

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.311.22: 621.316

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА ТОКА НА БАЗЕ КАТУШКИ РОГОВСКОГО

О.А. ГЛУХОВ, Д.О. ГЛУХОВ

Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола

*В статье представлен простой и практичный способ расчета параметров индукционного датчика на базе катушки Роговского. Основной особенностью способа является применение таких параметров, как постоянная времени источника и постоянная времени обратной связи интегратора. Исследована взаимосвязь между чувствительностью, полосой пропускания преобразователей. Показано, что максимальная чувствительность обеспечивается при согласовании параметров источника и интегратора. Показано, что чувствительность и полосу пропускания датчика просто оптимизировать при применении предложенных параметров.*

*Ключевые слова: преобразователь тока, катушка Роговского, передаточная функция, чувствительность, частотная характеристика.*

В зависимости от целей измерений к индукционным датчикам предъявляются различные требования: при измерении больших токов в единицы–десятки кА приемлемыми значениями чувствительности являются десятки мВ/кА, при измерениях импульсных токов с широким частотным спектром важна ширина полосы пропускания, для целей релейной защиты актуальна чувствительность, и помехоустойчивость. Для всех случаев важна погрешность измерений – как амплитудная, так и угловая. Катушки Роговского имеют наибольшее распространение при измерении импульсных токов в технике высоких напряжений, в высоковольтных электрофизических установках, при измерении больших токов промышленной частоты [1, 2, 3].

Статья посвящена анализу теоретических и практических аспектов применения индукционных датчиков тока в общем случае, когда источник сигнала имеет индуктивный характер внутреннего сопротивления, но в большей степени относится к измерению малых токов утечки промышленной частоты, что актуально при реализации мониторинга состояния изоляции по токам утечки и при построении защит от замыканий на землю в кабельных распределительных сетях. Традиционно в качестве первичных датчиков в системах релейной защиты и автоматики (РЗА) применяют электромагнитные трансформатора тока (ТТ) и трансформаторы тока нулевой последовательности (ТТНП), обладающие рядом недостатков: большая масса, насыщение магнитного сердечника при первичных токах большой кратности или с

© О.А. Глухов, Д.О. Глухов

Проблемы энергетики, 2015, № 3-4

апериодической составляющей. В то же время применение в качестве датчика тока катушки Роговского имеет много преимуществ, таких как широкий динамический диапазон измерений, линейность, широкий частотный диапазон, наличие гальванической развязки, отсутствие зависимости от температуры, малые габариты и вес, простота установки, и является хорошей альтернативой традиционным измерительным трансформаторам тока [4, 5, 6].

Отличительной особенностью датчиков тока является малая мощность выходного сигнала по сравнению с ТТ и ТТНП, конструкции которых сформировались достаточно давно, поэтому стандартные значения их выходных параметров определялись уровнем развития и состоянием средств автоматики середины XX века. Большая выходная мощность ТТ и ТТНП была оправданной, так как от них питались реле автоматики и защиты, средства измерений и регистрации. Современные информационно-измерительные системы (ИИС) имеют на своих входах либо сигнальные процессоры с встроенными АЦП, либо отдельные АЦП, которые не требуют таких мощных сигналов для получения приемлемого отношения сигнал/шум [4], что привело к возникновению и широкому внедрению концепции датчиков тока малой мощности – *LPCT (low power current transducers)*.

Как известно, катушка Роговского — это тороидальная катушка без магнитопровода, расположенная вокруг проводника с измеряемым током  $i$ , который создает магнитное поле, индуцирующее ЭДС.  $\varepsilon(t)$  в обмотке катушки:  $\varepsilon(t) = -M \cdot di(t)/dt$ , где  $M$  – взаимная индуктивность прямолинейного провода, проходящего перпендикулярно плоскости катушки через ее центр.

Так как сигнал на выводах катушки пропорционален скорости изменения тока, то для его преобразования в сигнал, пропорциональный измеряемому току, необходима интегрирующая цепь, от свойств которой зависят коэффициент передачи, фазовый сдвиг и полоса рабочих частот [4]. При измерении токов промышленной частоты обычно используется активный аналоговый интегратор. Параметры интегратора определяют коэффициент передачи, линейность, фазовый сдвиг и полосу рабочих частот.

