

tvМІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»**

Серія: Автоматика та приладобудування

№ 15 (1058) 2014

Збірник наукових праць

Видання засноване у 2001 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2014

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків. : НТУ «ХПІ». – 2014. – № 15 (1058). – 162 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською та російською мовами.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого Постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р., № 1 – 05/4 (Бюлетень ВАК України, № 6, 2010 р., с. 3, № 20).

Координаційна рада:

Л. Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф. (**голова**);

К. О. Горбунов, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є. І. Сокол, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;

Є. С. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.;

Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.;

А. І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;

В. Д. Дмитриченко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.;

В. В. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.;

П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.;

С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В. М. Кошельник, д-р техн. наук, проф.;

В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.;

О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; В. І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.;

Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В. А. Пуляев, д-р техн. наук, проф.;

М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.;

Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; Ю. В. Тимофієв, д-р техн. наук, проф.;

М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: А.М. Борисенко, д-р техн. наук, проф.

Члени редколегії: П.Ф. Щапов, д-р техн. наук, проф.; А.І. Гапон, канд. техн. наук, проф.;

О.Л. Резинкін, д-р техн. наук, с.н.с.; І.Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.; Л.В. Дербунович,

д-р техн. наук, проф., О.І. Рогачов д-р техн. наук, проф.; Л.Г. Раскін, д-р техн. наук, проф.;

С.І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; С.М. Порошин,

д-р техн. наук, проф.; М.В. Гунбин, канд. техн. наук, доц.; М.І. Корсунов, д-р техн. наук,

проф.; Д.В. Сперанський, д-р техн. наук, проф. (м. Москва);

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 4 від 4 квітня 2014 року.

Н.А. БАЛОНИН, д-р техн. наук, доц., Государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург;
В.С. СУЗДАЛЬ, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков;
Ю.С. КОЗЬМИН, канд. техн. наук, Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ ПРОСТОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Для систем управления процессами кристаллизации решается задача достижения желаемых показателей качества методами модального управления. Синтез проводится на основе анализа мер модального доминирования собственных значений матрицы состояний объекта управления.

Ключевые слова: монокристалл, метод Чохральского, система, управление, качество, доминирование.

Введение. Несмотря на интенсивное развитие различных направлений теории оптимального автоматического управления (H_2 , H_1 , H_∞ оптимизация), в промышленности наиболее популярными, по-прежнему, остаются простые регуляторы (регуляторы низкого порядка с фиксированной структурой), которые проще для понимания разработчиками и заказчиками, менее требовательны к вычислительным ресурсам. Самой распространенной структурой в промышленных системах управления, в том числе и при выращивании монокристаллов, является ПИД-регулятор. К настоящему времени ставится вопрос о развитии методов создания оптимальных регуляторов простой структуры, которые дают возможность повысить качество решения задач управления для систем выращивания монокристаллов.

Анализ основных достижений и публикаций. В работе [1] представлен обзор целого ряда подходов к синтезу регуляторов заданной структуры и пониженного порядка для линейных стационарных систем. Рассматриваются методы прямого (на основе редукции модели) и косвенного (на основе линейных матричных неравенств) построения регуляторов пониженного и заданного порядка в задачах ковариационного управления, синтез регуляторов на основе методов H_∞ оптимизации.

Формирование целей и задач. На наш взгляд, к построению простых регуляторов приводит и метод модального управления, которое обычно решается на основе выбора спектра динамической системы, т.е. размещения ее собственных значений, с целью достижения целей управления.

По сравнению с ПИД–регулятором, естественные преимущества которого, это "некоторая коррекция" динамики, которую можно даже не знать, модальное управление учитывает моды, т.е., опирается на знание реального объекта. Поэтому, естественно появился такой регулятор в сочетании с идентификатором. Идентификация уточняет динамику, а модальный регулятор разворачивается вслед этим уточнениям [2].

Целью настоящей работы является синтез модального управления для процессов выращивания монокристаллов. Для достижения поставленной цели необходимо для многосвязной системы осуществить выбор спектра замкнутой системы на основе анализа мер модального доминирования собственных значений матрицы состояний объекта управления.

Материалы исследований: уравнения модального синтеза. Рассмотрим систему в пространстве состояний

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu, & x(t_0) = x_0, \\ y = Cx, \end{cases} \quad (1)$$

где $x \in R^n$ – вектор состояния, $y \in R^l$ – выходной вектор, $u \in R^m$ – вектор управления, x_0 – начальные условия, т.е. состояние системы в начальный момент времени t_0 . A, B, C – постоянные матрицы соответствующих размеров.

Модальный синтез связан с непосредственным управлением модами (тонами собственных колебаний). Для многосвязных систем выбор спектра обычно выливается в малоприятную проблему манипулирования большим количеством собственных значений, что существенно осложняет процесс исследования их влияния на поведение динамической системы.

