

УДК 621.9.01

## Импульсная магнитная установка для упрочнения режущих инструментов

В.А. Полетаев, д-р техн. наук, М.Г. Марков, Е.В. Красильникьянц, кандидаты техн. наук, А.С. Орлов, инж.

Приводится схема импульсной магнитной установки для упрочнения деталей и режущих инструментов. Рассматривается принцип работы ее основных узлов и даются основные технические характеристики.

*Ключевые слова:* импульсная магнитная обработка, стойкость, режущий инструмент, силовая часть, блок управления, соленоид

### Pulse magnetic unit for cutting tools hardening

A.S. ORLOV, engineer; V.A. POLETAEV, Doctor of Science; M.G. MARKOV, E. V. KRASILNIKYANC, Ph.D.

The scheme of pulse magnetic unit for cutting tools and component parts hardening is given. Operation principle of basic components of pulse magnetic unit is described as well as its basic technical specifications.

Key words: pulse magnetic process, durability, cutting tools, power module, control unit, magnet coil.

Применяемые на практике методы магнитной обработки материалов различны как по своим физическим и технологическим принципам, так и по конструктивным исполнениям установок.

Магнитную и магнитно-импульсную обработку применяют для упрочнения различных деталей, конструкций и сборочных единиц, например: заклепочных, сварных, резьбовых соединений; зубчатых и червячных колес; опорных устройств и муфт; рессор и пружин; стальных канатов и тросов грузоподъемных машин; режущего инструмента, пильчатой гарнитуры чесальных машин, медицинских инструментов и т.д. [1–5].

Режущий инструмент обрабатывают как постоянным магнитным полем, так и магнитно-импульсным полем напряженностью 100–2000 кА/м при длительности импульса 0,1–4,5 с. Время и величина напряженности магнитного поля зависят от материала инструмента и его размеров. При этом стойкость инструмента, обработанного в магнитном поле, повышается в 2–4 раза.

Разработано несколько типов различных установок и устройств для магнитного упрочнения инструмента и деталей машин. Установки для импульсной магнитной обработки создают магнитное поле напряженностью 50–2000 кА/м (максимальная сила тока в соленоидах 50–2000 А) при мощности, рассчитанной для нормальной работы, до 200 кВт. Для расположения установок в цехах или на полигонах необходима площадь не более 5–10 м<sup>2</sup>.

Для упрочнения режущих инструментов была разработана и изготовлена импульсная магнитная установка, функциональная схема которой представлена на рис. 1.

Установка состоит из 5 основных узлов:

1. *Силовая часть.* Выполняет функцию формирования магнитного импульса. Включает в себя как силовые элементы на тиристорах, так и магнитный индуктор с термодатчиком. Блок запитывается от сети переменного тока напряжением ~ 380 В. Формирование импульса происходит за счет использования силового тиристора и силового выпрямителя на трех фазах А, В, С. Блок имеет защиты от высокочастотных помех (ВЧ-помех).

2. *Задний блок управления.* Выполняет функцию преобразования переменного напряжения в постоянное за счет диодных мостов внутри этого блока. Напряжение на блок управления подается через силовой автомат, рассчитанный на силу тока 160 А. Поданное переменное напряжение ~220 В на элементы преобразуется в напряжение ~22 В за счет трансформатора блока, затем напряжение выпрямляется за счет трех последовательно включенных выпрямителей. Последовательное подключение выпрямителей позволяет при неисправности одной или двух фаз продолжать работу блока и установки в целом. На выходе получаемое напряжение +/- 80 В понижается до уровня необходимого для правильной работы микросхемы PIC12F629. Данная микросхема имеет непосредственный вход/выход на программатор за счет разъема ICSP. Микросхема отвечает за согласования сигналов с переднего и дверного блоков, отвечающих за работу силовых тиристоров. Для работы переднего блока постоянное напряжение 13 В преобразуется в переменное напряжение ~25 В за счет электронного инвертора. Для соединения с передним блоком используется разъем DB-9.

