

РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕМЕНТ НАЗНАЧЕНИЯ ВЕСА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЦАП

© 2017 В.М. Гречишников, О.В. Теряева, А.А.Юдин

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 21.02.2017

В статье впервые предложена оригинальная конструкция регулируемого элемента назначения веса волоконно-оптических ЦАП. Постановка задачи формулируется следующим образом: создание конструкции регулируемого элемента назначения веса для волоконно-оптических ЦАП с возможностью точной регулировки коэффициента передачи при небольших массогабаритных показателях. Разработан алгоритм программы для получения и анализа математической модели указанного элемента назначения веса. Приводятся результаты математического моделирования, анализ которых показал возможность применения разработанной конструкции элемента назначения веса для 14-ти разрядных волоконно-оптических ЦАП.

Ключевые слова: регулируемый элемент назначения веса, волоконно-оптический ЦАП, математическое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Волоконно-оптические цифро-аналоговые преобразователи (ВОЦАП) предназначены для подключения источников бинарных оптических сигналов к общей оптической магистрали и последующего преобразования набора входных оптических сигналов в пропорциональный квантовый аналоговый оптический сигнал. Основными требованиями к ВОЦАП являются возможность подключения 8–14 цифровых источников информации при использовании серийных волоконно-оптических технологий и стандартного оборудования для их изготовления, а также совместимость по массогабаритным показателям с датчиковой аппаратурой и интегрально-оптической схмотехникой [1, 2].

В общем случае параллельный ВОЦАП должен выполнять две операции: назначение веса каждому разряду и суммирование оптических сигналов с весовыми коэффициентами, выбираемыми разрядными цифрами. Значения весовых коэффициентов определяют элементы назначения веса (ЭНВ), входящие в состав ВОЦАП. В основу принципа действия ЭНВ могут быть положены такие эффекты, как изменение геометрии оптического волокна (макроизгибы), изменение внутренних напряжений оптических волокон (ОВ) (микроизгибы), изменение взаимного положения торцов ОВ, введение дополнительных диа-

фрагмирующих элементов между торцами ОВ [3, 4]. Недостатками указанных конструкций являются большие габариты, сложность конструкции и невысокая точность, а также невозможность точной подстройки регулировки коэффициента передачи [5]. В связи с этим рассмотрим конструкцию регулируемого ЭНВ с эксцентрично вращающимся круглым экраном в зазоре между передающим и приемным световодами [6].

КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕМЕНТА НАЗНАЧЕНИЯ ВЕСА С ЭКСЦЕНТРИЧНО ВРАЩАЮЩИМСЯ ЭКРАНОМ

Конструкция такого ЭНВ схематично представлена на рис. 1

ЭНВ содержит передающий моноволоконный световод, расположенный в фокусе коллимирующей градиентной цилиндрической линзы (ГЦЛ) 2. Приемная (фокусирующая) ГЦЛ 3 расположена соосно с передающей ГЦЛ 2. В фокусе ГЦЛ 3 расположен торец приемного моноволоконного световода 4. В зазоре между ГЦЛ 2 и 3 расположен круглый непрозрачный экран 5, соединенный по плоскости с червячным колесом 7, которое приводится во вращение с помощью червяка 6. Геометрический центр экрана 5 смещен относительно центра вращения колеса 7 на величину эксцентриситета ε . При повороте червяка на угол φ происходит поворот червячного колеса на угол $\alpha = \varphi / k$, где k – коэффициент передачи червячной пары. Одновременно с колесом поворачивается экран 5, что приводит к экранированию части светового потока, проходящего из ГЦЛ 1 в ГЦЛ 2. При соответствующем выборе значения эксцентриситета степень перекрытия зависит от углового положения экрана и может изменяться от 0 до 1.

Гречишников Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры электротехники. E-mail: gv@ssau.ru

Теряева Ольга Викторовна, аспирант кафедры электротехники. E-mail: arefeva_olga@inbox.ru

Юдин Артем Анатольевич, консультант отдела информационных систем филиала «Макрорегион Поволжье» ООО ИК «Сибинтек».