В [2] предложено выбор собственных значений замкнутой системы проводить на основе анализа мер модального доминирования μ собственных значений матрицы A . Введение меры модального доминирования дает формальную оценку подвижности "позиций" собственных значений.

$$\mu = v^T B B^T v, \quad (2)$$

где v – левый собственный вектор матрицы A .

Спектр, т.е. матрица $Q = A - BK$ замкнутой динамической системы, зависит от назначаемой матрицы K обратных связей модального регулятора $u = -Kx$ (или наблюдающего устройства, т. к. эти задачи двойственны).

Пусть $Q = XDX^{-1}$ – спектральное разложение матрицы Q , где D – диагональная матрица ее собственных значений, X – столбцовая матрица собственных векторов. Система с матрицей $Q = A - bK$ при скалярном входе $b = Bm$, где m – весовые множители, эквивалентна системе с расширенной матрицей входа $\underline{B} = [b \quad b \quad \dots \quad b]$, при условии, что количество входов си-

стемы равно размерности вектора состояния, но все вектор-столбцы одинаковы, причем $A - Q = \underline{B} \underline{K}$, где \underline{K} – матрица расширенного регулятора.

Пусть $AX - XD = [b \ b \ \dots \ b]$, т.е. $\underline{K}X$ – единичная матрица $\underline{K} = X^{-1}$. В силу линейности система с одним входом зависит от обратной связи $u = -Kx$, где

$$K = [1 \ 1 \ \dots \ 1]X^{-1}, \quad (3)$$

т.е. K , равен сумме левых собственных векторов матрицы Q . Если регулятор не меняет спектр и собственные векторы матрицы A , матричное уравнение представляет собой спектральное разложение матрицы A : $AX - XD = 0$, $A = XDX^{-1}$.

Собственный вектор матрицы Q задается неоднородным уравнением

$$(A - \lambda I)x = b, \quad (4)$$

которое при $b=0$ описывает собственные векторы матрицы A , λ – собственные значения. Годограф собственных векторов матрицы Q , ее резольвента, содержит сингулярности (разрывы) в точках спектра матрицы A . Если меняется только часть спектра матрицы A , то нулевые столбцы $B = [b \ b \ \dots \ b, \ 0, \ 0, \ \dots, \ 0]$ отвечают неизменяемым собственным векторам.

Значение резольвенты подчеркивается тем, что вектор-строка коэффициентов обратных связей K модального регулятора $u = -Kx$ равна сумме левых собственных векторов Q , отвечающих ее отличным от спектра матрицы A собственным значениям. При изменении только одного собственного значения, матрица K равна соответствующему левому собственному вектору Q . Вектор столбец эквивалентного входа $b = Bm$ может быть единым для всех изменяемых собственных значений, но у многосвязных систем на решение можно повлиять, назначая его индивидуально.

Одна из осмысленных и вполне достижимых целей при выборе эквивалентного входа, состоит в сближении собственных векторов матриц A и Q . Существует и такой вариант постановки задачи, как управление собственными векторами Q при неизменном ее спектре, совпадающем с A .

Объект управления. Крупногабаритные скинтилляционные монокристаллы (СМК) весом до 500 кг выращивают в промышленности методом Чохральского на установках типа «РОСТ» [3]. На этих установках практически реализованы процессы управляемой кристаллизации из расплава на затравку, с использованием для управления информации о положении уровня расплава. В основе выращивания монокристаллов из расплава методом Чохральского заложены принципы направленной кристаллизации, которая всегда осуществляется при наличии и взаимодействии двух направленных потоков – переноса энергии в форме тепла и межфазного массопереноса (рис 1). Поскольку растущий кристалл не имеет контакта со стенками тигля, а форма и

размер образца определяются капиллярными силами и условиями тепломассообмена в системе кристалл-расплав, то к основным параметрам технологического процесса относят характерный размер (диаметр D_s) цилиндрического образца, положение фронта кристаллизации относительно свободной поверхности расплава h и уровень расплава в тигле H .

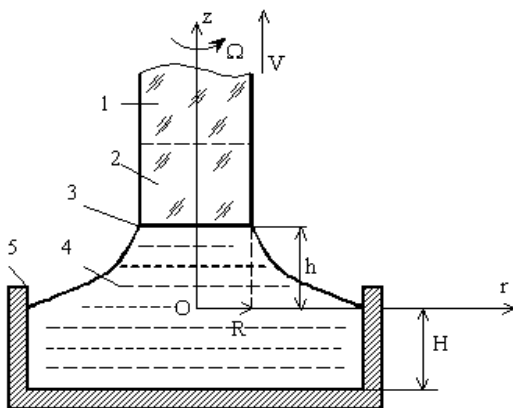


Рис. 1 – Схема выращивания методом Чохральского:

1 – затравка, 2 – кристалл, 3 – фронт кристаллизации, 4 – расплав, 5 – тигель, R – радиус кристалла, h – высота фронта кристаллизации, H – уровень расплава в тигле, V – скорость вытягивания кристалла, Ω – угловая скорость вращения кристалла, zOr – система координат.