3. *Передний блок управления.* Согласовывает управляющий сигнал заднего блока управления и дверного блока управления. Подает сигнал управления на драйвер тиристоров для поджига тиристоров. Для соединения с задним блоком используется разъем DB-9. Блок содержит электронный ключ, который отвечает за прохождение сигнала для поджига тиристоров. Если ключ замкнут, на тиристоры поступает сигнал, если разомкнут – сигнал отсутствует. Для управления ключом инвертора используется постоянное напряжение, полученное за счет выпрямителей, установленных рядом с разъемом DB-9, которое поступает на первый управляющий элемент. Сигнал с дверного блока поступает на второй управляющий элемент. Эти два сигнала управляют ключом инвертора. Постоянное напряжение с инвертора преобразуется за счет диодного моста-инвертора, проходит через трансформатор и поступает на управление драйвером силовых тиристоров.

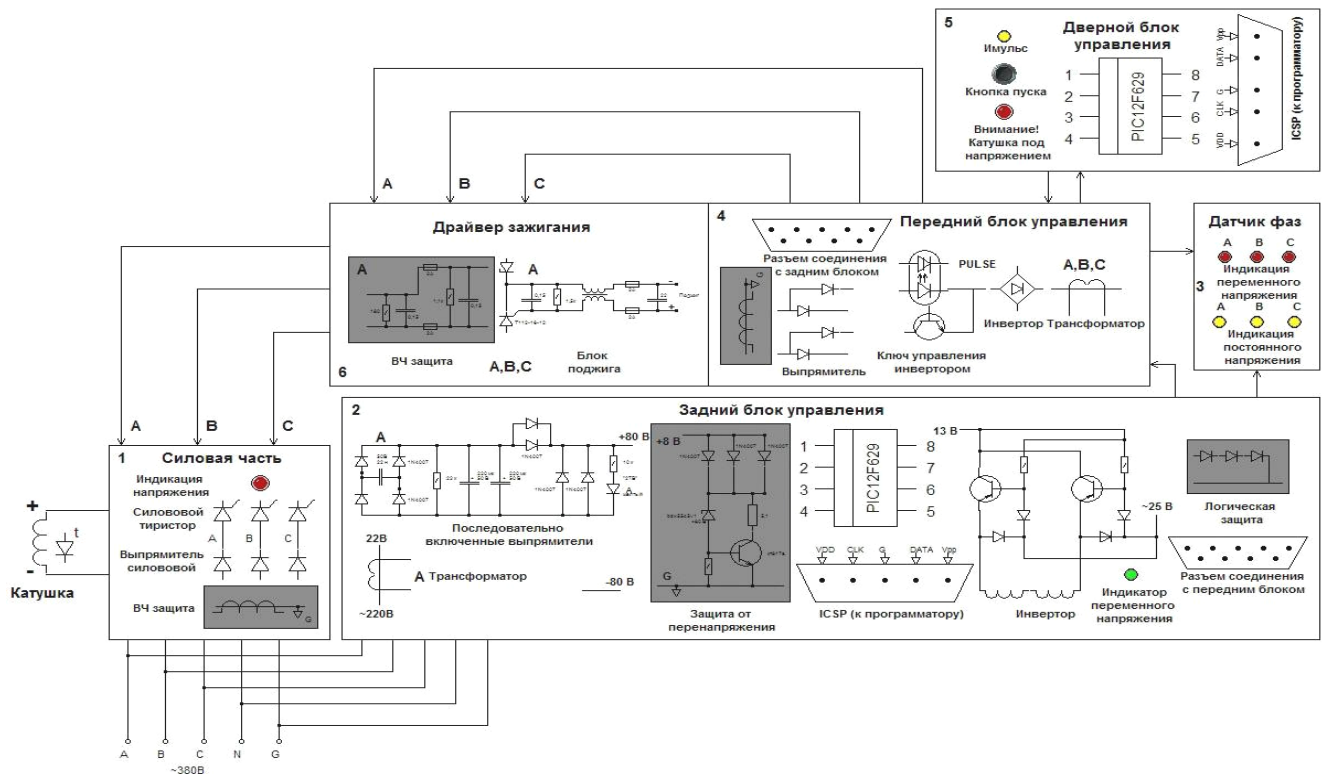


Рис. 1. Функциональная схема импульсной магнитной установки

4. **Датчик фазы.** Предназначен для индикации нагрузки на фазах А, В, С за счет световых диодов. Блок позволяет определить причину неисправности того или иного блока. Дверной блок управления использует микросхему PIC12F629, которая позволяет менять следующие параметры: а) длительность импульсов ( $t$ ); б) количество импульсов в пакете ( $N$ ).

