

Малков Анатолий Валентинович – Общество с ограниченной ответственностью «Нарзан-гидроресурсы»; e-mail: Anatol.Malkov@yandex.ru; 357700, Ставропольский край, г. Кисловодск, ул. Кирова, 43; тел.: 88793729139; директор, кандидат геолого-минералогических наук; д.т.н.

Зенкина Ольга Николаевна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: olga.n72@mail.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шаумяна, 8-6; тел.: +78986250925; магистрант кафедры синергетики и процессов управления.

Помеляйко Василий Иванович – Группа компаний Danon-Юнимилк в России, филиал «Молочный Комбинат «ЛИПЕЦКИЙ»; e-mail: v.pomelyayko@gmail.com; 398000, Липецкая область, г. Липецк, ул. Катукова, 1; тел.: 884742429545; главный инженер

Помеляйко Ирина Сергеевна – Общество с ограниченной ответственностью «Нарзан-гидроресурсы»; e-mail: irinapomelyayko@rambler.ru; 357700 Россия, Ставропольский край, г. Кисловодск, ул. Кирова, 43; тел.: 88793729139; инженер-гидрогеолог

Malkov Anatoliy Valentinovich – Limited Liability Company “Narzan-hydroresources”; e-mail: Anatol.Malkov@yandex.ru; 43, Kirov street, Kislovodsk, Stavropol region, 357700, Russia; phone: +78793729139; director; cand. of geological and mineralogical sc., dr. of eng. sc.

Zenkina Olga Nikolaevna – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: olga.n72@mail.ru; 8-6, Shaumiana street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78986250925; master degree student of the department of synergetics and control processes.

Pomelyayko Vasiliy Ivanovich – Group Danone-Unimilk in Russia, a subsidiary of "Dairy Plant" Lipetsk "; e-mail: v.pomelyayko@gmail.com; 1, Katukova Street, Lipetsk, Lipetsk region, 398000, Russia; phone: +784742429545; chief engineer.

Pomelyayko Irina Sergeevna – Limited Liability Company “Narzan-hydroresources”; e-mail: irinapomelyayko@rambler.ru; 43, Kirov street, Kislovodsk, Stavropol region, 357700, Russia; phone: +78793729139; hydrogeology-engineer.

УДК 681.513

Н.К. Полуянович, Ю.П. Волощенко, И.И. Шушанов

**АНАЛИЗ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ ТЯГОВЫХ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЧЕРЕЗ
КОНТАКТНУЮ СЕТЬ***

Приводятся результаты численных экспериментов с использованием многошагового метода Адамса-Бэшфорта-Мултона PECE с переменным шагом, который позволяет достигать необходимую точность численного решения при приемлемых затратах вычислительных ресурсов, а также отвечает требованиям предъявляемым к методам решения жестких систем дифференциальных уравнений. Обобщена структура и рассчитано КПД рекуперации при взаимодействии тяговых электроприводов двух электроподвижных составов через контактную сеть.

Тяговый электропривод; электроподвижной состав; рекуперация энергии.

* Работа поддержана грантом РФФИ №12-08-13112 офи_м_РЖД «Разработка методов оптимизации энергопотребления электропоездов в динамических режимах на базе комплексной системы управления движением и энергоснабжением».

N.K. Poluyanovich, Yu.P. Voloshenko, I.I. Shushanov

THE ANALYSIS OF MODEL OF INTERACTION OF SYSTEMS OF TRACTION ELECTRIC DRIVES THROUGH THE CONTACT NETWORK

Results of numerical experiments are given with use of a multistep method of Adams-Beshforta-Multona of PECE with a variable step which allows to reach necessary for the accuracy of the numerical decision at acceptable expenses of computing resources, and also answers demands made to methods of the decision of rigid systems of the differential equations. The structure is generalized and is calculated by recovery efficiency at interaction of traction electric drives of two electrorolling stocks through a contact network.

Traction electric drive; electrorolling stock; energy recovery.

Введение. В настоящее время в системах электрической тяги электроподвижного состава (ЭПС) используется значительная доля электропривода постоянного тока [1, 2], включающего двигатели с последовательным возбуждением и системы управления с широтно-импульсным регулированием тока. Основным эффектом экономии электроэнергии в тяговом электроприводе (ТЭП) достигается за счёт максимального повторного использования энергии.

