последовательности импульсов определяется как сумма этих двух импульсных последовательностей:

$$\begin{aligned} |U| &= |U_{n1}| + |U_{n2}| = \\ &= \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_n}) (1 + e^{-jn\omega k T_0}) + \\ &+ \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_n}) e^{-jn\omega k t_3} (1 + e^{-jn\omega k T_0}) = \\ &= \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_n}) (1 + e^{-jn\omega k T_0}) (1 + e^{-jn\omega k t_3}), \end{aligned} \quad (7)$$

или, с учетом преобразования в тригонометрической форме амплитуда n -ой спектральной составляющей имеет вид

$$|U_n| = \frac{4E}{\pi n} \left| \sin \frac{n\omega t_n}{2} \right| \left| \cos \frac{n\omega T_0}{2} \right| \left| \cos \frac{n\omega t_3}{2} \right|. \quad (8)$$

Согласно выражению 8 можно сделать вывод, что в качестве основного информативного параметра при измерениях временных интервалов могут выступать длительность импульсов в последовательности t_n , период импульсов в последовательности T_0 и время задержки между двумя импульсными последовательностями t_3 . Однако чаще всего наибольшее информативным параметром будет выступать время задержки между двумя импульсными последовательностями. С помощью программного обеспечения Mathcad проанализируем изменение амплитудно-частотного спектра прерывистой импульсной последовательности в зависимости от изменения время задержки при равных остальных временных параметрах. В этом случае зависимости имеют следующий вид (рис. 2).

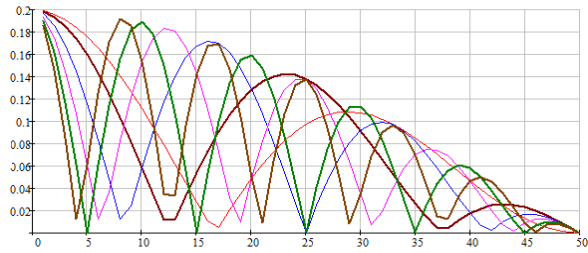


Рисунок 2 – Изменение амплитудно-частотного спектра прерывистой импульсной последовательности в зависимости от изменения время задержки при $T = 20$ мсек $T_0 = 0,2$ мсек, $t_n = 0,1$ мсек: 1) $t_3 = 2T_0$, 2) $t_3 = 4T_0$, 3) $t_3 = 6T_0$, 4) $t_3 = 8T_0$, 5) $t_3 = 10T_0$, 6) $t_3 = 12T_0$

Для анализа определим абсолютную погрешность, влияющую на формирование импульсной последовательности. Приращение амплитуды $|U_n|$, являющееся абсолютной погрешностью и образующееся в результате некорректированных изменений параметров E , ω , t_n и T_0 можно определить как

$$\begin{aligned} |\Delta U_{nE\omega t_n T_0}| &= \frac{\delta |U_n|}{\delta E} \Delta E + \frac{\delta |U_n|}{\delta \omega} \Delta \omega + \\ &+ \frac{\delta |U_n|}{\delta t_n} \Delta t_n + \frac{\delta |U_n|}{\delta T_0} \Delta T_0 + \frac{\delta |U_n|}{\delta t_3} \Delta t_3, \end{aligned}$$

где ΔE , $\Delta \omega$, Δt_n , ΔT_0 , и Δt_3 – соответственно изменения параметров E , ω , t_n , T_0 и t_3 .

При этом, первые четыре члена выражения являются абсолютной погрешностью при измерении Δt_3 .

Для определения минимальной чувствительности измерений на флуктуацию основных параметров импульсной последовательности определим частные производные и приравняем их к нулю.

$$\frac{\delta |U_n|}{\delta E} = \frac{4}{\pi n} \left| \sin \frac{n\omega t_n}{2} \right| \cdot \left| \cos \frac{n\omega T_0}{2} \right| \cdot \left| \cos \frac{n\omega t_3}{2} \right| \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta |U_n|}{\delta t_n} &= \frac{2E\omega}{\pi} \operatorname{sign} \left(\sin \frac{n\omega t_n}{2} \right) \times \\ &\times \cos \frac{n\omega t_n}{2} \left| \cos \frac{n\omega T_0}{2} \right| \left| \cos \frac{n\omega t_3}{2} \right|, \end{aligned} \quad (9)$$