5. **Драйвер зажигания.** Согласует работу заднего и переднего блоков для управления тиристорами. Содержит блок ВЧ-защиты и блок поджига.

На рис. 2 приведено сечение обмотки в плоскости, в которой лежит ось симметрии.

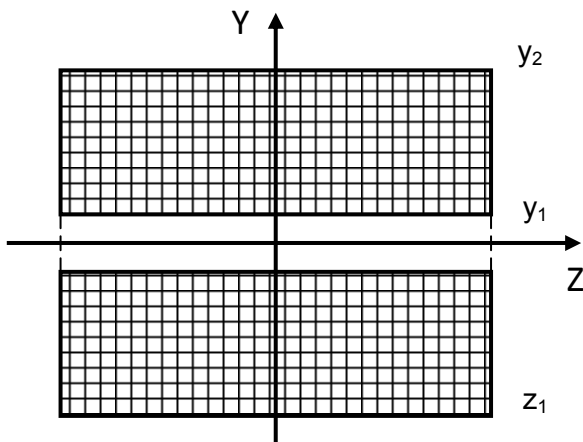


Рис. 2. Сечение обмотки соленоида вдоль оси Z

При постоянной плотности тока по сечению напряженность магнитного поля в центре соленоида определяется по формуле

$$H_0 = \frac{2\pi \cdot j\lambda}{10} \int_{y_1}^{y_2} \int_{z_1}^{z_2} \frac{y^2 dz dy}{(z^2 + y^2)^{3/2}} = \frac{4\pi \cdot j\lambda}{10} x_1 \ln \frac{y_2 + (z_1^2 + y_2^2)^{1/2}}{y_1 + (z_1^2 + y_1^2)^{1/2}}, \quad (1)$$

где  $y_1$  и  $y_2$  – внутренний и внешний радиусы соленоида соответственно;  $2z_1$  – длина соленоида;  $j$  – плотность тока.

Приняв за единицу длины внутренний радиус соленоида  $y_1$ , введем обозначения:

$$y_2 = \alpha \cdot y_1, \quad (2)$$

$$z_1 = \beta \cdot y_1, \quad (3)$$

где  $\beta$  – коэффициент длины соленоида;  $\alpha$  – коэффициент длины радиуса соленоида.

Тогда подставляя (2) и (3) в (1), получим

$$H_0 = \frac{4\pi \cdot j\lambda y_1 \beta}{10} \ln \frac{\alpha + (\beta^2 + \alpha^2)^{1/2}}{1 + (\beta^2 + 1)^{1/2}}. \quad (4)$$

Мощность, выделяющаяся в цилиндрической катушке при условии  $j = \text{const}$ , равна

$$W = 2\pi r \cdot j^2 \lambda (y_2^2 - y_1^2) x_1, \quad (5)$$

$$W = 2\pi r \cdot j^2 \lambda y_1^3 (\alpha^2 - 1) \beta. \quad (6)$$

Исключая  $j$  из выражения (4), получаем

$$H_0 = \frac{(2\pi)^{1/2}}{5} \left( \frac{\beta}{\alpha^2 - 1} \right)^{1/2} \ln \frac{\alpha + (\beta^2 + \alpha^2)^{1/2}}{1 + (\beta^2 + 1)^{1/2}} \left( \frac{W\lambda}{\rho y_1} \right)^{1/2}. \quad (7)$$

Обозначая

$$G = \frac{(2\pi)^{1/2}}{5} \left( \frac{\beta}{\alpha^2 - 1} \right)^{1/2} \ln \frac{\alpha + (\beta^2 + \alpha^2)^{1/2}}{1 + (\beta^2 + 1)^{1/2}}, \quad (8)$$

получаем

$$H_0 = G \left( \frac{W \cdot \lambda}{\rho \cdot y_1} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

где  $H_0$  – напряженность магнитного поля в центре соленоида;  $W$  – затрачиваемая мощность;  $\lambda$  – коэффициент заполнения обмотки соленоида;  $\rho$  – удельное сопротивление;  $y_1$  – внутренний радиус обмотки соленоида.