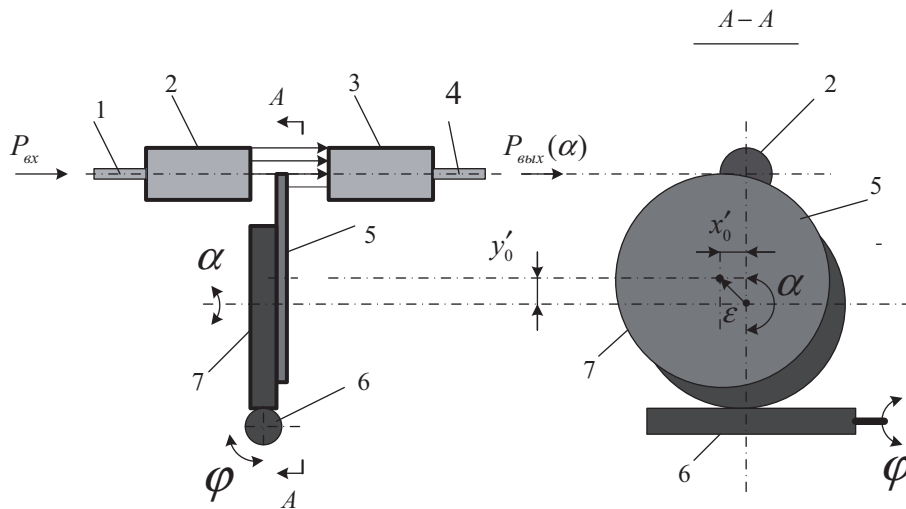


Рис. 1. Конструкция ЭНВ с эксцентрично вращающимся экраном

Описанная конструкция позволяет добиться плавной, а следовательно и более точной, регулировки коэффициента передачи излучения между ГЦЛ. Плавность регулировки тем выше, чем больше коэффициент передачи редуктора и чем больше диаметр экрана по сравнению с диаметром ГЦЛ.

К достоинствам данной конструкции можно отнести её повышенную виброустойчивость за счет эффекта самоторможения в червячной передаче. Для изготовления миниатюрных конструкций ЭНВ данного типа с успехом могут быть использованы технологии серийно выпускаемых многооборотных подстроечных резисторов. Например, при использовании редуктора потенциометра СП5-3 с передаточным отношением $k = 46$ возможно создание миниатюрной конструкции ЭНВ с габаритами 13x13x3,5 мм.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕМЕНТА НАЗНАЧЕНИЯ ВЕСА С ЭКСЦЕНТРИЧНО ВРАЩАЮЩИМСЯ ЭКРАНОМ

Основной задачей математического моделирования ЭНВ является определение зависимости вносимых энергетических потерь в функции от угла поворота эксцентрично вращающегося экрана в зазоре между двумя ГЦЛ. Расчетная схема для получения математической модели приведена на рис. 2. Центр вращения экрана 1 совмещен с началом системы координат XOY и смещен относительно геометрического центра образующей окружности диска на величину эксцентриситета ε . При вращении вектора эксцентриситета относительно начала координат XOY за счет изменения координат центра диска $y'_0 = \varepsilon \sin \alpha$, $x'_0 = \varepsilon \cos \alpha$ будет вращаться и сам диск 1.

При $\varepsilon = R_2$, $\alpha = 0$ и $R_1 > R_2$ экран полностью перекроет торец передающего ГЦЛ, что

соответствует нулевому значению коэффициента пропускания ЭНВ. При $\alpha = 180^\circ$ экран полностью выйдет из области торца ГЦЛ, что соответствует единичному значению коэффициента пропускания ЭНВ. Таким образом, регулировка коэффициента передачи осуществляется в диапазоне изменения угла поворота диска от 0 до 180° .