Математические модели импульсных преобразователей. Выбор наилучшего варианта системы управления ТЭП в задачах повышения эффективности, а именно снижению потерь электрической энергии, сводится к поиску экстремума функционала качества вида [3]

$$I = \int_{t_0}^{t_1} F(A, P, t) dt. \quad (1)$$

В общем виде математическая модель импульсной системы преобразования энергии (ИСПЭ) [3] имеет вид:

$$\frac{d\vec{A}}{dt} = F(t, \vec{A}), \quad \frac{d\vec{B}}{dt} = G(t, \vec{A}, \vec{B}), \quad (2)$$

где $\vec{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}'$ – вектор переменных состояния энергетической подсистемы ИСПЭ (знак «'» здесь и далее означает транспонирование); $\vec{B} = \{B_1, B_2, \dots, B_m\}'$ – вектор переменных состояния информационной подсистемы ИСПЭ; $\vec{F} = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}'$, $\vec{G} = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}'$ – векторные функции; n и m – порядок подсистем.

Кусочно-непрерывные векторные функции \vec{F} и \vec{G} терпят разрывы первого рода на поверхностях

$$\xi_i(t, \vec{A}, \vec{B}) = 0, \quad (3)$$

где ξ_i – функция коммутации ИСПЭ ($i = 1, 2, \dots, k$),

а также на поверхностях

$$\xi_i(t, \vec{A}, \vec{B}) = \xi_i(t + T, \vec{A}, \vec{B}), \quad (4)$$

где T – период синхронизации ШИМ ($i = 1, 2, \dots, j; j \leq k$).

Функции коммутации ИП ξ_i ($i = 1, 2, \dots, j$) определяют состояние управляемых, а ξ_i ($i = j+1, j+2, \dots, k$) – неуправляемых ключевых элементов.

Значение импульсной функции Q_i определяется функцией коммутации ξ_i :

$$Q_i = (\text{sign}(\xi_i) + 1)/2, \quad (5)$$

где $\text{sign}(\xi)$ принимает значения «1» и «-1» в соответствии со знаком ξ .

Требованиями к СУ тягового электропривода постоянного тока являются: обеспечение синхронной динамики при различных скоростях движения и мощностях других транспортных средств, находящихся на том же участке контактной сети; минимизация длительности переходных процессов и их аperiodический характер; минимизация статической ошибки регулирования; снижение потерь электрической энергии, рассеиваемой на тормозных и балластных сопротивлениях.

Структура и динамика импульсных регуляторов определяются способом модуляции, она определяется как результат решения функционального уравнения [3]:

$$F(\delta(t - (k - 1)T)) - f_0(t - (k - 1)T) = 0, \quad (k - 1)T \leq t \leq kT, \quad (6)$$

где $F(\delta(t))$ – некоторый функционал от сигнала рассогласования; T – период синхронизации ШИМ; $f_0(t)$ – опорная функция (сигнал пилообразной формы).

Системы с модуляцией заднего фронта и пилообразной опорной функцией, определяемой как (7) а функции коммутации (8).

$$f_G(t) = U_G \left(\frac{t+t_0}{T} - \left(\frac{t+t_0}{T} \right) \text{mod} 1 \right), \quad (7)$$

где U_G – амплитуда пилообразного напряжения; t – время; t_0 – начальное время, меньшее, чем T , и различное для независимо работающих регуляторов.

$$\xi(t, B(t)) = \varepsilon(t) - f_G(t), \quad (8)$$

где ε – сигнал с выхода корректирующего устройства (КУ).

Регулятор тока реализующий ШИМ заднего фронта приведен на рис. 1,а, где ГЛИН – генератор пилообразного напряжения, x – регулируемая величина (ток якоря ДПТ); β – коэффициент передачи датчика тока; U_y – опорное напряжение; – сигнал рассогласования на входе КУ, а временные диаграммы на рис. 1,б. Частота синхронизации ШИМ f ограничена снизу допустимым размахом пульсаций и условиями обеспечения непрерывности тока якоря двигателя, а сверху – быстродействием силового ключа и допустимыми потерями энергии в преобразователе.