Согласно (9), коэффициент  $G$  зависит от формы соленоида, т. е. от соотношения радиусов и длины соленоида.

Для разработки идеального индуктора принимается соотношение габаритных размеров 2/3. Исходя из размеров инструмента  $l \times d = 130 \times 4,5$  мм; длины режущей части сверла  $l_{рез} = 70$  мм, длина индуктора (вдоль оси  $Z$ ) принимается  $l_{инд1} = 150$  мм, диаметр индуктора (вдоль оси  $Y$ )  $b_{инд1} = 100$  мм, диаметр рабочей полости  $d_{раб} = 10$  мм.

Для подтверждения влияния  $\alpha$  и  $\beta$  на напряженность магнитного поля  $H_0$  для индуктора ( $L/h = 7/3$ ) принимаются следующие габаритные размеры ( $G = 0,14$ ;  $\alpha = 7$ ;  $\beta = 3$ ):  $l_{инд2} = 150$  мм,  $b_{инд2} = 350$  мм. Диаметр рабочей полости остается неизменным:  $d_{раб} = 10$  мм.

Для расчета напряженности поля в магнитном индукторе принимаются следующие исходные данные:

- длина соленоида  $L = 0,15$  м;
- внутренний радиус обмотки  $r = 5 \cdot 10^{-3}$  м;
- число витков  $W = 2300$  витков;
- удельное сопротивление меди  $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м<sup>3</sup>;
- диаметр обмоточного провода  $d = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м;
- напряжение питания (напряжение в обмотке)  $U = 500$  В.

Число слоев намотки  $k$  определяется по формуле

$$k = \frac{d \cdot W}{L}, \quad (10)$$

$$k = \frac{1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2300}{0,15} = 23 \text{ слоя.}$$

С учетом неплотности намотки число слоев  $k_1$  составит

$$k_1 = k \cdot k_n, \quad (11)$$

где  $k_n = 1,3$  – коэффициент неплотности намотки;  $k_1 = 23 \cdot 1,3 = 29,9$  принимается 30 витков.

Внутренний диаметр обмотки равен

$$D_{вн} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Наружный диаметр обмотки, мм, определяется по формуле

$$D_{нар} = D_{вн} + 2 \cdot d \cdot k_1, \quad (12)$$

$$D_{нар} = 10 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 30 = 100 \text{ мм.}$$

Условие  $2/3 = 100/150$  мм выполнено.

Сопротивление обмотки соленоида, Ом, рассчитывается по формуле

$$R = \frac{2\pi\rho \left( r + \frac{d \cdot k_1}{2} \right) W}{\pi \frac{d^2}{4}}, \quad (13)$$

$$R = \frac{2\pi \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \left( 5 \cdot 10^{-3} + \frac{1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 30}{2} \right) 2300}{\pi \frac{(1,5 \cdot 10^{-3})^2}{4}} = 3,823 \text{ Ом.}$$

Тогда сила тока в обмотке  $I$ , А, составит

$$I = \frac{U}{R}, \quad (14)$$

$$I = \frac{500}{3,823} = 130,78 \text{ А.}$$

Длина сечения соленоида –  $L = 0,15$  м, ширина –  $b = 0,10$  м. Условно разделим длину на  $m = 50$ , а ширину на  $n = 20$  отрезков. Получается, что сечение обмотки разбито на  $10^3$  прямоугольников. Поместим в центр каждого прямоугольника условный виток с током  $I_0$ . Такая условность не меняет ампер-витки и поле катушки. Напряженность поля в точке, отстоящей от центра катушки на расстояние  $z$ , вычисляется путем суммирования поля условных витков:

$$H_z(z) = I_0 \times \sum_{i=1}^{m-1} \left[ \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\left[ r + \frac{h}{n}(j+0,5) \right]^2}{2 \left[ \left[ r + \frac{h}{n}(j+0,5) \right]^2 + \left[ z - \left[ (i+0,5) \frac{L}{m} - \frac{L}{2} \right] \right]^2 \right]^{3/2}} \right]. \quad (15)$$

В середине сечения напряженность поля составит  $H_{z1}(0) = 1867$  кА/м.