Как видно из рис. 2, задача сводится к отысканию площади взаимного перекрытия $S_{1,2}(\alpha)$ областей градиентной линзы 2 и вращающегося круглого непрозрачного экрана 1:

$$S_{1,2}(\alpha) \in S_1(\alpha) \cap S_2(\alpha). \quad (1)$$

Решение этой задачи аналитическими методами приводит к громоздким выражениям, неудобным для практического использования. Поэтому воспользуемся численным методом решения задачи. В этом случае для нахождения искомой площади достаточно вычислить число пикселей, формируемых координатной сеткой, одновременно принадлежащих области экрана и области торца ГЦЛ.

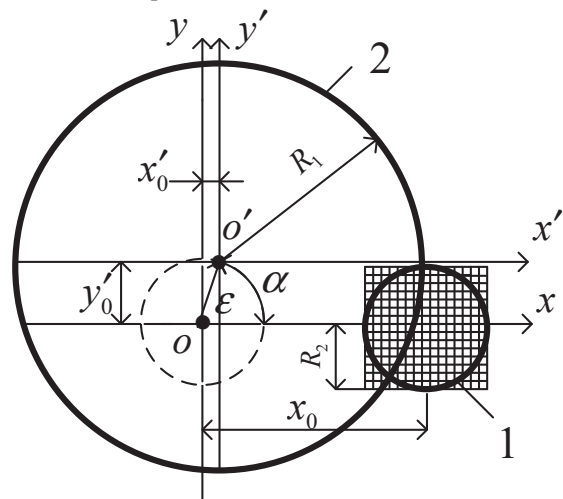


Рис. 2. Расчетная схема для получения математической модели

Уравнения образующих окружностей экрана (с учетом эксцентриситета) и торца ГЦЛ имеют вид:

$$\begin{cases} (y - \varepsilon \sin \alpha)^2 + (x - \varepsilon \cos \alpha)^2 = R_1^2, \\ y^2 + (x - x_0)^2 = R_2^2. \end{cases} \quad (2)$$

Тогда условие принадлежности произвольной точки $M(x, y)$ к области взаимного перекрытия областей можно представить в виде:

$$\begin{aligned} M(x_i, y_j) \in S_1(\alpha) \cap S_2(\alpha) = \\ = \begin{cases} (y_j - \varepsilon \sin \alpha)^2 + (x_i - \varepsilon \cos \alpha)^2 \leq R_1^2, \\ y_j^2 + (x_i - x_0)^2 \leq R_2^2. \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

Из рис. 2 также видно, что информативные области изменения аргументов не выходят за пределы:

$$\Delta x = \Delta y = 2R_2. \quad (4)$$

В этом случае искомую площадь можно выразить в виде суммы пикселей, принадлежащих области перекрытия:

$$S(\alpha) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n N_{ij} S_0, \quad (5)$$

где N_{ij} – число пикселей, принадлежащих области перекрытия, S_0 – площадь одного пикселя размером $\delta_{xi} \cdot \delta_{yj}$.

Значения δ_{xi} и δ_{yj} определяются шагом координатной сетки:

$$\delta_{xi} = \delta_{yj} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{\Delta y}{k}, \quad (6)$$

где k – целое число, выбираемое, исходя из требуемой точности вычислений.

По полученному значению $S(\alpha)$ можно зависимость коэффициента передачи ЭНВ при повороте экрана:

$$G(\alpha) = 1 - \frac{S(\alpha)}{\pi R_2^2}, \quad (7)$$

а также оценить скорость изменения коэффициента передачи ЭНВ по углу поворота:

$$T(\alpha) = \frac{dG(\alpha)}{d\alpha}. \quad (8)$$

Учитывая, что угол поворота экрана связан с углом поворота вала червячной передачи соотношением $\alpha = \frac{\varphi}{k}$, где k коэффициент редук-

ции угла червяной пары, то чувствительность коэффициента передачи излучения к изменению угла φ будет меньше чувствительности по углу α за счет уменьшения в k раз масштаба по оси α .

Уменьшение чувствительности обеспечивает более высокую точность установки весовых коэффициентов ЭНВ.

АЛГОРИТМ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ И АНАЛИЗА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТА НАЗНАЧЕНИЯ ВЕСА

Алгоритм программы, реализующей описанный способ получения и анализа математической модели ЭНВ приведен, на рисунке 3.

