

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 62-83:621

*А. С. Коваль, А. В. Шваяков, Е. В. Ефименко*

### К ВОПРОСУ РЕАЛИЗАЦИИ НАБЛЮДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМЫ В СИСТЕМАХ РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА ЛИФТОВ

UDC 62-83:621

*A. S. Koval, A. V. Shvayakov, Y. V. Yefimenka*

### ON THE USE OF MONITORING DEVICES FOR THE MECHANICAL SUBSYSTEM IN THE SYSTEMS OF ADJUSTABLE ELECTRIC DRIVE OF ELEVATORS

#### **Аннотация**

Для трёхмассовой расчётной схемы механической подсистемы электропривода лифтов показана возможность построения как полного, так и редуцируемого наблюдающего устройства. Приведена блок-схема редуцируемого наблюдателя для контроля скорости перемещения кабины лифта.

#### **Ключевые слова:**

электропривод, лифт, наблюдающее устройство, следящие системы, частотный электропривод, механическая подсистема, система управления.

#### **Abstract**

The paper shows the possibility of constructing both complete and reducible monitoring device for the three-mass design diagram of the mechanical subsystem of elevators electric drive. The block diagram of a reducible monitoring device to control travel speed of an elevator cage is given.

#### **Key words:**

electric drive, elevator, monitoring device, tracking systems, VFD, mechanical subsystem, control system.

В настоящее время основной тип привода массовых лифтов – это частотно-регулируемый привод [1]. Совершенствование технического уровня лифтов связано с учетом возможности привода демпфировать колебания в механической части лифта. Один из вариантов для реализации этой цели – использование в системе управления приводом лифта непосредственно скорости перемещения кабины лифта в отличие от существующих систем

управления, где для построения САУ электропривода применяется скорость двигателя привода кабины, которая либо измеряется датчиком на валу двигателя, либо вычисляется в системе управления [1]. Схема вычисления, например, наблюдающее устройство (наблюдатель), может быть использована и для оценки скорости перемещения кабины лифта [2].

Динамические явления в механической подсистеме привода лифта мож-

но анализировать с помощью расчетных схем с ограниченным числом степеней свободы [3]. Наиболее простыми и используемыми для исследования кинематики подъемных механизмов являются двухмассовые и трехмассовые расчетные схемы, в частности, механическая

подсистема привода лифта может быть представлена трехмассовой расчетной схемой [3]. Рассмотрим возможность реализации наблюдателя для оценки неизмеряемых координат в трехмассовой расчетной схеме (рис. 1), в том числе скорости кабины лифта.

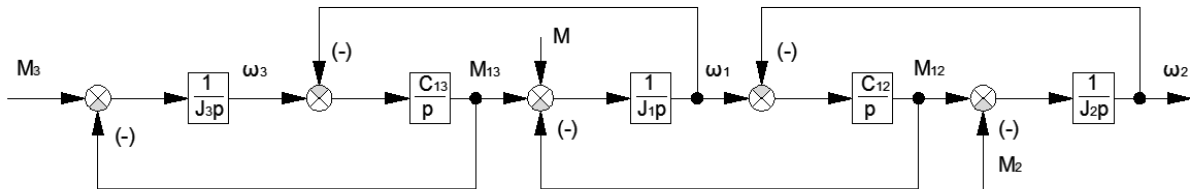


Рис. 1. Структурная схема трёхмассовой консервативной системы:  $M$  – момент двигателя;  $M_{12}$ ,  $M_{13}$  – приведенные к валу двигателя моменты упругости;  $M_2$ ,  $M_3$  – приведенные к валу двигателя моменты, обусловленные силой тяжести;  $C_{12}$ ,  $C_{13}$  – коэффициенты жёсткости при кручении связей;  $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$  – приведенные к валу двигателя моменты инерции двигателя, кабины лифта, противовеса;  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  – приведенные к валу двигателя угловые ускорения двигателя, кабины лифта, противовеса