Рассмотрим интегрирующую цепь на инвертирующем операционном усилителе (ОУ) для случая, когда источник сигнала имеет активно-индуктивный характер, что соответствует схеме замещения катушки Роговского (рис. 1). В общем случае данная схема замещения применима для любых источников сигнала, имеющих активно-индуктивный характер внутреннего сопротивления.

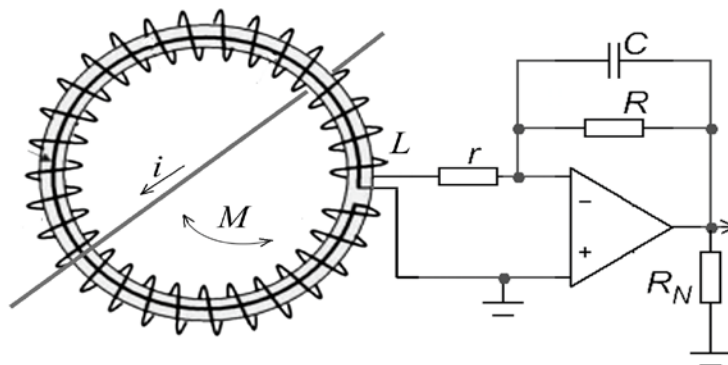


Рис. 1. Упрощенная схема замещения датчика тока на основе катушки Роговского

Коэффициент передачи инвертирующего усилителя определяется известным выражением  $K = -Z_{o.c.}/Z_{ист.}$  [7], где  $Z_{o.c.}$  – полное сопротивление в цепи обратной

связи;  $Z_{ист.}$  – полное сопротивление в цепи источника сигнала. При применении в качестве источника сигнала дифференцирующего индукционного датчика, например по типу пояса Роговского,  $Z_{ист.} = r + j \cdot \omega \cdot L$ , где  $L$  – индуктивность;  $r$  – активное сопротивление в цепи источника сигнала (большая часть – это сопротивление катушки);  $\omega$  – круговая частота. Инвертирующий усилитель должен выполнять функции интегратора, поэтому цепь обратной связи содержит конденсатор с емкостью  $C$  и включенный параллельно ему резистор  $R$ . При практической реализации обойтись без этого резистора в цепи обратной связи невозможно из-за возникновения значительного напряжения смещения на выходе ОУ. Таким образом, полное сопротивление цепи обратной связи определяется выражением  $Z_{о.с.} = R / (1 + j \cdot \omega \cdot R \cdot C)$ . Влиянием сопротивления нагрузки  $R_N$  ОУ можно пренебречь, так как его выходной сигнал подается на вход АЦП микропроцессора через буферный усилитель с большим входным сопротивлением.

При измерении синусоидального тока  $i(t) = i \cdot e^{j \cdot \omega t}$  наведенная ЭДС будет  $\varepsilon(t) = j \cdot \omega \cdot M \cdot i \cdot e^{j \cdot \omega t}$ . В технической документации общепринятым является использование чувствительности датчика  $K(\omega) = U_{вых.} / i_{изм.}$ , имеющего размерность В/А. С учетом вышеприведенных выражений, после преобразований, выделения реальной и мнимой частей и введения обозначений, чувствительность будет определяться выражением

$$K(\omega) = k_{ОУ} \cdot \omega \cdot M \cdot \frac{\omega \cdot (\tau_{ист.} + \tau_{о.с.}) + j \cdot (1 - \omega^2 \cdot \tau_{ист.} \cdot \tau_{о.с.})}{(1 - \omega^2 \cdot \tau_{ист.} \cdot \tau_{о.с.})^2 + \omega^2 \cdot (\tau_{ист.} + \tau_{о.с.})^2}, \quad (1)$$

где,  $k_{ОУ} = R/r$  – коэффициент усиления инвертирующего усилителя по постоянному току;  $\tau_{о.с.} = R \cdot C$ ;  $\tau_{ист.} = L/r$ . Отличительной особенностью предлагаемого подхода к проводимому анализу индукционного датчика тока является применение параметров  $\tau_{о.с.} = R \cdot C$ ,  $\tau_{ист.} = L/r$ , которые можно интерпретировать как постоянные времени цепей источника сигнала и обратной связи ОУ. Параметры  $\tau_{ист.}$  и  $\tau_{о.с.}$  весьма удобны при практических расчетах и существенно упрощают расчеты и экспресс-анализ схемотехнических решений.