Исходными данными вычислительного алгоритма являются константы $R_1, R_2, \varepsilon, \Delta\alpha, \Delta x, \Delta y, k, \delta_x, \delta_y$. Угол поворота экрана принимает дискретные значения:

$$\alpha_m = m\Delta\alpha, \quad \Delta\alpha = \frac{180}{n}, \quad m = \overline{0, n}, \quad m = m + 1.$$

В начале задается начальное пространственное положение экрана $\alpha_0 = 0$ ($m = 0$), при котором экран полностью перекрывает торец ГЦЛ и коэффициент передачи:

$$G(0) = 1 - \frac{S(0)}{\pi R_2^2} = 1 - \frac{\pi R_2^2}{\pi R_2^2} = 0.$$

Затем задается первое дискретное положение экрана, равное $\alpha_1 = \Delta\alpha$ при $m = 1$. В этом положении задается номер столбца локальной координатной сетки (рис. 2) $i = 0$. После этого вычисляются координаты j -тых пикселей, принадлежащих нулевому столбцу координатной сетки:

$$\begin{aligned} x_i = (x_0 - R_2) + i\delta x, \quad \delta x = \frac{2R_2}{k}, \quad i = 0, \\ y_j = -R_2 + j\delta y, \quad \delta y = \frac{2R_2}{k}, \quad j = \overline{j+1}, \quad j = \overline{0, k}. \end{aligned}$$

Далее проверяется принадлежность пикселей с координатами x_0, y_j к области перекрытия экрана и торца ГЦЛ в соответствии с условием (3). Изменяя индекс j в диапазоне $j = \overline{0, k}$, $j = j + 1$ определяем число пикселей j -го столбца N_{0j} , принадлежащих искомой области. Площадь перекрытия $S(\Delta\alpha)$ будет равна:

$$S_{0,j} = N_{0,j} S_0,$$

где $S_0 = \delta_x \delta_y$ – площадь одного пикселя.

Найденное значение $S_{0,j}$ записывается в память ПК. Аналогичным образом анализируется принадлежность пикселей области перекрытия при изменении номера столбца в диапазоне $i = \overline{1, k}$, $i = i + 1$ Общая площадь перекрытия равна сумме:

$$S(\Delta\alpha) = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k N_{ij}(\Delta\alpha) S_0.$$

Полученное значение $S(\Delta\alpha)$ записывается в память ПК. После этого задается следующее