Исходная система уравнений, описывающая трёхмассовую расчётную схему (см. рис. 1), имеет вид [3]:

$$\begin{cases} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_{12} + M_{13}; \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{12} - M_2; \\ J_3 \frac{d\omega_3}{dt} = M_3 - M_{13}; \\ \frac{dM_{12}}{dt} = C_{12}(\omega_1 - \omega_2); \\ \frac{dM_{13}}{dt} = C_{13}(\omega_3 - \omega_1), \end{cases} \quad (1)$$

где  $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$  – приведенные к валу двигателя моменты инерции двигателя, кабины лифта, противовеса, кг·м<sup>2</sup>;  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  – приведенные к валу двигателя угловые ускорения двигателя, кабины лифта, противовеса, рад/с;  $M$  – момент двигателя, Н·м;  $M_{12}$ ,  $M_{13}$  – приведенные к валу двигателя моменты упругости, Н·м;  $M_2$ ,  $M_3$  – приведенные к валу двигателя моменты, обусловленные силой тяжести, Н·м;  $C_{12}$ ,  $C_{13}$  – коэффициенты жёсткости при кручении связей, Н·м/рад.

В соответствии с методикой построения наблюдающих устройств [2] запишем уравнение (1) трёхмассовой расчётной схемы в виде

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = -K_1 \cdot X_4 + K_1 \cdot X_5 + K_1 \cdot M; \\ \dot{X}_2 = K_2 \cdot X_4 - K_2 \cdot M_2; \\ \dot{X}_3 = -K_3 \cdot X_5 + K_3 \cdot M_3; \\ \dot{X}_4 = K_4 \cdot X_1 - K_4 \cdot X_2; \\ \dot{X}_5 = -K_5 \cdot X_1 + K_5 \cdot X_3, \end{cases} \quad (2)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= \frac{d\omega_1}{dt}; \quad \dot{X}_2 = \frac{d\omega_2}{dt}; \quad \dot{X}_3 = \frac{d\omega_3}{dt}; \\ \dot{X}_4 &= \frac{dM_{12}}{dt}; \quad \dot{X}_5 = \frac{dM_{13}}{dt}; \\ K_1 &= \frac{1}{J_1}; \quad K_2 = \frac{1}{J_2}; \quad K_3 = \frac{1}{J_3}; \\ K_4 &= C_{12}; \quad K_5 = C_{13}; \quad X_1 = \omega_1; \\ X_2 &= \omega_2; \quad X_3 = \omega_3; \quad X_4 = M_{12}; \end{aligned}$$

$$X_5 = M_{13}.$$

$$B_1 = [K_1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \quad (5)$$

Этой системе уравнений соответствует запись в матричной форме [2]

$B_2$  – матрица-столбец возмущений,

$$B_2 = [0 \ -K_2 \ K_3 \ 0 \ 0]^T. \quad (6)$$

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A \cdot X(t) + B_1 \cdot U(t) + \\ + B_2 \cdot M_{CT}(t); \\ Y(t) = C \cdot X(t), \end{cases} \quad (3)$$

Доступна для измерений в приводе лифта с механической подсистемой в виде трёхмассовой расчётной схемы из всех переменных состояния системы (2) только частота вращения двигателя  $X_1$ . Соответственно, неизмеряемые координаты –  $X_2, X_3, X_4, X_5$ . Поэтому в выражении (3) для выходного вектора  $Y(t)$  матрица  $C$  может быть записана как  $C = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ .

