

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 681.586.782, 621.317.441

DOI: 10.30987/1999-8775-2019-2019-12-82-93

Д.Н. Бутусов, Т.И. Каримов, О.С. Дружина, А.И. Каримов

**РАЗРАБОТКА ИНДУКТИВНОГО ДАТЧИКА
НА ОСНОВЕ ХАОТИЧЕСКОГО ОСЦИЛЛЯТОРА**

Исследовано применение хаотической цепи с чувствительным индуктивным элементом в качестве индуктивного датчика приближения. Предложена методика построения хаотических цепей с индуктивностью по заданным дифференциальным уравнениям, описывающим хаотическую динамическую систему. Проведено сравнение различных методов анализа хаотических колебаний для извлечения информации из полученного сигнала. Предложен подход, позволяющий определять расстояние до металлической цели по сигналам хаотиче-

ского осциллятора, а также принципы синтеза топологии и расчета номиналов компонентов чувствительной хаотической цепи. Применимость предложенной методики подтверждена компьютерным моделированием и натурным экспериментом.

Ключевые слова: хаос, индуктивный датчик, хаотическая цепь, сенсор, хаотический осциллятор, анализ нелинейных сигналов, металлодетектор.

D.N. Butusov, T.I. Karimov, O.S. Druzhina, A.I. Karimov

**DEVELOPMENT OF INDUCTIVE SENSOR BASED
ON RANDOM OSCILLATOR**

The purpose of the work consists in the investigation of the possibility to use a random oscillator with the inductive coil as an inductive sensor. The work problems: methods development for the synthesis of a random oscillator with the inductive coil; development and investigation of methods for the analysis of oscillations in a random circuit at target bringing to a sensitive coil; an experimental confirmation of the results obtained theoretically. The investigation methods used in the work: a simulation, a computer experiment, a nature experiment. The investigation results: a confirmation of the hypothesis, lying in the basis of the investigation, on the applicability of random oscillators in sensor applications; a procedure for the synthesis of random oscillators with the inductive coil based on a specified random system of differential equations; data on the applicability of different kinds of the analysis of oscillations for the emphasis of information on the parameter measured, methods for these data processing.

The novelty of this paper consists in that this is the first Russian language work on random sensors – a new promising direction of investigations in the field on non-linear dynamics. In this work for the first time there is used a random oscillator for the prototype formation of an approximation industrial sensor with a cup core.

Conclusions:

1. On the basis of a random oscillator specified with a differential equation there may be synthesized a sensitive electric analogue circuit.

2. Using a simple geometrical analysis of an attractor it is possible to define a value of the parameter (inductivity) under measurement with high accuracy and to transform this value into data on a distance to an aim.

Key words: chaos, inductive sensor, random circuit, sensor, random oscillator, non-linear signal analysis, metal detector.

Введение

Идея об использовании динамического хаоса в сенсорных системах впервые была предложена Брауном, Чуа и Поппом в середине 1990-х годов [1]. Предполагаемый принцип работы таких датчиков основан на том, что малые изменения параметров хаотического осциллятора могут вызвать значительные изменения в его поведении, в отличие от линейного осциллятора, в случае которого небольшие изменения параметров вызывают лишь пропор-

ционально небольшие изменения в его динамике. Теодореску в работе [2] дает обоснование высокой чувствительности и селективности, которые могут быть достигнуты хаотическими осцилляторами. В той же работе представлены аппаратные реализации хаотических датчиков, являющихся упрощенными моделями биологических сенсорных систем. Еще одним примером практической реализации хаотического датчика является металлодетектор Ху и

Лю [3]. Устройство разработано на основе осциллятора Дуффинга. Также в устройстве применяется гармонический осциллятор, подключенный к детекторной головке, состоящей из одной излучающей катушки и двух приемных. При прохождении металлических частиц через магнитное поле вблизи головки на выходе дифференциального усилителя, сравнивающего сигналы с приемных катушек, возникает синусоидальный сигнал. Выход дифференциального усилителя подключен ко входу системы Дуффинга, которой достаточно даже слабого гармонического сигнала, чтобы перейти из хаотического режима в режим периодических колебаний. Определяя режим колебаний (хаотический или периодический), можно однозначно детектировать присутствие металлических частиц. Режимы колебаний системы различаются путем вычисления ляпуновских экспонент. Корнета и соавторы [4] предлагают активируемый шумом датчик постоянного (или низкочастотного) сигнала на основе цепи Чуа, аттрактор которой имеет два бассейна притяжения. Для детектирования искомого сигнала используется явление стохастического резонанса, т.е. подмешивание к распознаваемому постоянному напряжению шума. Чем выше уровень постоянного сигнала, тем большее количество времени траектории системы находятся в одном из бассейнов притяжения аттрактора. Отношение периодов нахождения системы в каком-либо состоянии к общему времени измерения прямо пропорционально значению измеряемого сигнала. Еще одно известное из литературы применение чувствительных хаотических систем – измерение уровня солености воды [5]. Концентрация примесей в исследуемом растворе влияет на значение сопротивления измерительной ячейки сенсора, которая является частью хаотической цепи. При различных значениях солености

раствора на экране осциллографа можно наблюдать различные аттракторы. Методы анализа формы получаемого на выходе аттрактора для определения значения измеряемой величины оставлены автором как предмет дальнейших исследований. Также хаотические системы могут применяться для излучения широкополосных сигналов в задачах гидроакустики, что, как показано в [6], позволяет увеличить дальность действия сонаров и бороться с проблемой перекрестных помех.

Все перечисленные работы свидетельствуют о потенциале хаотических систем для построения на их основе сенсоров. Высокая чувствительность и возможность одновременного измерения нескольких величин (мультичувствительность) – возможные преимущества хаотических датчиков. Однако многие характерные особенности поведения хаотических систем, например быстрый переход между режимами колебаний, требуют дополнительного исследования в контексте практических приложений. Необходима разработка методов синтеза новых хаотических цепей под конкретное приложение. Еще одной существенной проблемой является обработка хаотических сигналов и интерпретация колебаний, то есть выделение из них информации об измеряемой величине.