В крайних точках сечения напряженность поля составит  $H_{z1}(L/2) = 983$  кА/м.

Расчет соленоида с другим числом витков производится аналогично.

Получены основные характеристики:

$$H_{z2}(0) = 412 \text{ кА/м; } H_{z2}(L/2) = 261 \text{ кА/м.}$$

На рис. 3 представлен график функции напряженности поля в точке, отстоящей от центра катушки на расстояние  $z$ , для оптимального –  $L/h = 3/2$  и неоптимального –  $L/h = 7/3$  соленоидов.

Анализ графиков (рис. 3) показал следующее: максимальная напряженность поля наблюдается в центральной трети соленоида; напряженность поля в индукторе изменяется в зависимости от числа витков.

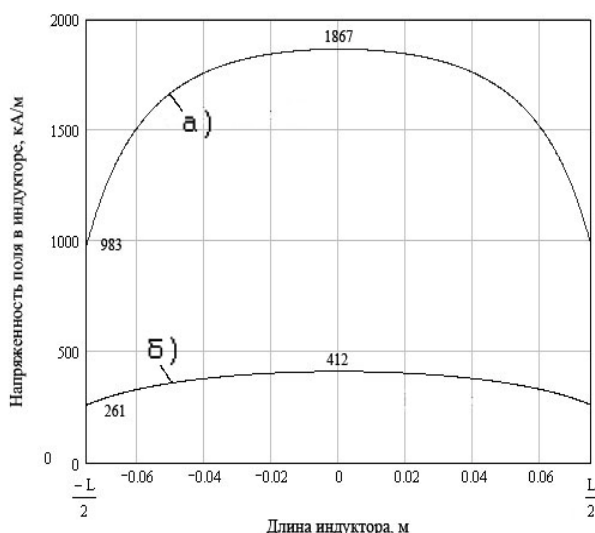


Рис. 3. График функции напряженности поля в точке, отстоящей от центра катушки на расстояние  $\pm L/2$ : а – для соленоида с оптимальной геометрией  $L/h = 3/2$ ; б – для соленоида с неоптимальной геометрией  $L/h = 7/3$

Соленоид имеет значительную индуктивность, и ток в нем не может меняться мгновенно. После включения ток нарастает по экспоненте с постоянной времени около 45 мс. После открывающего сигнала ток соленоида замыкается через дополнительный диод VDo и убывает по экспоненциальному закону с такой же постоянной времени. Если питающая сеть маломощная, то постоянная времени нарастания тока может отличаться от постоянной времени спада.

Расчетный график изменения тока во времени показан на рис. 4.

Обработка импульсным магнитным полем может осуществляться как с использованием воздушного пространства внутри соленоида, так и с применением ферромагнетика.

Основные технические характеристики установки:

1. Габаритные размеры главного блока:
  - ширина 400 мм;
  - высота 300 мм;
  - глубина 350 мм.
2. Габаритные размеры индукторной катушки:
  - ширина 150 мм;
  - высота 300 мм;
  - глубина 150 мм.
3. Общая масса установки в сборе – не более 21 кг.
4. Производительность установки при средних режимах обработки – 5–6 инструментов в час.
5. Напряженность магнитного поля на оси соленоида – не менее 1000 кА.
6. Диаметр рабочего канала соленоида – не менее 30 мм.
7. Длина рабочего канала соленоида – не менее 140 мм.
8. Источник питания – трехфазная сеть напряжением 380 В.
9. Потребляемая мощность в дежурном режиме – не более 0,05 кВт.
10. Средняя потребляемая мощность в режиме обработки – не более 1,0 кВт.
11. Импульсная потребляемая мощность – не более 80 кВт.
12. Амплитуда потребляемого тока – не более 150 А.
13. Действующее значение импульсного потребляемого тока – не более 125 А.
14. Номинальная длительность импульса тока – 1 с.
15. Номинальное напряжение на зажимах соленоида – 500 В.
16. Номинальный ток соленоида – 50 А.
17. Номинальная импульсная мощность, рассеиваемая в соленоиде, – 75 кВт.
18. Продолжительность включения (ПВ) – не более 1 %.