Амплитудно-частотная характеристика определяется модулем  $|K(\omega)| = \sqrt{Re^2 + Im^2}$  и имеет вид:

$$|K(\omega)| = K_{ОУ} \cdot \frac{\omega \cdot M}{\sqrt{(1 - \omega^2 \cdot \tau_{ист.} \cdot \tau_{о.с.})^2 + \omega^2 \cdot (\tau_{ист.} + \tau_{о.с.})^2}}. \quad (2)$$

Наибольшее значение модуля чувствительности будет при  $\omega = \omega_0$ , где  $\omega_0 = 1/\tau_0$ ,  $\tau_{0ист.} \sqrt{\tau_{о.с.} \cdot \tau_{о.с.}} \cdot \sqrt{k} \cdot \sqrt{L \cdot C}$ . Таким образом, частота, на которой АЧХ чувствительности имеет максимум, определяется выражением:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \cdot \frac{1}{\sqrt{k_{ОУ}}},$$

$$|K(\omega_0)|_{\neq k} \cdot \frac{M}{(\tau_{\text{ист.}} + \tau_{\text{о.с.}})}. \quad (3)$$

Фазо-частотная характеристика (ФЧХ) имеет вид:

$$K(\varphi) = \arctg\left(\frac{Im}{Re}\right) = \arctg\left(\frac{1 - \omega^2 \cdot \tau_{\text{ист.}} \cdot \tau_{\text{о.с.}}}{\omega \cdot (\tau_{\text{ист.}} + \tau_{\text{о.с.}})}\right). \quad (4)$$

Нетрудно убедиться, что при выполнении условия  $\omega = \omega_0$  сдвиг по фазе будет отсутствовать. Если частота, на которой проводятся измерения, отличается от  $\omega = \omega_0$ , то будет иметься некоторый фазовый сдвиг. При использовании датчика тока в релейной защите от замыканий на землю, основанной на измерении тока нулевой последовательности, фазовый сдвиг между током и напряжением нулевой последовательности является важным диагностическим параметром. При измерениях тока наличие фазового сдвига определяет значение угловой погрешности, которая должна быть минимальной. Применение выражения (4) позволяет вычислить необходимую поправку по сдвигу фазы для устранения этой систематической погрешности при дальнейшей цифровой или аналоговой обработке сигнала.

Типичные значения индуктивности катушек Роговского, предназначенных для измерений токов промышленной частоты, составляют десятки мкГн, а их активных сопротивлений – единицы Ом [8, 9]. Поэтому для практики представляет интерес случай выполнения неравенства  $\tau_{\text{ист.}} \ll \tau_{\text{о.с.}}$ . Тогда выражение (2) упрощается:

$$|K(\omega)| = K_{\text{ОУ}} \cdot \frac{\omega \cdot M}{\sqrt{(1 - \omega^2 \cdot \tau_{\text{ист.}} \cdot \tau_{\text{о.с.}})^2 + (\omega \cdot \tau_{\text{о.с.}})^2}}. \quad (5)$$

А для частоты  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\tau_{\text{ист.}} \cdot \tau_{\text{о.с.}}}}$  и с учетом  $\tau_{\text{ист.}} \ll \tau_{\text{о.с.}}$  выражение (3) примет вид

$$|K(\omega_0)|_{\neq k} \cdot \frac{M}{\tau_{\text{о.с.}}}. \quad (6)$$

Выражение (4) для фазового сдвига с учетом принятого допущения  $\tau_{\text{ист.}} \ll \tau_{\text{о.с.}}$  преобразуется к виду

$$K(\varphi) = \left( \frac{1 - \omega^2 \cdot \tau_{\text{ист.}} \cdot \tau_{\text{о.с.}}}{\omega \cdot \tau_{\text{о.с.}}} \right).$$