Процесс выращивания включает в себя несколько основных этапов: инициирования роста монокристалла с помощью затравочного кристалла (затравливание) и вытягивания образца сначала с переменным сечением (разращивание кристалла по диаметру), а затем с постоянным сечением (рост по высоте). Диаметр растущего кристалла управляют, изменяя тепловые условия выращивания. Система управления должна обеспечивать приемлемое качество переходных процессов, необходимую точность и устойчивость управления.

Затравливание и разращивание кристалла ведется в ручном режиме без включения обратной связи в системе управления. Система управления диаметром монокристалла и температурой подпиточного расплава включается с началом роста кристалла по высоте. Этот момент определяет начальные условия управления.

Процесс выращивания крупногабаритных СМК сопровождается заменой расплава кристаллизующей средой и перераспределением масс расплава и кристалла в рабочем пространстве ростовой установки. На разных стадиях выращивания изменяются все характеристики теплового поля – значения

температур расплава и кристалла, параметры теплопереноса, положение фронта кристаллизации и величина градиента температуры в области фронта кристаллизации, т.е. процесс кристаллизации, является нестационарным.

Исследования процесса кристаллизации крупногабаритных СМК показывают, что процесс роста монокристалла по высоте можно условно разбить на несколько дополнительных интервалов, в пределах которых тепловые условия кристаллизации, являются стационарными. Это позволяет использовать на этих интервалах выращивания модальные регуляторы.

Результаты исследований: синтез управления. Пусть в пространстве состояний объект управления (ОУ) описывается системой (1). Моделирование процесса выращивания, как ОУ, проводилось на примере получения крупногабаритных активированных монокристаллов. Процесс выращивания рассматривался как многосвязный ЛТИ-объект управления с двумя входными величинами – температура основного Td и температура дополнительного нагревателя Tb и двумя выходами – диаметр кристалла Ds и температура подпиточного расплава Tr [3].

На одном из интервалов роста монокристалла по высоте модель ОУ в отклонениях от установившегося режима в пространстве состояний имеет следующие матрицы:

$$A = \begin{bmatrix} x1 & x2 & x3 & x4 \\ x1 & 0 & -1,4969 & 0 & 0 \\ x2 & 1 & -5,6514 & 0 & 0 \\ x3 & 0 & 0 & 0 & -0,4322 \\ x4 & 0 & 0 & 0,5 & -3,1241 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} u1 & u2 \\ x1 & -0,5126 & 2,1445 \\ x2 & 0,2695 & 5,8534 \\ x3 & 0,1458 & -0,1969 \\ x4 & 0,8494 & -0,4142 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} x1 & x2 & x3 & x4 \\ y1 & 0 & 4 & 0 & 0 \\ y2 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix}.$$

Объект управления полностью управляем и наблюдаем.

Известно, что в благополучно устроенной процедуре, анализ свойств ОУ всегда предшествует синтезу управления и дает для него важнейшие ориентиры [2].

Анализ. Столбцовая матрица собственных векторов матрицы A

$$U_A = \begin{bmatrix} 0,9831 & 0,2684 & 0 & 0 \\ 0,1830 & 0,9633 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,9869 & 0,1401 \\ 0 & 0 & 0,1616 & 0,9901 \end{bmatrix}.$$

В табл. 1 для ОУ приведен спектр (собственные значения λ_i) и меры модального доминирования μ_i собственных значений по управлению, вычисленные по выражению (2).

Таблица 1– Собственные значения и меры модального доминирования ОУ

Собственные числа	-5,37	-0,28	-3,05	-0,07
Меры доминирования	35,82	0,70	0,88	0,02

Из таблицы следует, что первая мода диспропорционально доминирует, менять ее особенно легко. Судя по мерам доминирования, наиболее тяжело, должно быть, менять моды -0,28 и -0.07.

Синтез. Зададим разовое смещение собственных чисел λ_1 на -0,123 и λ_3 на -0,02. По выражению (4) найдем собственные вектора X_i замкнутой системы

$$X_1 = (A - \lambda_1 I) \setminus B_1,$$

$$X_2 = (A - \lambda_3 I) \setminus B_2,$$

где B_1 и B_2 столбцы матрицы B .