В данной статье представлена методика, позволяющая синтезировать электрическую цепь с индуктивным элементом на основе заданного хаотического обыкновенного дифференциального уравнения (ОДУ). Рассмотрены такие методы анализа колебаний, как рекуррентный анализ, построение бифуркационных диаграмм и анализ геометрических параметров аттрактора, и сделан вывод о применимости этих методов для анализа показаний индуктивного сенсора.

Хаотическая цепь с катушкой индуктивности

Расширение колебательного LC-контура. Рассмотрим уравнения гармонического осциллятора, которыми описывается идеальный LC-контур:

$$\begin{cases} L \frac{\partial I}{\partial t} = -V \\ C \frac{\partial V}{\partial t} = I \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x} = -\frac{1}{L} y \\ \dot{y} = \frac{1}{C} x \end{cases}, \quad (1)$$

где L – индуктивность катушки; C – емкость; y – напряжение в LC-контуре; x – ток, протекающий через катушку.

Добавив в цепь нелинейную обратную связь с интегрирующими свойствами и тем самым увеличив число степеней свободы в системе до 3, можно наблюдать хаотическое поведение цепи. Обобщенная схема хаотической цепи на LC-контуре представлена на рис. 1.

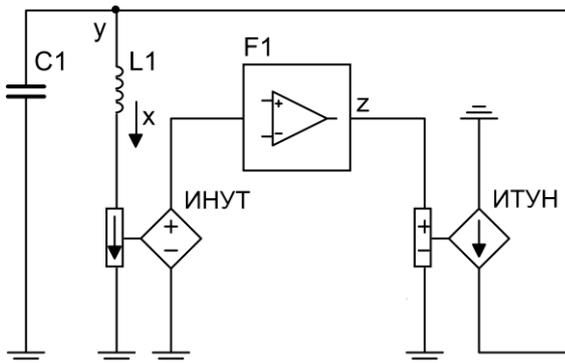


Рис. 1. Схема хаотического генератора на основе LC-контур: ИНУТ – источник напряжения, управляемый током; ИТУН – источник тока, управляемый напряжением; F1 – нелинейный активный фильтр

Идея настоящего исследования заключается в подборе таких систем хаотических ОДУ, уравнения в которых были бы сопоставимы с уравнениями (1). Рассмотрим в качестве примера систему Спротта *Case D* [7]:

$$\begin{cases} \dot{x} = -y \\ \dot{y} = x + z \\ \dot{z} = xz + 3y^2 \end{cases} \quad (2)$$

Если поставить в соответствие переменной состояния ток через катушку L , а переменной y – напряжение на конденсаторе C_1 , образуя вместе с индуктивностью L колебательный контур, то возникает необходимость использования в схеме источника тока, управляемого напряжением (ИТУН), для ввода тока x в уравнение переменной состояния y . Третья строка системы соответствует нелинейному фильтру $F1$ (рис. 1). С учетом вышесказанного система уравнений (2) преобразуется в следующую систему уравнений электрической цепи:

$$\begin{cases} \dot{x} = -\frac{1}{L}\gamma \\ \dot{y} = \frac{1}{C_1}(x + \mu\zeta) \\ \dot{z} = \frac{1}{C_2}\left(\frac{\chi\zeta}{10R_1} + \frac{\gamma^2}{10R_2}\right) \end{cases} \quad (3)$$

где $\mu\zeta$ – ток, пропорциональный напряжению z . Деление на 10 появляется в выражении $\chi\zeta/10R_1$ как внутренняя масштабированная константа аналогового умножителя AD633, используемого в схемной реализации сенсора (см. далее).

Синтез хаотической цепи, основанной на ОДУ. Для расчета номиналов элементов в уравнении (3) применим следующие правила:

Правило 1. Чтобы уменьшить амплитуду переменной q состояния в K раз, необходимо поделить всю строку, содержащую q в левой части, на K и умножить все члены с q на K (включая эту строку).

Правило 2. Если умножить все правые части одновременно на ω , это приведет к ускорению колебательных процессов в ω раз.

Введем коэффициенты масштабирования переменных состояния $\chi = a_x x$, $\gamma = a_y y$, $\zeta = a_z z$ и коэффициент ускорения процессов в цепи ω . С их учетом система Спротта *Case D* может быть записана следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{x} = -\omega a_x^{-1} a_y y \\ \dot{y} = \omega a_y^{-1} (a_x x + a_z z) \\ \dot{z} = \omega a_z^{-1} (a_x a_z x z + 3 a_y^2 y^2) \end{cases} \quad (4)$$

Сравнивая (3) и (4), нетрудно вывести пять уравнений расчета номиналов схемных элементов:

$$\begin{cases} \frac{1}{L} = \frac{-\omega a_y}{a_x} \\ \frac{1}{C_1} = \frac{\omega a_x}{a_y} \\ \frac{\mu}{C_1} = \frac{\omega a_z}{a_y} \\ \frac{1}{10 C_2 R_1} = \omega a_x \\ \frac{1}{10 C_2 R_2} = \frac{3 \omega a_y^2}{a_z} \end{cases}$$

Для полученной выше модели цепи были подобраны следующие параметры: $L = 40$ мГн, $C_1 = 250$ нФ, $C_2 = 200$ пФ, $R_1 = 50$ Ом, $R_2 = 13$ кОм, $\mu = 0,005$.

Результирующая схема показана на рис. 2.

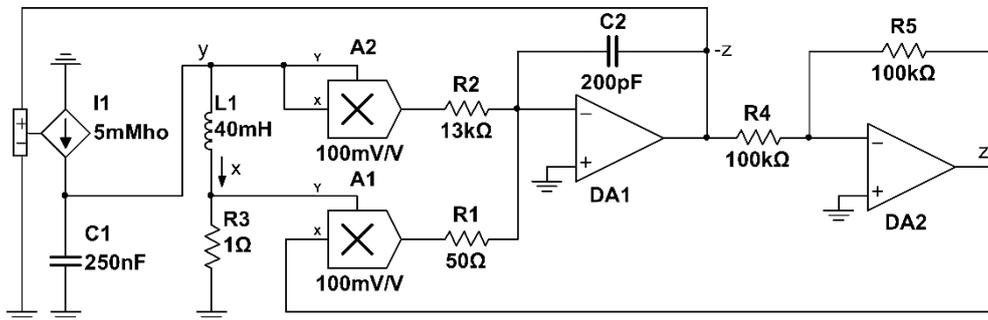


Рис. 2. Хаотическая цепь с индуктивным элементом на основе системы Спротта *Case D*

Цепь включает в себя: LC -контур (элементы L_1 , C_1) с измерительным резистором R_3 для преобразования тока через катушку в напряжение; нелинейный фильтр, состоящий из аналоговых умножителей и операционных усилителей, реализующих третье уравнение в системе (4); ИТУН, который может быть реализован на основе инструментального усилителя $AD8421ARZ$, имеющего вход для организации обратной связи по току [8]. Операция умножения производится с использованием аналоговых умножителей $AD633$. Резистор R_3 должен иметь низкое сопротивление, чтобы минимизировать влияние на динамику хаотической системы. В цепи желательно использовать прецизионные операционные усилители, такие как $OPA2388$ или $MAX44250$.