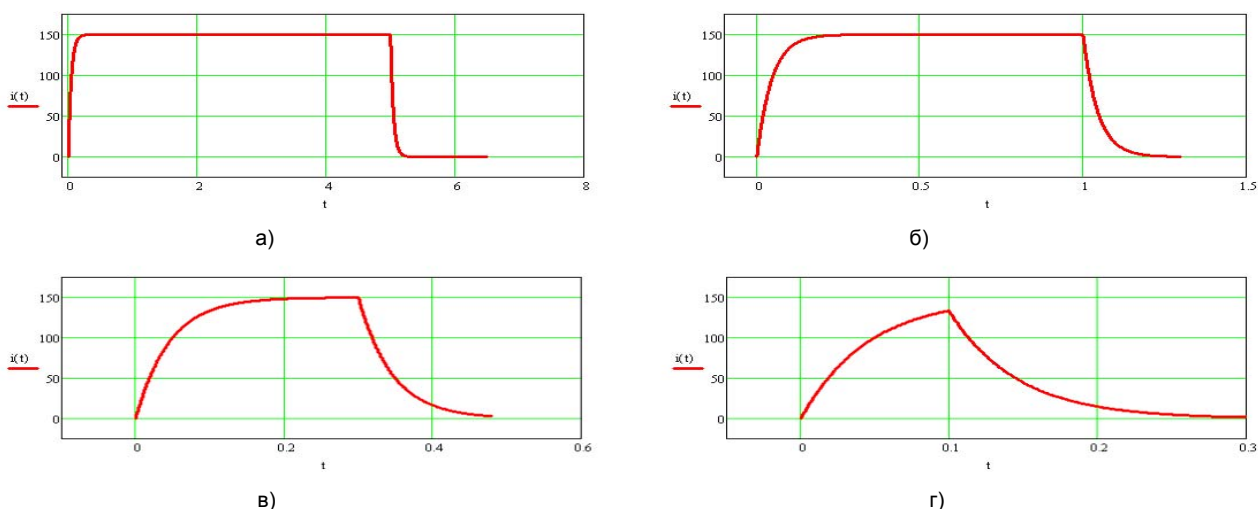


Рис. 4. Расчетные графики импульсов тока в соленоиде: а – при  $t = 5$  с; б – при  $t = 1$  с; в – при  $t = 0,3$  с; г – при  $t = 0,1$  с

### Список литературы

1. **Малыгин Б.В.** Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. – М.: Машиностроение, 1989. – 112 с.
2. **Полетаев В.А., Басыров И.З., Орлов А.С.** Применение ферромагнитной жидкости при упрочнении деталей машин импульсной магнитной обработкой // Вестник машиностроения. – № 3. – 2002. – С. 40–43.
3. **Полетаев В.А., Третьякова Н.В.** Магнитно-импульсная обработка пыльчатой гарнитуры чесальных машин // Текстильная промышленность. – 1995. – № 3. – С. 20–21.
4. **Полетаев В.А., Шабалин А.Н.** Исследование на износостойкость зубчатых колес, упрочненных импульсной магнитной обработкой // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 3. – С. 26–27.
5. **Полетаев В.А., Зайцев А.А.** Повышение долговечности медицинских метчиков методом импульсной магнитной обработки // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 3. – С. 29–30.

*Орлов Александр Станиславович,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
инженер кафедры технологии автоматизированного машиностроения,  
телефон (4932) 26-97-73,  
e-mail: aso15@list.ru

*Полетаев Владимир Алексеевич,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технологии автоматизированного машиностроения,  
телефон (4932) 26-97-72,  
e-mail: poletaev@tam.ispu.ru

*Марков Михаил Геннадьевич,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии,  
телефон (4932) 26-93-03,  
e-mail: mark114@jndex.ru

*Красильникьянц Евгений Валерьевич,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры электроники и микропроцессорных систем,  
телефон (4932) 26-97-52,  
e-mail: krev@eims.ispu.ru