где  $X(t)$  – матрица-столбец переменных состояния объекта,  $X(t) = [X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4 \ X_5]^T$ ;  $U(t)$  – матрица-столбец сигналов управления,  $U(t) = [M \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ ;  $M_{CT}(t)$  – матрица-столбец возмущающих воздействий.  $M_{CT}(t) = [0 \ M_2 \ M_3 \ 0 \ 0]^T$ ;  $A$  – матрица объекта,

Оценим возможность восстановления координат  $X_2, X_3, X_4, X_5$  в трёхмассовой системе по измеряемой координате  $X_1$ . Ранг матрицы наблюдаемости для системы (3)  $Q = [C \ CA \ CA^2 \ CA^3 \ CA^4]^T$  должен быть равен порядку системы [2]. В рассмотренном случае порядок системы (2)  $n = 5$ . Матрица  $Q$  имеет вид:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -K_1 & +K_1 \\ 0 & 0 & 0 & K_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -K_3 \\ K_4 - K_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_5 & 0 & K_5 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$B_1$  – матрица-столбец управления,

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K_1 & K_1 \\ -K_1(K_4 + K_5) & K_1 K_4 & K_1 K_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_1^2(K_4 + K_5) & -K_1(K_4 + K_5 - K_1 + K_3 K_5) \\ K_1^2(K_4^2 + K_1 + K_4 K_5 + K_5) + K_5 K_4 + K_1 K_3 K_5^2 & -K_1^2(K_4 + K_5 K_4) & -K_1^2(K_4 K_5 + K_5^2) - K_1 K_3 K_5^2 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Ранг этой матрицы равен 5, а значит, может быть реализован наблюдатель для оценки полного вектора состояния трехмассового объекта по одной измеряемой координате ( $X_1$ ).

Для упрощения реализации схемы наблюдателя целесообразно понизить порядок описания наблюдаемого объекта, и конструктивные особенности реализации лифтов позволяют сделать это.

В системе уравнений (3) координаты  $X_2$  и  $X_3$  – это, соответственно, приведенные к валу двигателя угловые скорости кабины лифта и противовеса. Если учесть, что кабина лифта и противовес двигаются в противоположных направлениях, но с одинаковой скоростью, и принять эти скорости равными с обратным знаком  $X_2 = -X_3$ , то исходная система уравнений может быть преобразована следующим образом.

Запишем  $\dot{X}_2 = -\dot{X}_3$ , или из (2)  $K_2 \cdot X_4 - K_2 \cdot M_2 = K_3 \cdot X_5 - K_3 \cdot M_3$ .

Отсюда  $X_4 = M_2 - \frac{K_3}{K_2} M_3 + \frac{K_3}{K_2} X_5$ .

Тогда  $\dot{X}_4 = \frac{K_3}{K_2} \dot{X}_5$ .

Обозначим  $\frac{K_3}{K_2} = a$  и  $M_2 - \frac{K_3}{K_2} M_3 = N$ .

Соответственно,

$$X_4 = N + aX_5; \quad \dot{X}_4 = a \dot{X}_5. \quad (7)$$

Перепишем (2):

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = -K_1 \cdot X_4 + K_1 \cdot X_5 + K_1 \cdot M; \\ \dot{X}_4 = K_4 \cdot X_1 - K_4 \cdot X_2; \\ \dot{X}_5 = -K_5 \cdot X_1 + K_5 \cdot X_3. \end{cases} \quad (8)$$

С учётом (7) третье уравнение (8) имеет следующий вид:

$$\dot{X}_4 = a(-K_5 \cdot X_1 - K_5 \cdot X_2).$$

Соответственно, (8) можно переписать как

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = -K_1 \cdot X_4 + K_1 \cdot X_5 + K_1 \cdot M; \\ \dot{X}_4 = K_4 \cdot X_1 - K_4 \cdot X_2; \\ \dot{X}_4 = a(-K_5 \cdot X_1 - K_5 \cdot X_2). \end{cases} \quad (9)$$

Из двух последних уравнений (9)

$$\dot{X}_4 = X_1 \frac{K_4 - aK_5}{2} - X_2 \frac{K_4 + aK_5}{2}.$$

В результате получаем преобразованную систему уравнений (2) (при  $X_2 = -X_3$ ):

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = (N - K_1) \cdot X_4 - N \cdot M_2 + \\ + K_1 \cdot M_3 + K_1 \cdot M; \\ \dot{X}_2 = K_2 \cdot X_4 - K_2 \cdot M_2; \\ \dot{X}_4 = D_1 \cdot X_1 - D_2 \cdot X_2, \end{cases} \quad (10)$$

где  $D_1 = \frac{K_4 - aK_5}{2}$ ;  $D_2 = \frac{K_4 + aK_5}{2}$ .