Схемное моделирование. Для исследования динамики происходящих в цепи процессов она была промоделирована в среде *NI Multisim 14*. Также было проведено численное моделирование системы в *MATLAB* с использованием полунявного решателя ОДУ, хорошо подходящего для

моделирования хаотических систем [9; 10]. Сопоставление аттракторов представлено на рис. 3. Можно заметить высокий уровень соответствия между двумя аттракторами, что говорит о корректности разработанной электрической схемы. Небольшая разница объясняется влиянием *SPICE*-моделей примененных радиодеталей и особенностями численного интегрирования: так, в *Multisim* используется многошаговый метод Гира 6-го порядка [11].

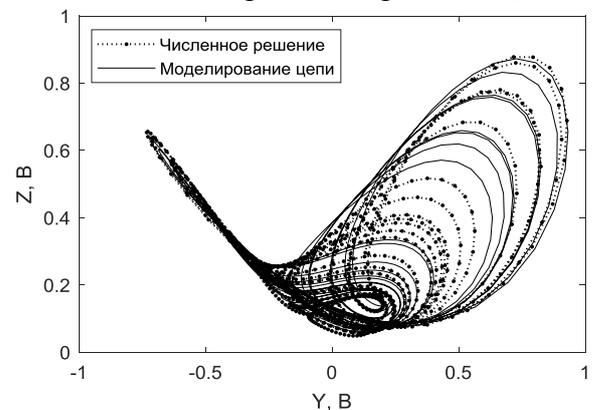


Рис. 3. Сравнение аттракторов схемной реализации и численного решения уравнения (3)

Методы анализа колебаний в цепи

Поскольку особенностью хаотических систем является невозможность долгосрочного предсказания конкретного значения переменных состояний даже при известных начальных условиях, носителем информации является вся траектория системы на некотором временном интервале, или, иначе, форма фазового портрета (ат-

трактора) системы. Рассматриваемыми в данной работе методами анализа нелинейных колебаний являются измерение геометрических параметров аттрактора [12], количественный рекуррентный анализ [13] и построение бифуркационных диаграмм [2; 14].

Геометрический анализ. Анализ геометрических параметров аттрактора производится путем расчета расстояния между крайними точками аттрактора относительно одной из координатных осей. Евклидово расстояние между точками $p=(p_1, \dots, p_n)$ и $q=(q_1, \dots, q_n)$ вычисляется по формуле

$$d(p, q) = \sqrt{\sum_{k=1}^n (p_k - q_k)^2}.$$

Исследование формы аттрактора позволяет выявить зависимость между его геометрическими параметрами и измеряемой индуктивностью L .

Рекуррентный анализ. Изначально целью построения рекуррентных графиков (recurrence plots, RP) [13] была визуализация повторяющихся состояний системы $\vec{x}(t)$ в m -мерном фазовом пространстве в рамках окна \mathcal{E} . Повторение состояния системы, существовавшего во времени i , в некоторое другое время j отмечается в квадратной двоичной матрице, в которой 1 (черная точка) соответствует повторению, а обе координатные оси являются осями времени. Состояние некоторых динамических систем (в том числе хаотических) не может повторяться полностью эквивалентно начальному состоянию, поэтому рекуррентными принято считать состояния \vec{x}_j , попадающие в m -мерную окрестность с радиусом \mathcal{E} и центром \vec{x}_i .

Рекуррентный график с математической точки зрения представляет собой матрицу вида

$$R_{i,j} = \theta(\varepsilon - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|), \quad \vec{x}_i \in \mathcal{R}^m, \quad i, j = 1..N,$$

где N – количество рассматриваемых состояний \vec{x}_i ; ε – размер окрестности точки \vec{x} в момент i ; $\|\cdot\|$ – расстояние; $\theta(\cdot)$ – функция Хэвисайда.

Получаемые мелкомасштабные структуры (рис. 4) используются для количественного анализа рекуррентных диаграмм (RQA). Анализируя распределение длин диагональных линий или вертикальных строк, можно ввести различные метрики для оценки рекуррентной матрицы. В текущем исследовании использовались такие метрики, как рекуррентность (recurrence rate, RR), мера детерминизма (determinism, DET), мера энтропии

(entropy, ENTR), ламинарность (laminarity, LAM) и время захвата (trapping time, TT).

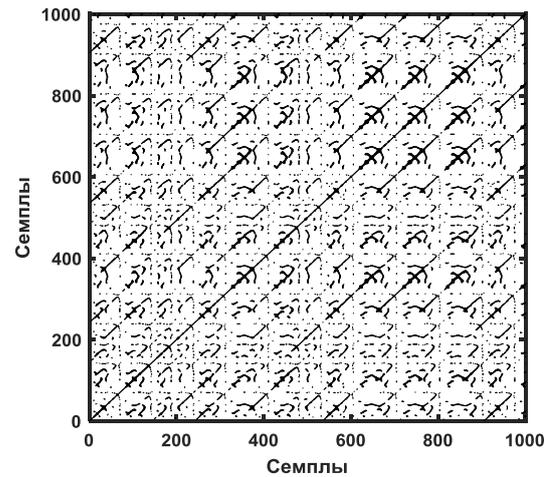


Рис. 4. Рекуррентный график системы Спротта Case D

Бифуркационные диаграммы. Бифуркационные диаграммы (БД) нелинейных систем отображают диапазон возможных динамических режимов в некотором интервале значений параметра нелинейности. Моменты смены динамических режимов называются точками бифуркации системы. Один из возможных путей построения БД заключается в отображении на графике всех локальных экстремумов аттрактора по одной оси в зависимости от значения бифуркационного параметра (рис. 5а). Смена режима колебаний может сопровождаться как плавной деформацией аттрактора, так и резким переходом между хаотическими и периодическими колебаниями (рис. 5б). В качестве бифуркационного параметра может выступать любой параметр хаотической цепи, в том числе индуктивность.