Матрица регулятора $K = [X_1 \ X_2]^{-1}$:

$$K = \begin{bmatrix} -0,1589 & -0,0315 & 0,0010 & -0,0080 \\ -0,0006 & -0,0003 & -0,0137 & -0,0022 \end{bmatrix}.$$

Для замкнутой динамической системы матрица $Q = A - BK$ и матрица собственных векторов, соответственно, будут:

$$Q = \begin{bmatrix} -0,0802 & -1,5123 & 0,0300 & 0,0007 \\ 1,0462 & -5,6411 & 0,0801 & 0,0152 \\ 0,0231 & 0,0045 & -0,0029 & -0,4315 \\ 0,1348 & 0,0266 & 0,4934 & -3,1183 \end{bmatrix},$$

$$U_Q = \begin{bmatrix} -0,2993 & 0,0253 & -0,9794 & -0,0461 \\ -0,9470 & 0,1238 & -0,1974 & -0,0240 \\ 0,0178 & 0,1413 & 0,0043 & -0,9859 \\ 0,1156 & 0,9819 & -0,0424 & -0,1593 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, матрица U_Q существенно отличается от матрицы U_A только первым и вторым столбцами. Фробениусова норма матрицы K : 0.3028. Затраты модального регулятора, оцениваемые, в нашем случае, нормой матрицы обратных связей, в общем, складываются из затрат на изменение темпов (модули собственных значений) и формы траекторий (собственные векторы). Поэтому, как уже отмечалось, при синтезе модального управления многосвязной системой одна из осмысленных и вполне достижимых целей состоит в сближении собственных векторов матриц A и Q , что отвечает естественной цели получить реализуемый на практике регулятор.

В табл. 2 приведен спектр и меры модального доминирования для замкнутой системы.

Таблица 2 – Собственные значения и меры модального доминирования замкнутой системы

Собственные числа	-5,25	-0,37	-3,07	-0,07
Меры доминирования	37,01	0,52	0,95	0,02

Сравнение спектра и мер модального доминирования для ОУ и замкнутой системы показывает, что синтез изменил собственные значения λ_1 , λ_2 , λ_3 и их меры доминирования. Увеличились и преобладают меры доминирования собственных значений λ_1 и λ_3 .

На рис. 2 приведены переходные характеристики ОУ и замкнутой системы (ЗС) по каналу: температура донного нагревателя Td – диаметр кристалла Ds .

Длительность переходного режима для объекта управления составляет 15 с, для замкнутой системы – 10 с. Это стандартное отображение качества управления для инерционных ОУ, каким является процесс выращивания крупногабаритных монокристаллов.

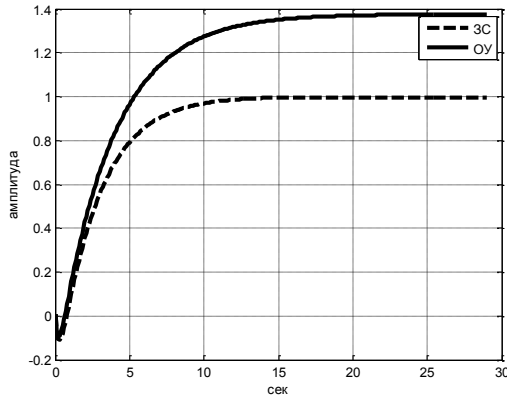


Рис. 2 – Переходные характеристики ОУ и замкнутой системы

Можно сделать вывод, что синтезированный регулятор вполне приемлем для управления выращиванием СМК. Однако, в производственных условиях процесс выращивания часто подвержен действию кратковременных возмущений тепловых условий, что может привести к неравномерному распределению (захвату) активатора по высоте кристалла. Этот процесс резко ухудшает качество конечной продукции. Замкнутая система с синтезированным регулятором имеет в канале управления диаметром монокристалла быстрое доминирующее собственное значение $\lambda_1 = -5,25$ с, $\mu_1 = 37,01$ (см. табл. 2), которое позволит отреагировать на такое возмущение и уменьшить его влияние на качество монокристалла. Таким образом, данные табл.2 в большой степени характеризуют качество управления процессом кристаллизации, синтезированным регулятором, так как λ_i и μ_i отражают доминирование и темпы реакций в замкнутой системе (у многосвязных систем они заменяют понятие моментов передаточной функции).

Выводы. Для многосвязного процесса выращивания крупногабаритных СМК проведен синтез в пространстве состояний модального регулятора, опираясь на метод модального доминирования при одиночном смещении части собственного спектра объекта управления. Модальный синтез не фробениусов, проводился в собственном базисе.

Проведенный синтез подтвердил обоснованность основной идеи, относительно адаптации собственного пространства в многосвязных динамических системах, у которых количество входов, как правило, уступает размерности вектора состояния: ни спектр, ни собственные векторы в процессе модального управления не стоит менять без особой необходимости, а только с привлечением анализа на первой стадии процедуры синтеза.

Аналитическое решение задачи возможно не только при разовой, но и при итерационной подвижке собственных значений, одно за другим, когда можно оценить меру модального доминирования каждого собственного значения и норму матрицы обратных связей модального регулятора при одиночном изменении спектра.