При измерениях сигналов в полосе частот общепринятой является оценка ширины полосы пропускания по уровню -3дБ, что соответствует изменению сигнала в  $\sqrt{2}$  раз или уровню в 0,707 от наибольшего значения, принятого за 1. Частотная полоса пропускания по уровню -3дБ для случая  $\tau_{\text{ист.}} \ll \tau_{\text{о.с.}}$  составляет от  $\omega_{\text{н}} = 1/\tau_{\text{о.с.}}$  до  $\omega_{\text{в}} = 1/\tau_{\text{ист.}}$ . Ширина этой полосы может быть достаточно большой, и верхняя граничная частота определяется индуктивностью и сопротивлением цепи источника сигнала. Платой за ширину полосы пропускания является низкий коэффициент передачи, что иллюстрирует график 1 на рис. 2. При измерении больших импульсных токов обеспечение широкой полосы пропускания существенно важнее, а проблемы чувствительности не существует в силу больших значений измеряемых токов: единицы – десятки кА в импульсе. При применении датчиков тока в целях релейной защиты при замыканиях на землю широкая полоса пропускания востребована только при применении методов, основанных на

регистрации гармоник или переходных процессов при перемежающихся однофазных замыканиях.

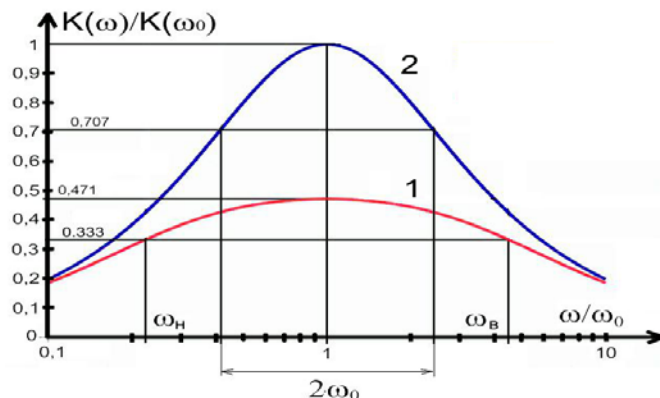


Рис. 2. Кривая 1 построена для случая  $\tau_{ист.} \ll \tau_{0.c.}$  по формуле (9) при  $\tau_{0.c.}/\tau_{ист.} = 16$ .  
Кривая 2 построена для случая  $\tau_{ист.} = \tau_{0.c.} = \tau_0$ . Масштаб по оси абсцисс логарифмический

Особый интерес представляет случай, когда  $\tau_{ист.} = \tau_{0.c.} = \tau_0$ , что реализуемо для измерений относительно высокочастотных процессов. На промышленной частоте выполнить это равенство достаточно сложно в силу малой индуктивности при традиционной реализации катушки Роговского. Тогда выражение (2) преобразуется к виду

$$|K(\omega)| = k_{OY} \cdot \frac{\omega \cdot M}{1 + (\omega \cdot \tau_0)^2}, \quad (7)$$

а ФЧХ будет иметь вид

$$K(\varphi) = \arctg \left( \frac{1 - (\omega \cdot \tau_0)^2}{2 \cdot \omega \cdot \tau_0} \right).$$

Ширина полосы пропускания по уровню -3дБ определяется границами  $\omega_H = (\sqrt{2} - 1) \cdot \omega_0$  и  $\omega_B = (\sqrt{2} + 1) \cdot \omega_0$  и составляет  $2 \cdot \omega_0$ .

При  $\omega = \omega_0 = 1/\tau_0$  коэффициент передачи имеет максимальное значение:

$$|K_{max}(\omega_0)| = k \cdot \frac{M}{2\tau_0}. \quad (8)$$

Условие  $\tau_{ист.} = \tau_{0.c.} = \tau_0$  соответствует случаю согласования цепей на частоте  $\omega = \omega_0$ , когда характеристическое сопротивление согласующего звена  $Z_0 = \sqrt{L/C}$  равно среднегеометрическому значению согласуемых активных сопротивлений  $Z_0 = \sqrt{R \cdot r}$ . Данное выражение применяется при проектировании согласующих цепей в радиотехнике, а в рассматриваемом случае свидетельствует об универсальности подхода к анализу электрических цепей с позиций теории согласования.