Согласно идее Хе и соавторов [14], можно установить зависимость между числом периодических орбит на бифуркационной диаграмме и значением параметра бифуркации (индуктивности и, соответственно, расстояния при обнаружении металлических объектов), а далее по найденному паттерну колебаний на бифуркационной диаграмме определять значение параметра бифуркации. Также можно сконструировать сенсор, в котором при некотором настраиваемом значении параметра меняется режим колебаний [8].

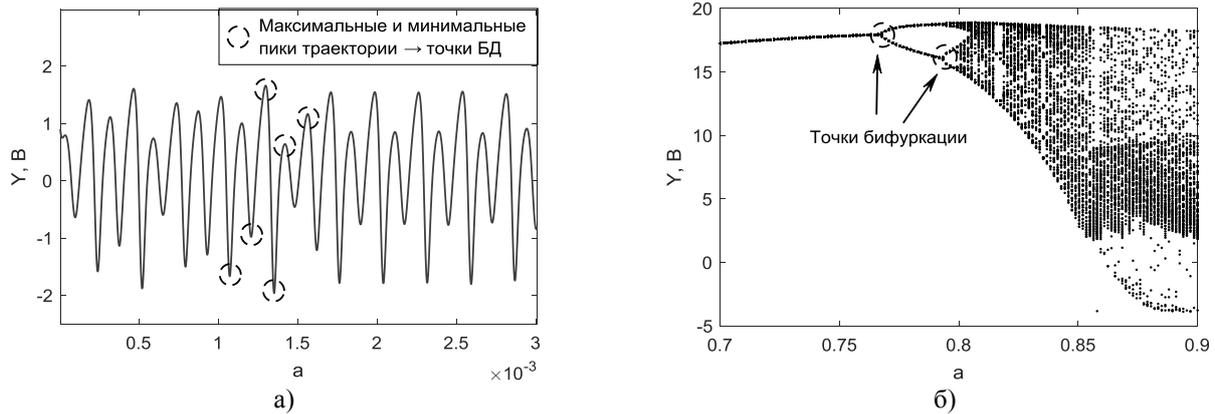


Рис. 5. Анализ колебаний хаотической цепи с использованием бифуркационных диаграмм: а - одна из методик построения БД; б - визуализация резкой смены режима колебаний в системе

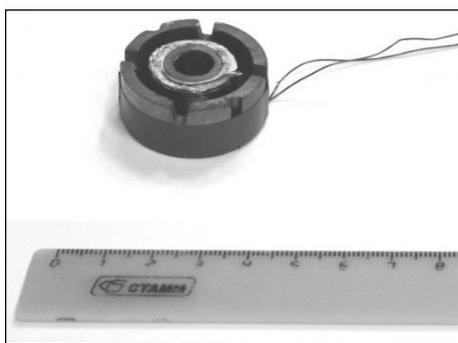
Взаимосвязь индуктивности и расстояния до цели. Для промышленных индуктивных датчиков, как правило, используется следующая формула:

$$L = \frac{W^2}{R_{СТ} + \frac{2d}{\mu_0 S_M}},$$

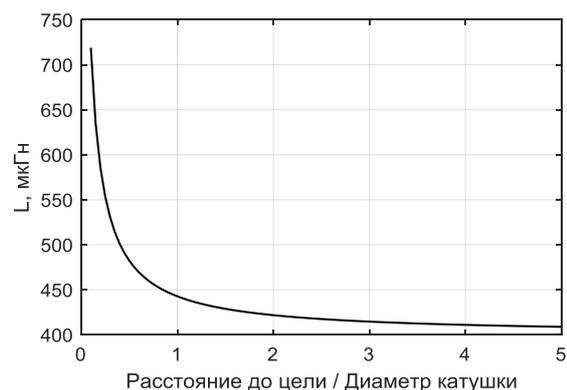
где W – количество витков катушки; $R_{СТ}$ – сопротивление стали сердечника; d – расстояние до цели; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Гн/м) – магнитная проницаемость вакуума (магнитная постоянная); S_M – поперечное сечение воздушной части магнитопровода, равное активной площади поперечного сечения сердечника в зоне воздушного зазора. При приближении к цели индуктивность такой катушки увеличивается. Для катушек типа «поисковая рамка» или планарных катушек наблюдается обратная за-

висимость. Когда металлическая мишень, например пластина, находится вблизи плоской катушки, в ней индуцируется вихревой ток. Вектор магнитного поля, создаваемого этим током, противоположен вектору, генерируемому чувствительной катушкой, что уменьшает индуктивность чувствительной катушки.

Указанная зависимость $L=f(d)$ в обоих случаях является гиперболической. Для катушки промышленного датчика с диаметром $d = 0,03$ м, имеющей индуктивность 400 мкГн (рис. 6а), соответствующая кривая показана на рис. 6б. В качестве цели подразумевается ферромагнитная пластина, площадь которой существенно превышает площадь катушки.



а)



б)

Рис. 6. Исследованная сенсорная катушка (а) и зависимость между ее индуктивностью и расстоянием до массивной цели (б)

Экспериментальное исследование

Внешний вид установки для исследования сенсора предлагаемого типа представлен на рис. 7. Цепь, моделирующая систему Спротта *Case D*, была собрана на

макетной плате станции прототипирования *NI ELVIS*. В качестве поисковой катушки использовалась катушка с чашечным сердечником, имеющая индуктивность 400

мкГн (рис. 6а). Для экспериментальной верификации зависимости индуктивности от расстояния (рис. 6б) был применен *RLC*-метр *Agilent U1731*. При получении экспериментальных данных выборка со-

стояла из 2000 точек, снятых с частотой 200 квыб/с при помощи программного обеспечения *NI LabVIEW 2018*. Затем данные были импортированы и обработаны в *MATLAB 2019a*.