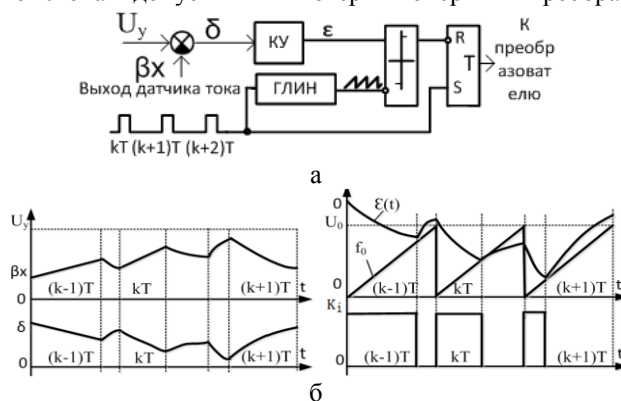


Рис. 1. а – типовая структура ШИМ; б – временные диаграммы ШИМ

Модель взаимодействия ТЭП на участке контактной сети. Исследуется режим реостатно-рекуперативного торможения, когда на участке контактной сети находятся два ЭПС, функционирующих в различных режимах рис. 2, где: ИПП и ИПТ – импульсные преобразователи в режиме пуска и торможения соответственно.

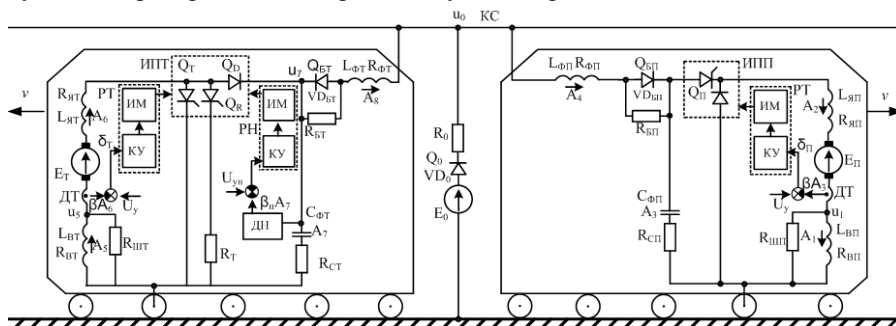


Рис. 2. Модель взаимодействия силовой подсистемы двух ТЭП ЭПС

Переменные состояния системы определяются векторами \vec{A} и \vec{B} . Вектор \vec{A} объединяет переменные состояния силовой части системы: вагона, находящегося в режиме пуска (A_1 – ток обмотки возбуждения; A_2 – ток якоря; A_3 – напряжение на конденсаторе фильтра; A_4 – ток реактора фильтра) и вагона, находящегося в режиме торможения (A_5 – ток обмотки возбуждения; A_6 – ток якоря; A_7 – напряжение на конденсаторе фильтра; A_8 – ток реактора фильтра при $Q_0=1$). Вектор \vec{B} объединяет переменные состояния информационной части системы (корректирующих устройств регуляторов) – напряжения на выходе интеграторов: B_1 – ПИ-звена и B_2 – ЦКУ (для режима пуска), B_3 – ПИ-звена и B_4 – ЦКУ (для режима торможения), B_5 – регулятора напряжения.

Импульсные функции, соответствующие ключевым элементам, определяется согласно формуле (4) и могут принимать значения 0 и 1. Напряжение в точке, где объединяются ток рекуперации и ток, потребляемый из контактной сети, с учётом этих обозначений система ОДУ для вектора \vec{A} (см. рис. 2):

$$u_0 = Q_0(E_0 - R_0(A_4 - A_8)) + (1 - Q_0) \left(u_3 + R_{\Phi\Pi}A_4 + L_{\Phi} \frac{dA_4}{dt} \right). \quad (9)$$

Сигнал рассогласования регулятора напряжения:

$$\delta_H = (\beta_H u_7 - U_H)(\text{sign}(\beta_H u_7 - U_H) + 1)/2, \quad (10)$$

где β_H – коэффициент преобразования датчика напряжения, снимаемого с конденсатора фильтра; U_{YH} – уставка напряжения.