Если рассматривать проводник, проходящий через окно датчика как один виток первичной обмотки, то взаимная индуктивность и индуктивность катушки будут определяться формулами [10]:

$$L = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{n^2}{2 \cdot \pi} \cdot h \cdot \ln \frac{D+d}{D-d} \quad M = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{n}{2 \cdot \pi} \cdot h \cdot \ln \frac{D+d}{D-d},$$

где  $D$  – средний диаметр;  $d$  – толщина;  $h$  – высота прямоугольной тороидальной катушки Роговского. С учетом принятого условия  $\tau_{\text{ист.}} \ll \tau_{\text{о.с.}}$  выражение (8) преобразуется к виду

$$|K_{\text{max}}(\omega_0)| = \frac{k_{\text{ОУ}}}{2\tau} \cdot \frac{M}{\omega_0^2} = \frac{R}{L} \cdot \frac{M}{2} = \frac{R}{n}. \quad (9)$$

Оценку АЧХ чувствительности удобно проводить относительно её наибольшего значения при нормировании частоты относительно  $\omega_0$ . Для случая  $\tau_{\text{ист.}} \ll \tau_{\text{о.с.}}$  из выражений (5) и (6) и при выделении в качестве переменной отношения  $\omega/\omega_0$  получим

$$\frac{|K(\omega)|}{|K(\omega_0)|} = \frac{(\omega/\omega_0) \cdot \tau}{\sqrt{\left(1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + \frac{(\omega/\omega_0)^2 \cdot \tau^2}{\omega_0^2}}}. \quad (10)$$

Для случая  $\tau_{\text{ист.}} = \tau_{\text{о.с.}} = \tau_0$ , с использованием (7) и (8), получим

$$\frac{|K(\omega)|}{|K_{\text{max}}(\omega_0)|} = \frac{2 \cdot (\omega/\omega_0)}{1 + (\omega/\omega_0)^2}. \quad (11)$$

На рис. 2 показаны АЧХ для двух случаев:  $\tau_{\text{о.с.}} \gg \tau_{\text{ист.}}$  и  $\tau_{\text{о.с.}} = \tau_{\text{ист.}}$ , при одинаковой частоте  $\omega_0$ . Значения функций нормированы относительно выражения (8), а аргумент – относительно  $\omega_0$ . Из анализа выражений (9) и (10) и соответствующих им графиков следует, что при  $\tau_{\text{ист.}} \ll \tau_{\text{о.с.}}$  коэффициент передачи будет меньше, но при этом полоса пропускания будет шире. При этом наклон ФЧХ для случая  $\tau_{\text{ист.}} \ll \tau_{\text{о.с.}}$  будет более пологим, чем для случая  $\tau_{\text{ист.}} = \tau_{\text{о.с.}} = \tau_0$ .

Представляет интерес отношение проигрыша в чувствительности при расширении полосы пропускания, то есть соотношение выражения для наибольшего значения чувствительности (6) к максимальному значению чувствительности по формуле (8):

$$\frac{|K(\omega_0)|}{|K_{\text{max}}(\omega_0)|} \approx \frac{2 \cdot \tau_0}{\tau_{\text{о.с.}} \cdot \omega_0 \cdot \tau}.$$

Практическая реализация рассмотренных подходов к расчету параметров и схемотехническим решениям в аналоговой части индукционного датчика тока выразилась в создании датчиков тока нулевой последовательности, применение которых позволило реализовать систему селективного контроля состояния изоляции по малым токам утечки [11, 12].

### Заключение

1. Применение индукционных датчиков тока на основе катушки Роговского вместо традиционных трансформаторов тока является устойчивой тенденцией развития релейной защиты и автоматики.

2. При расчете параметров индукционного датчика или при сравнительной оценке таких датчиков достаточно использовать постоянную времени катушки, постоянную времени интегратора и коэффициент передачи по постоянному току интегратора.