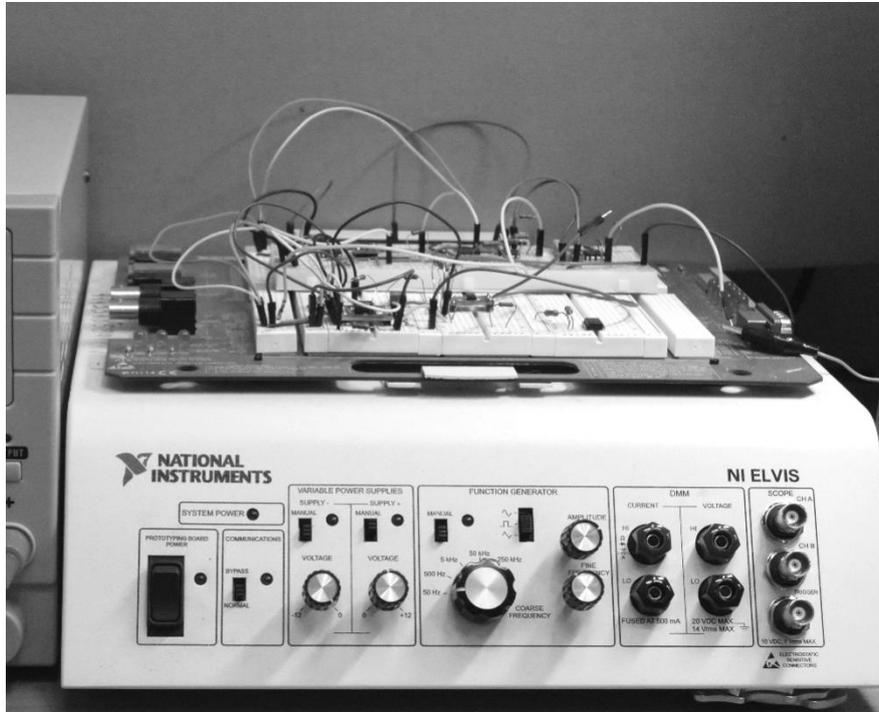


Рис. 7. Вид экспериментального стенда

Сопоставление результатов компьютерного моделирования и натурного эксперимента показывает высокое соответствие динамики модели и схемного прототипа (рис. 8). Сравнение проводилось следующим образом. С помощью платы сбора данных была получена точка состояния цепи в некоторый момент времени, которая затем использовалась в качестве начальных условий для компьютерного моделирования. Как видно из рис. 8а, первый квазипериод колебаний схема и модель очень близки друг к другу. Аттракторы также почти совпадают (рис. 8б). Достижение более высокой степени соответствия затруднительно из-за нелинейных эффектов в электрической цепи (неидеальность операции умножения, ограниченный

коэффициент усиления операционных усилителей и т.п.) и в компьютерной модели, на динамику которой оказывают влияние дискретная природа ЭВМ и выбранный численный метод [10].

Для проверки предлагаемых подходов к анализу поведения хаотических цепей [8; 12-14] был получен ряд диаграмм, характеризующих динамику цепи в зависимости от расстояния до цели d . Построение бифуркационных диаграмм [15] и подсчет периодических орбит не представляется эффективным методом, так как зоны смены режима колебаний, исследуемые в [8], достаточно узкие и не позволяют обеспечить надежное обнаружение цели (рис. 9).

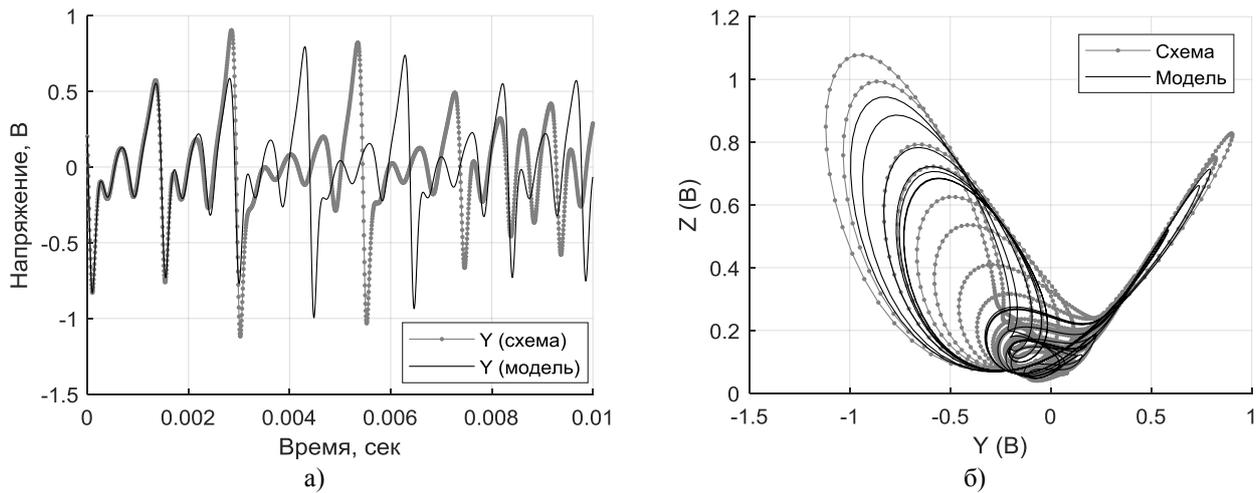


Рис. 8. Сравнение динамики электрической цепи и компьютерной модели: а - во временной области; б - на фазовой диаграмме