Результаты синтеза, а, именно, длительность переходного процесса в замкнутой системе, отсутствие перерегулирования и табличные данные показывают, что синтезированная система удовлетворяет требованиям к качеству управления при выращивании крупногабаритных СМК.

Список литературы: 1. *Бойченко В. А.* Некоторые методы синтеза регуляторов пониженного порядка и заданной структуры / *В. А. Бойченко, А. П. Курдюков, В. Н. Тимин, М. М. Чайковский, И. Б. Ядыкин* // Управление большими системами. Вып. 19. М.: ИПУ РАН. – 2007. – С. 23–126. 2. *Балонин Н. А.* Новый курс теории управления движением / *Н. А. Балонин*. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. Ун-та, 2000. – 160 с. 3. Рост кристаллов / [Горилецкий В. И., Гринев В. В., Заславский Б. Г. и др.]. – Харьков: АКТА, 2002. – 535 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Bojchenko V. A.* Nekotorye metody sinteza reguljatorov ponizhenogo porjadka i zadannoj struktury / *V. A. Bojchenko, A. P. Kurdjukov, V. N. Timin, M. M. Chajkovskij, I. B. Jadykin* // Upravlenie bol'shimi sistemami. Vyp. 19. M.: IPU RAN. – 2007. – S. 23–126. 2. *Balonin N. A.* Novyj kurs teorii upravlenija dvizheniem / *N. A. Balonin*. – SPb.: Izd-vo S.-Peterb. Un-ta, 2000. – 160 s. 3. Rost kristallov / [Gorileckij V. I., Grinev B. V., Zaslavskij B. G. i dr.]. – Kharkov: AKTA, 2002. – 535 s.

Поступила (received) 04.02.2014

А.Н. БОРИСЕНКО, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»
Б.И. КУБРИК, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ»
А.Б. БОГАЕВСКИЙ, д-р техн. наук, проф. ХНАДУ;
О.В. ЛАВРИНЕНКО, преп.-стаж., НТУ «ХПИ».

ПОСТРОЕНИЕ ОБОБЩЕННОЙ СТРУКТУРЫ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Статья посвящена созданию обобщенной структуры и построению математических моделей преобразователей параметров движения топливodoзирующего органа и скорости вращения турбокомпрессора дизель – генераторной установки с наддувом в массу дополнительного воздуха, подаваемого в дизель при набросе нагрузки.

Ключевые слова: математическая модель, дизель, клапан, двигатель.

Постановка проблемы. Дизель-электрические агрегаты получили широкое распространение в качестве источников электрической энергии во многих отраслях народного хозяйства. Для повышения энергетических показателей эти установки снабжаются автономным турбокомпрессором, подающим воздух в дизель и улучшающим, тем самым, процесс сгорания и превращения энергии топлива механическую работу. Однако в переходных режимах работы, вызванных набросами нагрузки, турбокомпрессор вследствие своей инерциальности не успевает в полной мере наращивать подачу наддувочного воздуха и рабочий процесс дизеля протекает неудовлетворительно [1]. Для улучшения последнего обеспечиваются специальные мероприятия по дополнительному воздухоснабжению дизеля [2].

Анализ литературы показывает, что в настоящее время уже имеются некоторые технические решения, обеспечивающие дополнительное воздухоснабжение дизель – генераторов с газотурбинным наддувом в переходных режимах работы [3 - 6], с учетом ряда управляющих и возмущающих воздействий. При этом, однако, отсутствует обобщенная структура преобразователя соответствующих параметров в массу дополнительного воздуха и математические модели происходящих при этом процессов.

Цель статьи. Построение математической модели и синтез обобщенной структуры преобразователя параметров управления и режима работы дизель – генератора при массе дополнительно подаваемого воздуха.

Составим математическую модель процессов, описанных в [7 - 9].

На работающем двигателе измеряются скорость движения топливodoзирующего органа V_{HP} и угловая скорость турбокомпрессора ω_k с помощью датчиков, выходные сигналы которых можно записать как

$$U_{HP} = K_{HP} V_{HP} \quad (1)$$

$$U_{TK} = K_{TK} \omega_k, \quad (2)$$

где K_{HP} – коэффициент передачи датчика скорости топливodosирующего органа, K_{TK} – коэффициент передачи датчика угловой скорости ТК.

Разностный сигнал этих датчиков интегрируется

$$U = \frac{1}{T_H} \int_{t_0}^{t_k} (K_{HP} V_{HP} - K_{TK} \omega_k) dt > 0, \quad (3)$$

где T_H – постоянная интегратора, и после усиления подается на обмотку электродинамического преобразователя (ЭДП), управляющего запорным клапаном дополнительного воздуходоснабжения.