$$\begin{cases} \dot{A}_1 = (u_1 - R_B A_1)/L_B, \\ \dot{A}_2 = (Q_{\Pi} u_3 - R_{\text{я}} A_2 - u_1 - E_{\Pi})/L_{\text{я}} \\ \dot{A}_3 = (A_4 - Q_{\Pi} A_2)/C_{\Phi} \\ \dot{A}_4 = (Q_0 u_0 + (1 - Q_0)(u_7 - R_{\Phi T} A_4) - R_{\Phi\Pi} A_4 - u_3)/((2 - Q_0)L_{\Phi}) \\ \dot{A}_5 = (u_5 - R_B A_5)/L_B \\ \dot{A}_6 = (E_T - u_5 - R_{\text{я}} A_6 - (1 - Q_T)(Q_R(Q_D u_7 + (1 - Q_D)R_T A_6) + (1 - Q_R)u_7))/L_{\text{я}} \\ \dot{A}_7 = ((1 - Q_T)((1 - Q_R) + Q_R Q_D)A_6 - i_8)/C_{\Phi} \\ \dot{A}_8 = Q_0(u_7 - R_{\Phi T} A_8 - u_0)/L_{\Phi} + (1 - Q_0)\dot{A}_4. \end{cases} \quad (11)$$

Функции коммутации, соответствующие Q_R , Q_0 и Q_D ,

$$\xi_R = B_5, \quad \xi_0 = u_0 - E_0, \quad \xi_D = R_T A_6 - u_7. \quad (12)$$

Система ОДУ для вектора \vec{B} :

$$\begin{cases} \dot{B}_1 = (\delta_{\Pi} - B_1 - B_2)/\tau \\ \dot{B}_2 = (-\varepsilon_{\Pi} - B_2/k_s)/\tau_s \\ \dot{B}_3 = (\delta_T - B_3 - B_4)/\tau \\ \dot{B}_4 = (-\varepsilon_T - B_4/k_s)/\tau_s \\ \dot{B}_5 = (-\delta_H - B_5)/\tau_H \end{cases} \quad (13)$$

Электроподвижной состав участка контактной сети имеет параметры элементов силовой части: $f=400$, Гц; $E_0=550$, В; $L_{\text{я}}=3,32$, мГн; $R_{\text{я}}=43$, мОм; $L_B=1$, мГн; $R_B=27$, мОм; $R_{\text{SCH}}=0.615$ Ом; $a=1$; $b=600$; $L_{\Phi}=0,8$ мГн; $R_{\Phi}=12,3$ мОм; $R_b=0.46$ Ом; $C=2400$, мкФ; $\text{tg}\delta=0,1$; $R_i=1.84$, Ом; $\beta=0,01$; $U_{\gamma}=3$ В; $\beta_H=0.01$; $U_{YH}=7.3$; $R_C=16.6$ мОм; $k=0.25$; $\tau=0.025$; $\alpha=2.5$; $\tau_s=0.025$; $k_s=0.4$; $\tau_H=0.75$.

Численный метод исследования математических моделей ТЭП. Полученная система дифференциальных уравнений решается с помощью метода Адамса-Бэшфорда–Мултона РЕСЕ с переменным шагом численного интегрирования. Выбор метода обусловлен требованием достижения необходимой точности численного решения при приемлемых затратах вычислительных ресурсов, от которых зависит время вычисления. Точности численного решения и время расчетов во многом

зависят от выбора шага интегрирования, порядка локальной ошибки и численной устойчивости метода – невозрастания локальной ошибки при переходе к следующему шагу интегрирования. Формулы записи k-шагового метода Адамса с переменным шагом численного интегрирования для метода прогноза и коррекции при одной итерации выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned}
 P: y_{n+1}^p &= y_n + \sum_{i=0}^{k-1} g_{i1} f_{n,n-1,\dots,n-i} \\
 E: f_{n+1}^p &= f(x_{n+1}, y_{n+1}^p) \\
 C: y_{n+1} &= y_{n+1}^p + g_{k1} f_{n+1,n,\dots,n-k+1}^p \\
 E: f_{n+1} &= f(x_{n+1}, y_{n+1}).
 \end{aligned}$$

где $f_{n,n-1,\dots,n-i}$ обозначает i-ю разделенную разность, определяемую формулой

$$f_{n,n-1,\dots,n-i} = \frac{f_{n,n-1,\dots,n-i+1} - f_{n-1,n-2,\dots,n-i}}{x_n - x_{n-i}}.$$

Коэффициенты находятся в процессе численного интегрирования из соотношений:

$$g_{0j} = \frac{(x_{n+1} - x_n)^j}{j!}; \quad g_{ij} = (x_{n+1} - x_{n-i+1})g_{i-1,j} - jg_{i-1,j+1}.$$

Точность методов зависит от того, с какой эффективностью можно предсказать поведение функции по ее известным значениям, что влияет на выбор порядка и шага интегрирования.