3. Чувствительность датчика, его полоса пропускания и вносимый фазовый сдвиг являются взаимосвязанными параметрами и для практического применения были рассмотрены два случая соотношений между постоянными времени катушки и интегратора  $\tau_{\text{ист.}} \ll \tau_{\text{о.с.}}$  и  $\tau_{\text{ист.}} = \tau_{\text{о.с.}}$  и получены простые расчетные формулы.

4. В случае согласования на частоте  $\omega = \omega_0$  имеются следующие соотношения между параметрами:  $\tau_{\text{ист.}} = \tau_{\text{о.с.}}$ ,  $Z_0 = \sqrt{L/C}$ ,  $Z_0 = \sqrt{R \cdot r}$ . Показано, что при выполнении указанных условий чувствительность датчика имеет наибольшее значение.

5. Практическое применение индукционного датчика тока на основе катушки Роговского позволяет реализовать чувствительную систему мониторинга состояния изоляции по токам утечки.

### Summary

*This paper presents a simple and practical technique of Rogowski transducers for measuring small currents at low frequencies. The parameters of the Rogowski coil with the affiliate integrator is established to deduce the transfer functions. Main features of a design - such as the time constant of source and time constant of feedback - are described. Relationships between the sensitivity, the bandwidth of the transducers are investigated. Results of Micro-Cap program design are disclosed. In addition, for obtaining the maximum voltage output the effect of matching were considered. Results show that the sensitivity and bandwidth of transducer simply optimized by usage proposed parameters.*

**Keywords:** low power current transducers, Rogowski coil, transfer functions, sensitivity.

### Литература

1. Шваб А. Измерения на высоком напряжении: измерительные приборы и способы измерения. М.: Энергоатомиздат, 1983. 264 с.
2. Kojovic L.A., "Comparative Performance Characteristics of Current Transformers and Rogowski Coils used for Protective Relaying Purposes," IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 1-6, June 2007.
3. Sinapius I.G., Hoornaert W. and Middelhoek S., Measuring Current, Voltage and Power, Handbook of Sensors and Actuators, Vol. 7, Elsevier, 1999.
4. Tumanski S., "Induction Coil Sensors - a Review," Measurement Science & Technology, Vol. 18, No. 3, pp. R31-R46, March 2007.
5. Application Notes. Power Electronic Measurements Ltd. Sept. 2002. URL: <http://www.pemuk.com> (дата обращения: 26.01.2015).
6. Соловьев Д.Б. Кувшинов Г.Е. Моделирование в программе MICRO-CAP дифференциальной защиты шин с катушками Роговского// Электро. 2012. № 4. С.28-34.
7. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем. М.: Мир, 1982. 512 с.
8. D.A. Ward, J. La T. Exon. Using Rogowski coils for transient current measurements. Engineering science and education journal. June 1993, p.105-113.
9. M. Rezaee and H. Heydari. Design Modification of Rogowski Coil for Current Measurement in Low Frequency. Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering, Vol. 6, No. 4, Dec. 2010 p. 232-237.
10. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. 488 с.

12. Глухов О.А., Глухов Д.О., Фоминич Э.Н. и другие. Анализ эффективности централизованной системы селективного контроля состояния изоляции 6 – 10кВ в сетях с изолированной нейтралью // Технологии ЭМС. 2009. №4. С. 26-31.

13. Глухов О.А., Глухов Д.О. Повышение достоверности обнаружения повреждений изоляции с большими переходными сопротивлениями в высоковольтных сетях с изолированной нейтралью // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2010. №12. С. 56-83.

*Поступила в редакцию*

*27 января 2015 г.*

**Глухов Олег Африканович** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности» (БЖД) Поволжского государственного технологического университета (ПГТУ), г. Йошкар-Ола. Тел: 8(905)3792200. E-mail: glukhov1003@gmail.com.

**Глухов Дмитрий Олегович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Проектирование и производство электронно-вычислительных систем» (ПиПЭВС) Поволжского государственного технологического университета (ПГТУ), г. Йошкар-Ола. Тел: 89177074889. E-mail: glukhovdmitry@yandex.com.