В матричной форме (10) имеет вид (3):

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A \cdot X(t) + B_1 \cdot U(t) + B_2 \cdot M_{CT}(t); \\ Y(t) = C \cdot X(t). \end{cases}$$

Здесь

$$X(t) = [X_1 \ X_2 \ X_4]^T;$$

$$U(t) = [M \ 0 \ 0]^T;$$

$$M_{CT}(t) = [M_2 \ M_3 \ 0]^T;$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & N - K_1 \\ 0 & 0 & K_2 \\ D_1 & D_2 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B_1 = [K_1 \ 0 \ 0]^T;$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} -N & K_1 \\ -K_2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Особенностью лифтовых приводов является использование противовеса, который уравнивает вес кабины и половину номинального груза в ней. Для оценки возможности построения

редуцированного наблюдающего устройства примем режим работы лифта с полностью уравновешенной кабиной и половиной номинального груза в ней. В этом случае уравнения (3) можно переписать:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A \cdot X(t) + B_1 \cdot U(t); \\ Y(t) = C \cdot X(t). \end{cases} \quad (12)$$

Запишем матрицу наблюдаемости для системы (12)  $Q = [C \ CA \ CA^2]^T$ :

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & M_1 \\ M_1 D_1 & -M_1 D_1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Ранг этой матрицы равен 3, т. е. порядку объекта (10), и в этом случае полностью наблюдаем. Измеряя частоту двигателя (координата  $X_1$ ), можно при помощи наблюдающего устройства восстановить полный вектор состояния (координаты  $X_2, X_4$ ), а наблюдающему устройству придать любые собственные значения [2].

Следуя методике построения наблюдающих устройств пониженной размерности, запишем уравнение трёхмассового объекта (12) в блочном виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{Y}_1(t) \\ \dot{W}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Y_1(t) \\ W(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \cdot U(t). \quad (13)$$

Здесь

$$\begin{aligned} Y_1(t) &= X_1; \quad W(t) = [X_2 \ X_4]^T; \\ U(t) &= M; \quad A_{11} = 0; \quad A_{12} = [0 \ N - K_1]; \\ A_{21} &= \begin{bmatrix} 0 \\ D_1 \end{bmatrix}; \quad A_{22} = \begin{bmatrix} 0 & K_2 \\ -D_2 & 0 \end{bmatrix}; \end{aligned}$$

$$B_1 = K_1; \quad B_2 = 0.$$

Наблюдающее устройство описывается уравнением [5]

$$\begin{aligned} Z(t) &= (A_{22} - L \cdot A_{12})Z(t) + \\ &+ (A_{22} - L \cdot A_{12})L \cdot Y(t) + \\ &+ (A_{21} - L \cdot A_{11})Y(t) - L \cdot B_1 \cdot U(t), \end{aligned} \quad (14)$$

где  $Z(t)$  – вектор состояния наблюдающего устройства,  $Z(t) = \hat{W}(t) - L \cdot Y(t)$ ;  $\hat{W}(t)$  – его выходной вектор;  $L$  – матрица, значения которой необходимо выбрать и которые определяют корни характеристического уравнения наблюдающего устройства.