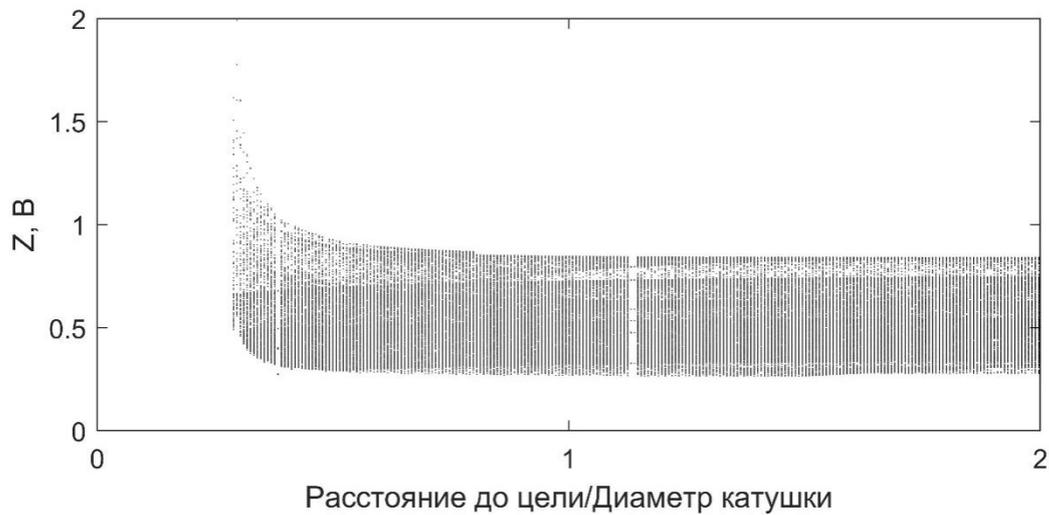


Рис. 9. Бифуркационная диаграмма для переменной z исследованного сенсора

Из метрик *RQA*-анализа наиболее выраженным трендом при варьировании значения d являлись метрики *LAM* и *TT* (рис. 10). Однако, как видно из графиков,

данные результаты трудноприменимы на практике из-за появления шума в значении метрики.

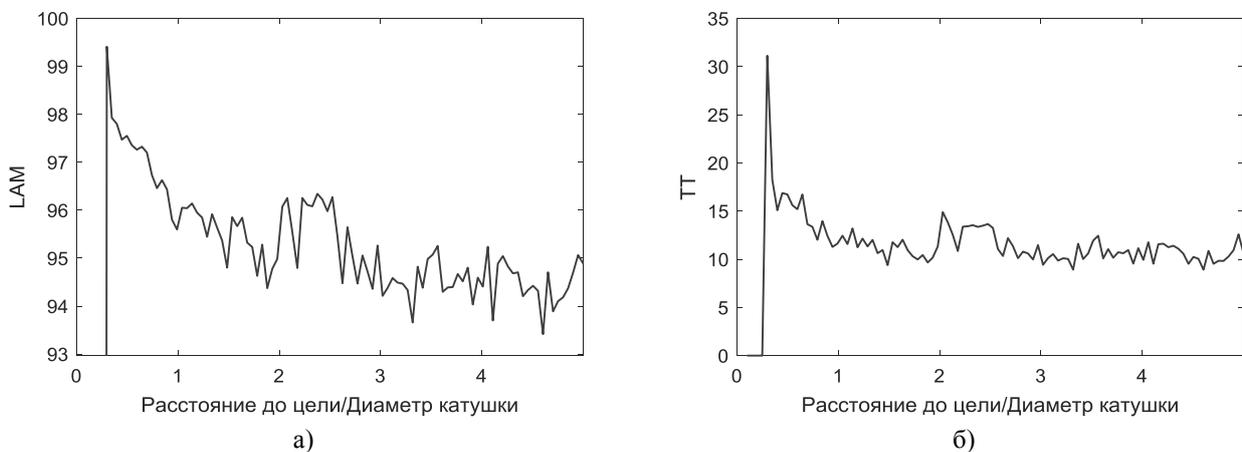


Рис. 10. Графики ламинарности (а) и времени захвата (б) в зависимости от расстояния до цели

Было установлено, что геометрические параметры аттрактора строго зависят от величины параметра L (рис. 11 и 12) и поэтому их использование для анализа показаний индуктивного хаотического сенсора наиболее эффективно. Можно видеть, что при увеличении числа квазипериодов

хаотических колебаний в процессе измерения повышается его точность. Значения геометрических параметров аттрактора при различных расстояниях до цели приведены в таблице.

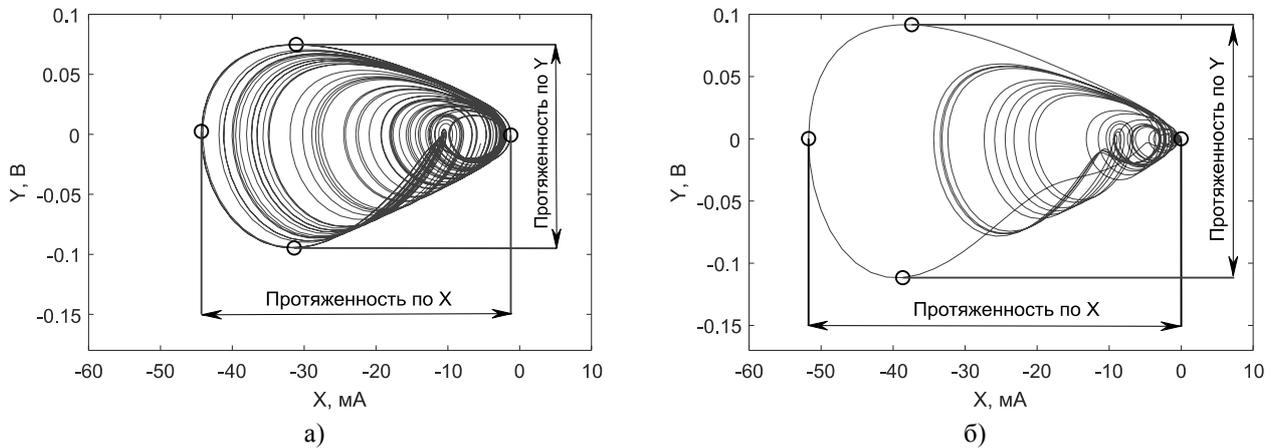


Рис. 11. Методика измерения геометрических параметров аттрактора, внешний вид которого показан при значениях индуктивности: а - $L = 400$ мкГн; б - $L = 500$ мкГн