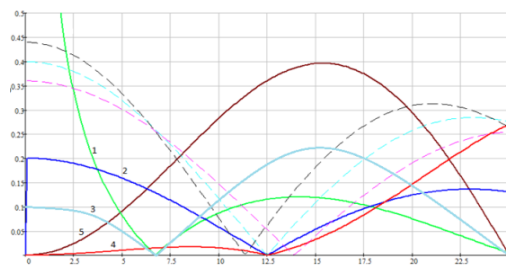
$$\frac{\delta|U_n|}{\delta T_0} = \frac{2E\omega}{\pi} \operatorname{sign}\left(\cos\frac{n\omega T_0}{2}\right) \times \sin\frac{n\omega T_0}{2} \left| \sin\frac{n\omega t_n}{2} \right| \left| \cos\frac{n\omega t_3}{2} \right|, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta|U_n|}{\delta\omega} = & \frac{2E}{\pi} \left(t_n \cos\frac{n\omega t_n}{2} \cos\frac{n\omega T_0}{2} \times \right. \\ & \times \cos\frac{n\omega t_3}{2} - T_0 \sin\frac{n\omega t_n}{2} \sin\frac{n\omega T_0}{2} \times \\ & \times \cos\frac{n\omega t_3}{2} - t_3 \sin\frac{n\omega t_n}{2} \cos\frac{n\omega T_0}{2} \sin\frac{n\omega t_3}{2} \left. \right) \times \\ & \times \operatorname{sign}\left(\sin\frac{n\omega t_n}{2} \cos\frac{n\omega T_0}{2} \cos\frac{n\omega t_3}{2}\right). \end{aligned} \quad (11)$$

Анализ чувствительности проведенный с помощью ПО Mathcad представлен на рис. 3

Учитывая, что при формировании импульсов с помощью существующих микроконтроллерных средств, можно добиться нестабильности по амплитуде до 0,01 %, а нестабильность временных параметров менее 0,0001 %, что ниже нестабильности опорной частоты анализируемых сигналов, которая может составлять до 10 %, то все дальнейшие действия будут направлены для снижения погрешности связанных с нестабильности частоты сигнала. Так из уравнения (11) для достижения минимальной чувствительности к ω с допущением, что $T_0 = 2t_n$ (скважность импульсов в двойной импульсной последовательности равен двум), параметры последовательности импульсов определяются из зависимости:

$$t_w \operatorname{tg} \frac{n\omega t_w}{2} = \frac{T_0}{2 \operatorname{tg} \frac{n\omega T_0}{4}} - T_0 \operatorname{tg} \frac{n\omega T_0}{2}. \quad (12)$$



1 – к частоте следования импульсов ω ; 2 – к длительности импульсов t_n ; 3 – к амплитуде сформированных импульсов E ; 4 – к периоду импульсов в последовательности T_0 ; 5 – к времени задержки в импульсной последовательности t_3

Рисунок 3 – Кривые чувствительности амплитудно-частотного спектра к изменению параметров импульсной последовательности

Литература

1. Чумаков, С. А. Определение начальных фаз высших гармонических составляющих тока нелинейной электромагнитной нагрузки / С. А. Чумаков, Ю. В. Суходолов, А. Н. Малашин // Вестник военной академии РБ. – 2016. – Т. 50, № 1. – С. 144–152.
2. Способ определения времени задержки между двумя периодическими последовательностями импульсов: патент ВУ 19225С1 / Ю. В. Суходолов, О. И. Киш, Л. П. Крученко. – Опубл. 30.06.2015.
3. Харкевич, А. А. Спектры и анализ / А. А. Харкевич. – Изд. 6. – URSS. – 2018. – 240 с.

УДК 621.396.96

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПО ТОКУ ХОЛОСТОГО ХОДА

Исаев А.В., Суходолов Ю.В., Сушко А.С., Черняк А.С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Одна из частых причин преждевременных отказов электрических машин это пробой межвитковой изоляции. Существующие методы выявления дефектов чаще всего основаны на измерении активного сопротивления между витками в обмотках. Такой подход в производственных условиях не всегда оптимальным. По этому в данной работе рассматривается задача построения измерительной системы для диагностики состояния обмоток электрических машин, который обеспечит возможность косвенного определения дефектов по спектру намагничивающего тока холостого хода, что позволит снизить трудоемкость диагностирования при сохранении высокой достоверности.

Ключевые слова: диагностика обмоток электрических машин, погрешность от нестабильности параметров, чувствительность к изменениям параметров, спектр намагничивающего тока холостого хода.

MEASURING SYSTEM FOR DIAGNOSTIC STATE OF WINDING OF ELECTRIC MACHINES BY IDLE CURRENT

Isaev A., Suchodolov U., Sushko A., Cherniak A.

Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. One of the most common causes of premature failures of electrical machines is breakdown of interturn insulation. The existing methods for detecting defects are most often based on measuring the active resistance between the turns in the windings. This approach in a production environment is not always optimal. Therefore, in this work, the problem of constructing a measuring system for diagnosing the state of windings of electrical ma-