Эта матрица для нашего случая имеет вид:

$$L = [E_1 \ E_2]^T.$$

Найдём матричные коэффициенты уравнения (14):

$$\begin{aligned} A_{22} - L \cdot A_{12} &= \begin{bmatrix} 0 & K_2 \\ -D_2 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \times \\ &\times [0 \ N - K_1] = \begin{bmatrix} 0 & K_2 - E_1 \cdot (N - K_1) \\ -D_2 & -E_2 \cdot (N - K_1) \end{bmatrix}; \end{aligned}$$

$$A_{21} - L \cdot A_{11} = A_{21} = \begin{bmatrix} 0 \\ D_1 \end{bmatrix};$$

$$L \cdot B_1 = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \cdot K_1.$$

Редуцированное наблюдающее устройство для трёхмассового объекта в соответствии с описанием (12) представлено на рис. 2.

Неизвестные собственные значения матрицы  $E_1, E_2$  можно определить следующим образом.

Характеристическое уравнение наблюдающего устройства имеет вид [5]:

$$\det(pI - (A_{22} - L \cdot A_{12})) = 0.$$

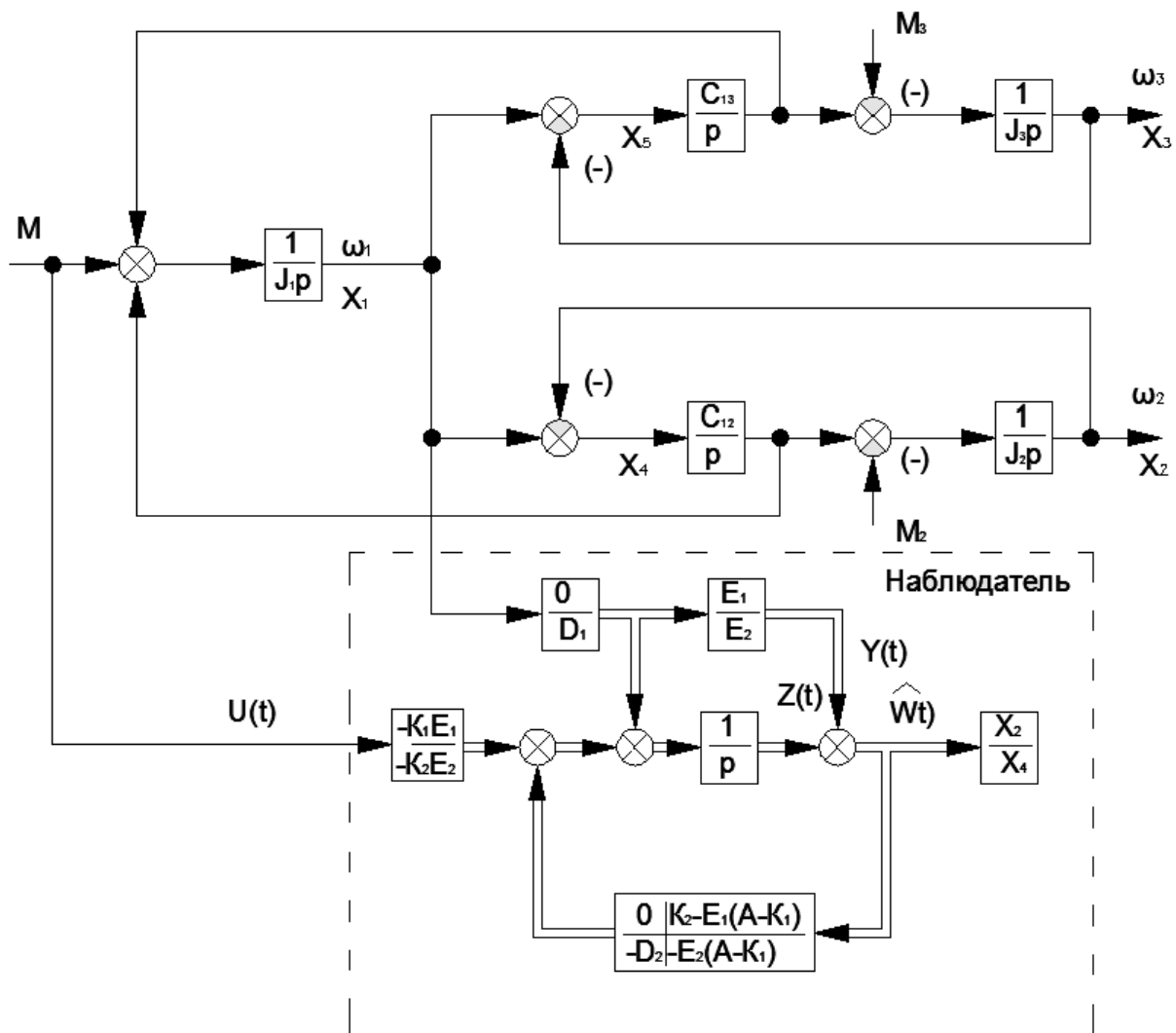


Рис. 2. Редуцированное наблюдающее устройство для механической подсистемы ЭП лифта при полном уравновешивании загрузки кабины

Его динамика может быть настроена выбором корней характеристического уравнения в соответствии с одним из стандартных распределений, например, по Баттерворту [5].

$$p^2 - E_2(N - K_1)p + E_1(N - K_1) = p^2 + 1,4 \cdot \omega_0 \cdot p + \omega_0^2,$$

где в качестве стандартной формы выбрано выражение  $p^2 + 1,4 \cdot \omega_0 \cdot p + \omega_0^2 = 0$ .

Тогда неизвестные значения  $E_1, E_2$  находятся из системы уравнений

$$\begin{cases} E_2(K_1 - N) = 1,4 \cdot \omega_0; \\ E_1(N - K_1) = \omega_0^2, \end{cases}$$

где  $\omega_0$  определяет быстродействие наблюдателя и должно выбираться исходя из быстродействия системы регулирования электропривода лифта.

### **Выводы**

Показана возможность построения наблюдающих устройств для оценки вектора переменных состояния