Перемещение якоря ЭДП определяется по формуле

$$X_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{K_{\text{ЭМ}} V_{\text{Э}}}{D_3}, \quad (4)$$

$$\text{где } D_3 = \left(T_3 \frac{di}{dt} + 1 \right) \left(T_1^2 \frac{d^2 X}{dt^2} + T_2 \frac{dX}{dt} + 1 \right);$$

T_3 – электрическая постоянная времени электромагнита;

i – мгновенное значение тока в обмотке электромагнита;

X – перемещение якоря электромагнита;

$$T_1 = \sqrt{\frac{m}{k_{\Pi}}};$$

$$T_2 = \frac{\eta_{\text{ЭМ}}}{k_{\Pi}};$$

V_3 – напряжение на обмотке электромагнита;

k_{Π} – жесткость пружины электромагнита;

m – масса подвижных частей электромагнита;

$K_{\text{ЭМ}}$ – коэффициент передачи электромагнита;

$\eta_{\text{ЭМ}}$ – коэффициент демпфирования электромагнита.

$V(t) = K_{\text{PEC}} X(t)$, где K_{PEC} – коэффициент пропорциональности между выходным сечением клапана и перемещением якоря электромагнита.

Подача дополнительного воздуха приводит к увеличению давления наддува

$$P_S = P_{TK} + K_b K_{\text{PEC}} X(t), \quad (5)$$

где P_{TK} – давление наддува, создаваемое турбокомпрессором;

K_b – коэффициент пропорциональности между массой и давлением дополнительного воздуха.

При резком увеличении топливоподачи в случае наброса нагрузки сигнал (3) растет, поскольку ω_k изменяется много медленнее цикловой подачи топлива (на реальном двигателе), вызывает увеличение хода клапана, согласно (4), и подачу дополнительного воздуха в дизель, масса которого равна с учетом (3), (4), (5)

$$Q_D(t) = \frac{K_{pec}}{T_{II}} \cdot \frac{K_{ЭДП} \int_{t_0}^{t_k} (K_{HP} V_{HP} - K_{TK} \omega_k) dt}{D_3} \quad (6)$$

где $K_{ЭДП}$ – коэффициент передачи электродинамического преобразователя по перемещению.

Подача дополнительного воздуха приводит к росту ω_k , что ранее уже отмечалось, и уменьшению напряжения (3). Увеличение ω_k влечет за собой возрастание P_{TK} , а снижение напряжения на обмотке исполнительного органа (электромагнитного или электродинамического преобразователя) – снижение массы дополнительного воздуха Q_D . Однако

$$P_s = P_{TK} + K_b Q_D \approx const \quad (7)$$

При выходе дизеля в установившийся режим работы $K_{HP} V_{HP} = K_{TK} \omega_k$ и дополнительное воздухообеспечение согласно (3) отсутствует.

Таким образом, в рассмотренной модели $Q_D = Q_D(P_{TK}, h_p)$, благодаря чему имеет место согласование топливоподачи и воздухообеспечения дизеля в переходных режимах.

При плавном перемещении или неподвижном органе управления топливоподачей неравенство (3) не выполняется и дополнительный воздух не подается. Модель процессов, описанных в [8], отличается от рассмотренной выше в связи с двумя обстоятельствами. Во-первых, в переходном режиме дизеля, вызываемом набросом нагрузки, напряжение на обмотке запорного органа зависит еще и от разности фактического и минимально допустимого давлений в источнике сжатого воздуха, но не зависит от текущего значения угловой скорости ротора турбокомпрессора ω_k , во-вторых, отключение подачи дополнительного воздуха при окончании переходного процесса происходит при достижении частотой ω_k некоторого порогового значения. Таким образом, можно записать

$$U = \frac{1}{T_{II}} \int_{t_0}^{t_k} K_{HP} V_{HP} dt + K_{ДД} (P_{ИН} - P_{ИФ}) \quad (8)$$

где $K_{ДД}$ – коэффициент передачи датчика давления;

$P_{ИН}$ – минимально допустимое давление в источнике сжатого воздуха;

$P_{ИФ}$ – фактическое давление в источнике сжатого воздуха.

С учетом (8) вместо (6) запишем соотношение

$$Q_D = \frac{K_{pec}}{T_{II}} \cdot \frac{K_{ЭДП} \int_{t_0}^{t_k} K_{HP} V_{HP} dt - K_{ДД} (P_{ИИ} - P_{ИФ})}{D_3} \quad (9)$$

Кроме того, для момента отключения дополнительного воздухообеспечения имеем $Q_D = 0$ при $\omega_k = \omega_{кл}$,

где $\omega_{кл}$ – пороговое значение угловой скорости турбокомпрессора.

Процесс управления двигателем [9] отличается от предыдущего тем, что напряжение на обмотке органа управления дополнительным воздухообеспечением описывается по закону:

$$U = \frac{1}{T_{II}} \int_{t_0}^{t_{ин}} (K_{HP} V_{HP} - K_{ДД} P_{ИФ}) dt \quad (10)$$

где t_{HP} – время перемещения топливодозировочного органа.