Условия функционирования системы в области синхронной динамики.

Оптимизируемые параметры ПИ-регулятора тока [3] включают параметры U_G , α , k , τ , обеспечивающие синхронную динамику во всём диапазоне изменения скоростей. Коэффициент заполнения импульсов γ в режиме пуска аппроксимируется функцией

$$\gamma = \frac{n(1-a\Delta)}{d(u_0 - E_0) + c} + d, \quad (19)$$

где a , b , c , d – коэффициенты аппроксимации функции $y = f(n)$; Δ – статическая ошибка регулирования; u_0 – напряжение контактной сети в точке W ; E_0 – номинальное напряжение контактной сети. Для сравнения результатов исследования динамики выбран коэффициент заполнения γ , а для процессов отличных от синхронного, – параметр γ^* , который определен как значение коэффициента заполнения, требуемое при значениях n , u_0 , E_0 и Δ . Задаемся фиксированными значениями постоянной времени ПИ-регулятора ($4T$, $8T$, $12T$, $16T$).

Энергетическая эффективность системы. На участке контактной сети могут находиться m и n единиц ЭПС в режимах пуска и торможения соответственно. Соотношение потребляемого тока I_{Π} к максимальному току рекуперации I_T :

$$\varphi = I_{\Pi}/I_T = \sum_{i=1}^m K_{\Pi i} \gamma_{\Pi i} / \sum_{i=1}^n K_{T i} \gamma_{T i}, \quad (20)$$

где γ_{Π} и γ_T – коэффициенты заполнения импульсов в преобразователях; K_{Π} и K_T – коэффициенты двигателей при наличии сопротивлений в цепях якоря и фильтра.

Для моделирования процесса взаимодействия ТЭП через контактную сеть использована схема силовой части системы, рис. 3 и модели регуляторов с ШИМ: $\Psi=2$ и $k=0,25$ [3]. Постоянной времени регулятора напряжения τ_{Π} находится в пределах $(5..20)T$. При $\tau_H > 20T$ замедляются переходные процессы при переходе от реостатного торможения к рекуперативному, вследствие чего снижается энергетическая эффективность системы. Выбор уставки регулятора определяется напряжением контактной сети и пульсациями напряжения на конденсаторе фильтра.

$$U_H = K\beta_H(u_0 + \Delta u_0), \quad (21)$$

где K – повышающий коэффициент, учитывающий возможное повышение пульсаций в переходных режимах (примем $K=1,2$); β_H – коэффициент передачи измерительного преобразователя напряжения.

Если уставка меньше определённой (21), это означает снижение КПД рекуперации. Значение уставки регулятора напряжения, превышающие определённое по формуле (21), приводят к повышению потерь в конденсаторах фильтров, а также к квазипериодическим колебаниям в цепи фильтров и в якорных цепях при малом u_R^* . При напряжении сети 550–600 В принимаем значение $R_{T0}=1,9$ Ом, введем параметр

$$Y = \frac{R_T}{R_{T0}}. \quad (22)$$

КПД рекуперации определено как соотношение мощности, возвращаемой в контактную сеть объектом, находящимся в режиме торможения, к мощности, которая может быть потреблена объектом, находящимся в режиме пуска:

$$\eta_P = \int_0^{mT} i_8 di_8 / \int_0^{mT} A_4 dA_4, \quad (23)$$

где m – число периодов усреднения (для процессов отличных от синхронного); i_8 и A_4 – токи соответственно в дросселях фильтров взаимодействующих ЭПС (рис. 3, КПД).

Вероятность выхода ТЭП из области синхронной динамики имеет место при приближении коэффициента заполнения импульсов:

- ◆ регулятора тока к 1;
- ◆ регулятора напряжения к 0;
- ◆ при возникновении в цепи фильтра квазипериодических колебаний.

На рис. 3 приведены результаты моделирования, где A_1 – ток обмотки возбуждения; A_2 – зависимость тока якоря от времени; A_3 – напряжение на конденсаторе фильтра; A_4 – ток реактора фильтра и ЭПС, находящегося в режиме торможения; A_5 – ток обмотки возбуждения; A_6 – ток якоря; A_7 – напряжение на конденсаторе фильтра; A_8 – ток реактора; КПД – КПД рекуперации электрической энергии.