механической подсистемы привода лифта, описываемой трехмассовой расчетной схемой.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Афонин, В. И.** Регулируемый электропривод лифтов с асинхронными двигателями / В. И. Афонин, И. Н. Балабанов // Электротехника. – 2006. – № 5. – С. 37–42.
2. **Квакернаак, Х.** Линейные оптимальные системы управления / Х. Квакернаак, Р. Сиван. – М. : Мир, 1977. – 650 с.
3. **Чупрасов, В. В.** Исследование динамики электроприводов лифтов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. В. Чупрасов. – М., 1976. – 25 с.
4. **Коваль, А. С.** К вопросу электромеханического взаимодействия в лифтах с регулируемым электроприводом и нечетким регулятором / А. С. Коваль, А. В. Шваяков // Изв. вузов и энергет. объединений СНГ. Энергетика. – 2010. – № 5. – С. 34–40.
5. **Кузовков, Н. Т.** Модальное управление и наблюдающие устройства / Н. Т. Кузовков. – М. : Машиностроение, 1976. – 181 с.
6. **Чутчиков, П. И.** Электрооборудование лифтов массового применения / П. И. Чутчиков, Н. И. Алексеев, А. К. Прокофьев. – М. : Машиностроение, 1983. – 168 с.

*Статья сдана в редакцию 29 мая 2014 года*

**Александр Сергеевич Коваль**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: etf@bru.by.

**Андрей Викторович Шваяков**, инженер, ОДО «Стрим». E-mail: strim@strim-tech.com.

**Евгений Викторович Ефименко**, аспирант, Белорусско-Российский университет. E-mail: captain\_puls@mail.ru.

**Aleksandr Sergeyeovich Koval**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: etf@bru.by.

**Andrey Viktorovich Shvayakov**, engineer, ODO «Strim». E-mail: strim@strim-tech.com.

**Yevgeny Viktorovich Yefimenka**, PhD student, Belarusian-Russian University. E-mail: captain\_puls@mail.ru.