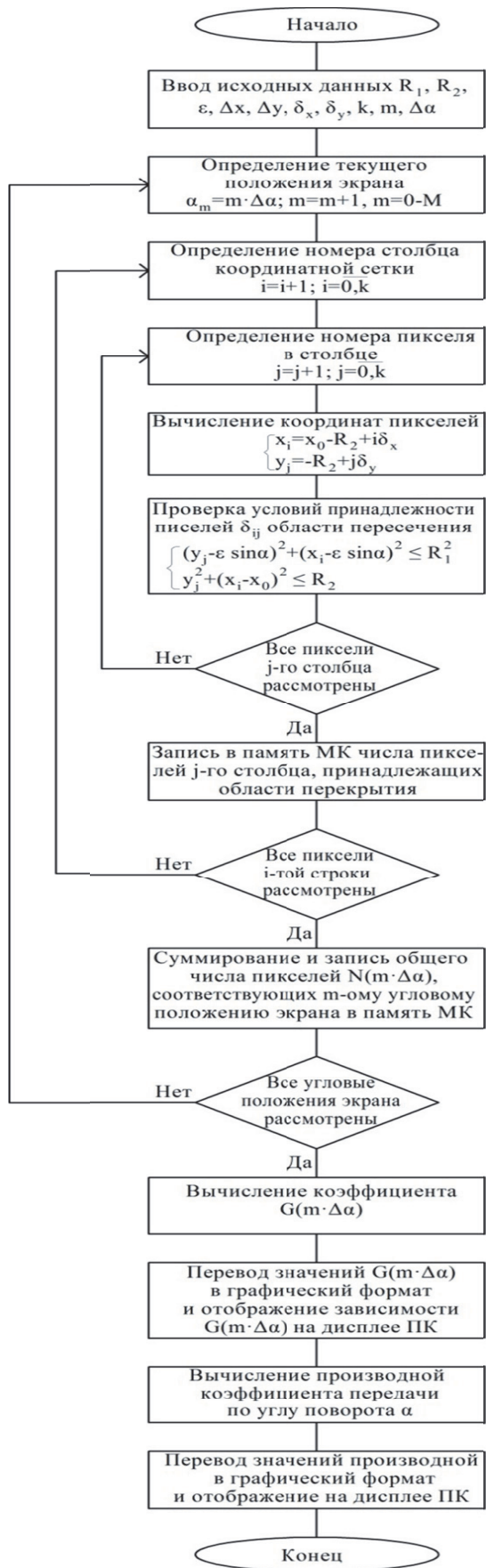


Рис. 3. Алгоритм программы, реализующей способ получения и анализа математической модели ЭНВ

дискретное значение угла поворота экрана $\alpha = 2\Delta\alpha$ и в соответствии с описанной процедурой вычисляется второе значение площади $S(2\Delta\alpha)$ при $m = 2$. При изменении угла поворота в диапазоне $0-180^\circ$ с шагом $\Delta\alpha$, в памяти ПК сформируется числовой массив из n значений площадей перекрытия, соответствующий всем дискретным значениям угла поворота. Значение коэффициента передачи ЭНВ для m -го значения угла поворота экрана вычисляется по формуле:

$$G(\alpha_m) = \frac{S(\alpha_m)}{\pi R_2^2}.$$

Полученные данные переводятся в графический формат и отображаются на экране дисплея в виде зависимости $G(\alpha_m)$. С использованием полученного числового массива вычисляются значения чувствительности коэффициента передачи ЭНВ к изменению угла поворота

$$T(\alpha_m) = \frac{G[(m+1)\Delta\alpha] - G(m\Delta\alpha)}{\Delta\alpha},$$

которые также отображаются на дисплее в виде графика $T(\alpha_m)$ (рис. 4).

По расчетным графикам, представленным на рисунке 4, видно, что наиболее неблагоприятный участок – это точка перегиба производной, где крутизна коэффициента передачи максимальна. Как следует из проведенного расчета, на интервале от $87,5$ градусов до $92,5$ градусов приращение коэффициента передачи равно $0,0227$, что в пересчете на 1 градус составляет $0,0045$, а с учетом коэффициента редуциции $9,9 \cdot 10^{-5}$. На всех остальных участках, где характеристика носит более пологий характер, приращение коэффициента передачи на единицу угла поворота вала червяка будет еще меньше, а следовательно, описанная конструкция позволяет добиться точной регулировки коэффициента передачи излучения между ГЦЛ, погрешность его установки составит не более $0,01\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые предложена оригинальная конструкция регулируемого ЭНВ ВОЦАП с эксцентрично вращающимся круглым экраном в зазоре между передающим и приемным световодами. Получена математическая модель указанного ЭНВ с помощью численных методов. На основе математической модели разработан алгоритм программы для получения и анализа математической модели элемента назначения веса. Использование данной программы позволило получать зависимости коэффициента передачи ЭНВ от угла поворота экрана и чувствительности ЭНВ к изменению угла поворота.