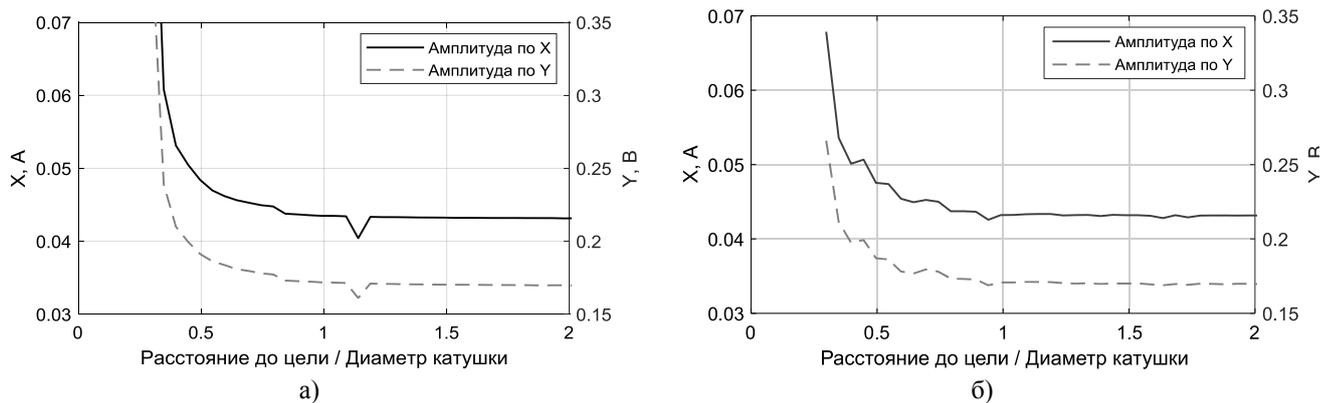


Рис. 12. Изменение геометрических параметров аттрактора при времени измерения 0,1 с (а) и 1 с (б) в зависимости от количества витков катушки и расстояния до цели

С учетом того факта, что дальность действия индуктивных сенсоров на основе гармонических колебаний составляет 0,05-0,1 м [16] и при этом стандартным расстоянием обнаружения цели считается расстояние, равное ширине (диаметру) катушки, полученные экспериментальные данные говорят о потенциальном превосходстве хаотического датчика расстояния. Так, на расстоянии до массивной цели в 20 см с помощью геометрического анализа

аттрактора все еще возможно детектировать ее присутствие. При использовании 10-битного АЦП с опорным напряжением 2В, снимающего переменную Z , разница между средним значением при расстояниях 0,15 м, 0,2 м и «бесконечность» (отсутствие цели) в двух младших разрядах позволяет их дифференцировать (таблица). При использовании более точного АЦП расстояние детектирования можно еще больше увеличить.

Таблица

Данные при времени измерения 1 с

d, м	Ср. знач. Y, В	Ср. знач. Z, В	Код 10-битного АЦП по Z
0,05	0.404	1.835	1110101011
0,1	0.171	1.802	1110011010
0,15	0.170	0.795	0110010111
0,2	0.169	0.793	0110010110
∞	0.169	0.791	0110010101

Заключение

Целью данной статьи являлась демонстрация возможности использования хаотических цепей с индуктивным элементом в задачах построения индуктивных датчиков, в частности датчиков приближения. Была предложена методика, позволяющая на основе хаотического дифференциального уравнения синтезировать электрическую цепь, а также рассчитать значения ее компонентов. Исследованы такие методы анализа хаотических осцилляций, как расчет геометрических параметров аттрактора, рекуррентный анализ и построение бифуркационной диаграммы. Наиболее эффективным в качестве инструмента оценки расстояния до цели оказался расчет геометрических параметров фазового портрета. Показано, что результаты мате-

матического и схемного моделирования имеют высокую степень соответствия, что говорит об адекватности разработанного подхода. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о возможности создания хаотических датчиков с потенциально большей, по сравнению со стандартными индуктивными датчиками приближения, дальностью обнаружения массивной цели. Достижимый порог прироста чувствительности - 2 раза и более.

Дальнейшие исследования будут направлены на улучшение характеристик разработанного прототипа, а также исследование других хаотических систем и способов синтеза чувствительных цепей на их основе.

Д.Н. Бутусов и Т.И. Каримов выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований за финансирование в рамках проекта 19-07-00496/19 «Основы исследовательского проектирования мемристивных систем», А.И. Каримов получал финансирование в рамках гранта Президента для молодых ученых - кандидатов наук МК-811.2019.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brown R., Chua L., Popp B. Is sensitive dependence on initial conditions nature's sensory device? // International Journal of Bifurcation and Chaos. 1996. Vol. 2 (1). P. 193-199. DOI: 10.1142/S0218127492000185.
2. Teodorescu H.L. Modeling natural sensitivity: A life sensitive, selective sensors // Biomedical Soft Computing and Human Sciences. 2000. Vol. 6 (1).
3. Hu W., Liu Z. Study of Metal Detection Based on Chaotic Theory // Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation. 2010. P. 2309-2314.
4. Korneta W., Garcia-Moreno E., Sena A.L. Noise activated dc signal sensor based on chaotic Chua circuit // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2015. Vol. 24 (1-3). P. 145-152.
5. Cojocaru V. Sensors Based on Chaotic Systems for Environmental Monitoring // NATO Science for Peace and Security. Series C. Environmental Security. 2014. P. 323-334.
6. Бутусов Д.Н., Островский В.Ю., Каримов Т.И., Каплун Д.И. Исследование хаотических широкополосных сигналов в контексте задач гидроакустики // Программные системы и вычислительные методы. М.: НБ-Медиа, 2017. № 4. С. 32-44.
7. Sprott J. Some simple chaotic flows // Physical review. Statistical physics, plasmas, fluids and related interdisciplinary topics. 1994. Vol. 50. P. 647-650.
8. Karimov T., Nepomuceno E., Druzhina O., Karimov A., Butusov D. Chaotic Oscillators as Inductive Sensors: Theory and Practice // Sensors. 2019. Vol. 19. P. 4314.
9. Butusov D., Karimov T., Ostrovskii V. Semi-implicit ODE solver for matrix Riccati equation // IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIcon-RusNW). 2016. P. 168-172.