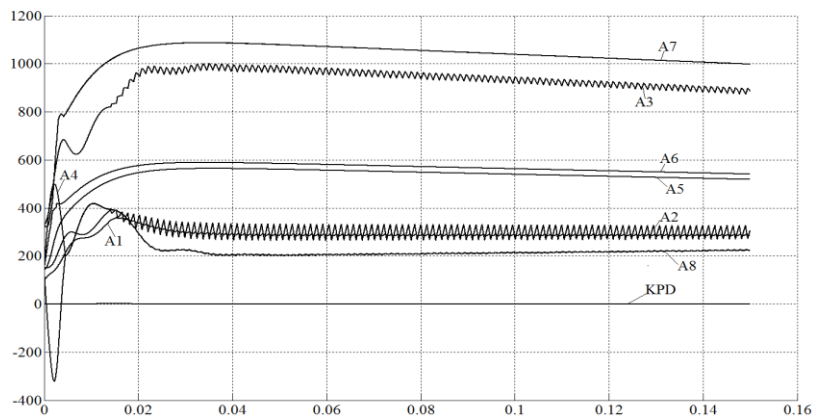


Рис. 3. Моделирование взаимодействия двух ТЭП ЭПС

Заключение

1. Исследована математическая модель тягового электропривода ЭПС с импульсным управлением при взаимодействии двух ЭПС через контактную сеть.

2. Для нормального функционирования импульсных ТЭП постоянного тока необходимо, чтобы при всех допустимых значениях коэффициента заполнения импульсов u как при пуске, так и при торможении система оставалась в области синхронной динамики независимо от наличия на участке контактной сети других объектов и режимов их функционирования.

3. Наибольший экономический эффект от внедрения систем импульсного управления тягового электропривода постоянного тока имеет место на ЭПС для которого характерны частые пуски и остановки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бахвалов Ю.А., Зарифьян А.А., Кашиников В.Н., Коллахчян П.Г., Плахов Е.М., Янов В.П. Моделирование электромеханической системы электровоза с асинхронным тяговым приводом. – М.: Транспорт, 2001.
2. Пишихов В.Х., Гайдук А.Р., Медведев М.Ю., Полуянович Н.К., Волощенко Ю.П. Энергосберегающее управление тяговым приводом электроподвижного состава // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 2 (139). – С. 192-200.
3. Тугарев А.С. Математическое моделирование взаимовлияния двух единиц подвижного состава через контактную сеть постоянного тока // Методы прикладной математики и компьютерной обработки данных в технике, экономике и экологии: Материалы всероссийской научной конференции. – Орёл: Орёл ГТУ, 2004. – С. 225-228.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Э. Бурлаков.

Полуянович Николай Константинович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: nik1-58@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44; тел.: 89185693365; кафедра электротехники и мехатроники; доцент.

Волощенко Юрий Петрович – e-mail: yvoloshchenko@yandex.ru; тел.: 89185405991; кафедра электротехники и мехатроники; доцент.

Шушанов Иван Иорданович – e-mail: shu-van@yandex.ru; тел.: 89526070670; студент.

Poluyanovich Nikolaj Konstantinovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: w_m88@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79185693365; the department of electric technics and mechatronics; associate professor.

Voloshenko Yuriy Petrovich – e-mail: yvoloshchenko@yandex.ru; phone: +79185405991; the department of electric technics and mechatronics; associate professor.

Shushanov Ivah Iordanovich – e-mail: shu-van@yandex.ru; phone: +79526070670; student.

УДК 004.44

М.Ю. Поленов

ОРГАНИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СРЕДСТВ ПОДДЕРЖКИ МНОГОКРАТНО ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МОДЕЛЕЙ

Рассматривается организация инструментария для моделирования сложных технических объектов, позволяющего реализовать поддержку многократного использования моделей, разработанных ранее в различных системах моделирования на различных языках и форматах описания. Данные средства представляют собой совокупность объединенных в единую программную оболочку модулей описания, редактирования, импорта/экспорта и распределенного хранения моделей. В качестве промежуточного описания и формы хранения моделей в этих средствах используется XML-формат, а сами средства имеют клиент-серверную архитектуру.

Системы моделирования; многократно используемые модели; трансляция моделей; XML-формат; распределенная база данных моделей.