Обобщенная блок – схема устройства подачи дополнительного воздуха в дизель показана на рис. 1.

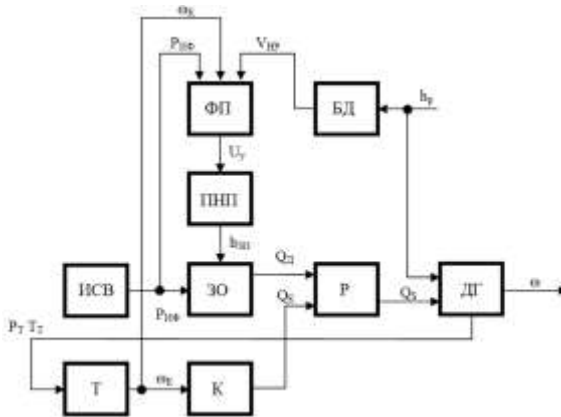


Рис. 1 – Обобщенная блок-схема устройства подачи дополнительного воздуха:

ФП – функциональный преобразователь;

БД – блок дифференцирования;

ПНП – преобразователь «напряжение – перемещение»;

ИСВ – источник сжатого воздуха;

ЗО – запорный орган;

Р – ресивер;

ДГ – дизель – генератор;

Т – турбина;

К – компрессор;

h_p, V_{HP} – выход рейки топливодозировочного органа и скорость его движения;

ω , ω_K – угловая скорость дизель – генератора и компрессора;
 P_T , T_T – давление и температура газов перед турбиной;
 Q_K , Q_S , Q_D – суммарный расход, расход наддувочного и дополнительного воздуха;
 U_y – напряжение управления;
 h_{30} – перемещение запорного органа;
 $P_{ИФ}$ – фактическое давление в источнике сжатого воздуха.

Выражения (6), (9) и (10) представляют собой математические модели, достаточно полно описывающие процессы преобразования основных параметров, таких, как скорость движения топливоподогревающего органа, угловую скорость турбокомпрессора, фактическое и номинальное давления в источнике сжатого воздуха, коэффициенты передачи и постоянные времени ресивера и электродинамического преобразователя и др. в массу дополнительного подаваемого в дизель сжатого воздуха. Эти модели легли в основу создания обобщенной структуры устройства подачи дополнительного воздуха, показанной на рисунке.

Выводы. На основании разработанных математических моделей синтезирована обобщенная структура преобразователя, обеспечивающего дополнительное воздухообеспечение дизель – генератора при набросе нагрузки и, тем самым, повышающего его технико – экономические показатели.

Список литературы: 1. Костромин А.М. Оптимальное управление локомотивом. – М.: Транспорт, 1979. – 119с. 2. Колыбин Ю.Н. Квазиоптимальные электронные регуляторы переходных режимов стационарных дизель-генераторов с дополнительным воздухообеспечением: Автореферат дис. на соискание степени кандидата технических наук/ Харьковский политехнический институт. – Харьков, 1986. – 18с. 3. Богаевский А.Б. Повышение топливной эффективности мощной транспортной дизельной установки за счет применения микроконтроллерного регулятора частоты вращения и мощности. / А.Б. Богаевский // Сборник доклады, XI научно – техническая конференция с международно участие, «Транспорт, экология - устойчиво развитие», ЕкоВарна. – 2005. – с. 459 – 463. 4. Богаевский А.Б. Определение параметров управления мощной транспортной дизель – генераторной установкой в переходных режимах. / А.Б. Богаевский // Вестник НТУ «ХПИ», тем. вып. «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». Харьков. – 2005. - №45. – с. 291 – 292. 5. Богаевский А.Б. Применение электромагнитных исполнительных двигателей пропорционального типа в системах автоматического регулирования частоты транспортных дизелей / А. Б. Богаевский, А.В. Басов, С.Г. Буряковский // В кн. «Проблемы автоматизированного электропривода». Труды н. – тех. конф. Харьков. – 1997. с. 259 – 260. (Автором запропонована модель електричного виконавчого органу як елементу системи забезпечення подачі палива). 6. Богаевський О.Б. Оптимізація перехідних процесів теплових дизелів з застосуванням електронних керуючих систем. / Е.Д. Тартаковський, В.О. Матяш, О.Б. Богаевський, Д.О. Аулін. // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ. – 2007. – вип. 86. – с. 177 – 181. (Автором показані переваги електронних систем при забезпеченні перехідних режимів тепловозів). 7. Устройство для регулирования подачи дополнительного воздуха в двигатель внутреннего сгорания: А.с. 1495474. СССР. МКИ F02D41/10,23/02/ Борисенко А.Н., Колыбин Ю.Н. –№4238090/25-06; Заявл.28.04.87; Оpubл.23.07.89. Бюл. № 27. – 3 с.:ил. 8. Пристрій керування дизелем з наддуванням : Деклараційний патент на корисну модель. № 8373. М. Кл. F02D43/00 41/00. Оpubл. 15.08.2005. Бюл. №8. / Кравец В.О., Колибін Ю.М., Ріттер А.В. 9. Пристрій для керування дизелем з наддуванням: Патент на корисну модель №35848, Україна, 2008 : Кравец В.О., Колибін Ю.М., Запольський М.Й., Баленко О.І.