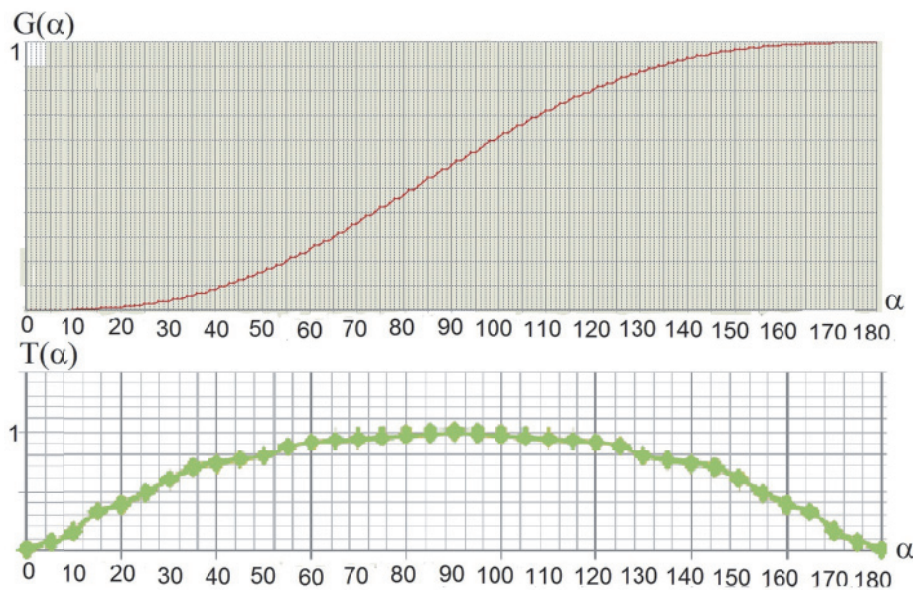


Рис. 4. График зависимости коэффициента передачи ЭНВ от угла поворота экрана и чувствительности коэффициента передачи ЭНВ к изменению угла поворота

Показано, что поворот вала червячной пары на 1° приводит к изменению коэффициента передачи на 10^{-4} , что соответствует требованиям к погрешности установки весового коэффициента в младшем разряде 14-ти разрядного ЦАП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гречишников В.М., Теряева О.В. Волоконно-оптические цифро-аналоговые преобразователи конечных положений авиационных приборов и систем // Известия ВУЗов. Авиационная техника. 2016. № 3. С. 122-128.
2. Оптоэлектронные цифровые преобразователи угла с весовым уплотнением каналов / В.М. Гречишников, В.Г. Домрачев, И.В. Ретинская, О.В. Теряева // Измерительная техника. 2015. № 10. С. 34-39.
3. Fiber-Optic Angle Converter with Adaptive Error Correction of Non-Uniform Division of Optical Power / V.M. Grechishnikov, V.G. Domrachev, O.V. Teryaeva, A.A. Yudin // Measurement Techniques. 2015. Vol. 57. Issue 11. P. 1309-1314.
4. Зеленский В.А., Гречишников В.М. Бинарные волоконно-оптические преобразователи в системах управления и контроля. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2006. 120 с.
5. Волоконная оптика и приборостроение / М.М. Бутусов, С.Л. Галкин, С.П. Оробинский, Б.П. Пал [под ред. М.М. Бутусова]. Л.: Машиностроение, 1987. 328 с.
6. Заявка на полезную модель 2017103257 РФ. Оптический аттенуатор / В.М. Гречишников, О.В. Теряева, В.В. Арефьев. Заявл. 31.01.2017.

THE REGULATING ELEMENT OF THE FIBER-OPTIC DIGITAL-ANALOG CONVERTORS (DACs)

© 2017 V.M. Grechishnikov, O.V. Teryaeva, A.A. Yudin

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

This article presents the original design of the fiber-optic digital-analog convertors (DACs). The problem is formulated as follows: **the creation of the regulating element for fiber-optic DACs with the option of accurate adjustment of transmission factor at limited weight-size dimensions.** A software algorithm for generation and analysis of the mathematical model for this item is developed. The results of mathematical modeling are enumerated, as well as the analysis of them that demonstrates the possibility of using this developed regulating element for 14-bit fiber-optic DAC.

Keywords: regulating element, fiber-optic digital-analog convertors, mathematical modeling.

Vladimir Grechishnikov, Doctor of Technics, Professor, Head at the Electrical Engineering Department. E-mail: gv@ssau.ru
 Olga Teryaeva, Postgraduate Student at the Electrical Engineering Department. E-mail: arefeva_olga@inbox.ru
 Artem Yudin, Consultant of the Information Systems Department of the Branch «Macro-Region Povolzhye» LLC IC «Sibintek».