10. Каримов Т.И., Бутусов Д.Н., Каримов А.И. Сравнение аналогового и численного способов моделирования хаотических систем // Сборник докладов XVIII Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2015). СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. Т. 1. С. 252-256.
11. Corless R., Essex C., Nerenberg M.A.H. Numerical methods can suppress chaos // *Physics Letters A*. 1991. Vol. 157. P. 27-36.
12. Воронов С.С., Колпакова Л.В., Кузнецов В.А. Метод измерения с использованием свойств нелинейных динамических систем // *Измерительная техника*. 1996. № 12. С. 16-18.
13. Marwan N., Kurths J., Saperin P. Generalised recurrence plots analysis for spatial data // *Physics Letters A*. P. 545-551.
14. He B., Yang C., Zhou Y., Chen Y. Using chaos to improve measurement precision // *Journal of Zhejiang University SCIENCE*. 2002. Vol. 3 (1). P. 47-51.
15. Бутусов Д.Н., Кобызев Н.П., Пестерев Д.О., Тутуева А.В., Рыбин В.Г. Сравнение методов бифуркационного и рекуррентного анализа нелинейных динамических систем на примере мемристивной цепи // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2019. Т. 19, № 1. С. 126-133.
16. Omron, Ultra-long Sensing-distance Proximity Sensor TL-L. TL-L100-10 datasheet. URL: <http://www.ia.omron.com/products/family/479/lineup.html> (дата обращения: 30.09.2019).
1. Brown R., Chua L., Popp B. Is sensitive dependence on initial conditions nature's sensory device? // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 1996. Vol. 2 (1). P. 193-199. DOI: 10.1142/S0218127492000185.
2. Teodorescu H.L. Modeling natural sensitivity: A life sensitive, selective sensors // *Biomedical Soft Computing and Human Sciences*. 2000. Vol. 6 (1).
3. Hu W., Liu Z. Study of Metal Detection Based on Chaotic Theory // *Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*. 2010. P. 2309-2314.
4. Korneta W., Garcia-Moreno E., Sena A.L. Noise activated dc signal sensor based on chaotic Chua circuit // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2015. Vol. 24 (1-3). P. 145-152.
5. Cojocaru V. Sensors Based on Chaotic Systems for Environmental Monitoring // *NATO Science for Peace and Security. Series C. Environmental Security*. 2014. P. 323-334.
6. Butusov, D.N., Ostrovsky, V.Yu., Karimov, T.I., Kaplun, D.I. Random broadband signal investigation in context of hydro-acoustic problems // *Program Systems and Computer Methods*. М.: NB-Media, 2017. No.4. pp. 32-44.
7. Sprott J. Some simple chaotic flows // *Physical review. Statistical physics, plasmas, fluids and related interdisciplinary topics*. 1994. Vol. 50. P. 647-650.
8. Karimov T., Nepomuceno E., Druzhina O., Karimov A., Butusov D. Chaotic Oscillators as Inductive Sensors: Theory and Practice // *Sensors*. 2019. Vol. 19. P. 4314.
9. Butusov D., Karimov T., Ostrovskii V. Semi-implicit ODE solver for matrix Riccati equation // *IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EICon-RusNW)*. 2016. P. 168-172.
10. Karimov, T.I., Butusov, D.N., Karimov, A.I. Comparison of analogue and numerical methods of random system modeling // *Proceedings of the XVIIIth Inter. Conf. on Soft Computations and Measurements (SCM-2015)*. S-Pb.: S-PbSETU 'LETI' Publishers. 2015. Vol.1. pp.252-256.
11. Corless R., Essex C., Nerenberg M.A.H. Numerical methods can suppress chaos // *Physics Letters A*. 1991. Vol. 157. P. 27-36.
12. 11. Voronov, S.S., Kolpakova, L.V., Kuznetsova, V.A. Method for measurement using properties of non-linear dynamic systems // *Measuring Technique*. 1996. No.12. pp. 16-18.
13. Marwan N., Kurths J., Saperin P. Generalised recurrence plots analysis for spatial data // *Physics Letters A*. P. 545-551.
14. He B., Yang C., Zhou Y., Chen Y. Using chaos to improve measurement precision // *Journal of Zhejiang University SCIENCE*. 2002. Vol. 3 (1). P. 47-51.
15. 13. Butusov, D.N., Kobzyev, N.P., Pesterev, D.O., Tutueva, A.V. Rybin, V.G. Comparison of methods for bifurcation and recurrent analysis of non-linear dynamic systems by example of memristor circuit // *Scientific-Technical Bulletin of Information Technologies, Engineering and Optics*. 2019. Vol. 19, No.1. pp. 126-133.
16. Omron, Ultra-long Sensing-distance Proximity Sensor TL-L. TL-L100-10 datasheet. URL: <http://www.ia.omron.com/products/family/479/lineup.html>

Ссылка для цитирования:

Бутусов Д.Н., Каримов Т.И., Дружина О.С., Каримов А.И. Разработка индуктивного датчика на основе хаотического осциллятора // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2019. № 12. С. 82-93. DOI: 10.30987/1999-8775-2019-2019-12-82-93.

*Статья поступила в редакцию 30.10.19.
Рецензент: к.т.н., доцент Брянского государственного
технического университета,
Рытов М.Ю.,
член редсовета журнала «Вестник БГТУ».
Статья принята к публикации 12. 11. 19.*

Сведения об авторах:

Бутусов Денис Николаевич, к.т.н., доцент кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), e-mail: dnbutusov@etu.ru.

Каримов Тимур Искандарович, к.т.н., ст. преподаватель кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), e-mail: tikarimov@etu.ru.

Butusov Denis Nikolaevich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “CAD Systems”, Lenin (Uliyanov) State Electro-Technical University “LETI” of Saint-Petersburg, e-mail: dnbutusov@etu.ru.

Karimov Timur Iskandarovich, Can. Sc. Tech., Senior lecturer of the Dep. “CAD Systems”, Lenin (Uliyanov) State Electro-Technical University “LETI” of Saint-Petersburg, e-mail: tikarimov@etu.ru.

Дружина Ольга Сергеевна, магистрант Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), e-mail: osdruzhina@etu.ru.

Каримов Артур Искандарович, к.т.н., доцент кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), e-mail: aikarimov@etu.ru.

Druzhina Olga Sergeevna, Master degree student, Lenin (Uliyanov) State Electro-Technical University “LETI” of Saint-Petersburg, e-mail: osdruzhina@etu.ru.

Karimov Arthur Iskandarovich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “CAD Systems”, Lenin (Uliyanov) State Electro-Technical University “LETI” of Saint-Petersburg, e-mail: aikarimov@etu.ru.