Bibliography (transliterated): 1. *Kostromin A.M.* Optimal'noe upravlenie lokomotivom. – M.: Transport, 1979. – 119s. 2. *Kolybin Ju.N.* Kvazioptimal'nye jelektronnye reguljatory perehodnyh rezhimov stacionarnyh dizel'-generatorov s dopolnitel'nym vozduhosnabzheniem: Avtoreferat dis. na soiskanie stepeni kandidata tehniceskikh nauk/ Har'kovskij politehnicheskij institut. – Har'kov, 1986. – 18s. 3. *Bogaevskij A.B.* Povyshenie toplivnoj jeffektivnosti moshhnoj transportnoj dizel'noj ustanovki za schet primenenija mikrokontrollernogo reguljatora chastoty vrashhenija i moshhnosti. / A.B. Bogaevskij // Sbornik dokladi, XI nauchno – tehnicheska konferencija s mezhdunarodno uchastie, «Transport, ekologija - ustojchivo razvitie», EkoVarna. – 2005. – s. 459 – 463. 4. *Bogaevskij A.B.* Opredelenie parametrov upravlenija moshhnoj transportnoj dizel' – generatornoj ustanovkoj v perehodnyh rezhimah. / A.B. Bogaevskij // Vestnik NTU «HPI», tem. vyp. «Problemy avtomatizirovannogo jelektroprivoda. Teorija i praktika». Har'kov. – 2005. - №45. – s. 291 – 292. 5. *Bogaevskij A.B.* Primenenie jelektromagnitnyh ispolnitel'nyh dvigatelej proporcional'nogo tipa v sistemah avtomaticheskogo regulirovanija chastoty transportnyh dizelejju / A. B. Bogaevskij, A.V. Basov, S.G. Burjakovskij // V kn. «Problemy avtomatizirovannogo jelektroprivoda». Trudy n. – teh. konf. Har'kov. – 1997. s. 259 – 260. 6. *Bogaev'skij O.B.* Optimizacija perehidnih procesiv teplovoznih dizeliv z zastosuvannjam elektronnih kerujuchih sistem. / E.D. Tartakovs'kij, V.O. Matjash, O.B. Bogaevs'kij, D.O. Aulin. // Zb. nauk. prac'. – Harkiv: UkrDAZT. – 2007. – vip. 86. – s. 177 – 181. 7. Ust-rojstvo dlja regulirovanija podachi dopolnitel'nogo vozduha v dvigatel' vnutrennego sgoranija: A.s. 1495474. SSSR. MKI F02D41/10,23/02/ Borisenko A.N., Kolybin Ju.N. –№4238090/25-06; Zajavl.28.04.87; Opubl.23.07.89. Bjul. № 27. – 3 s..il. 8. Pristrij keruvannja dizelem z nadduvannjam : Deklaracijnij patent na korisnu model'. № 8373. M. Kl. F02D43/00 41/00. Opubl. 15.08.2005. Bjul. №8. / Kravec' V.O., Kolibin Ju.M., Ritter A.V. 9. Pristrij dlja keruvannja dizelem z nadduvannjam: Patent na korisnu model' №35848, Ukraina, 2008 : Kravec' V.O., Kolibin Ju.M., Zapolovs'kij M.J., Balenko O.I.

Поступила (received) 12.12.2013

О. Г. ВАСИЛЬЧЕНКОВ, к.т.н., доцент НТУ “ХПИ”

А. А. ЗУЕВ, к.т.н., доцент НТУ “ХПИ”;

Р. А. ДАВЫДОВ, магистр НТУ ”ХПИ”;

КОДИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ЧЕРЕЗ ЛОКАЛЬНЫЕ И ГЛОБАЛЬНЫЕ СЕТИ

В статье рассматриваются вопросы оптимального кодирования данных при передаче по локальным и глобальным сетям. Описан алгоритм работы и структурная схема программно-аппаратной системы, которая осуществляет сбор и передачу изображений по запросу пользователя. Приводится пример использования данной системы для обработки биомедицинских данных.

Ключевые слова: локальная сеть, глобальная сеть, сервер, клиент, алгоритм, избыточность, ПЭВМ.

Введение. В настоящее время информационные технологии (ИТ) получили широкое распространение практически во всех областях человеческой деятельности.

ИТ с использованием автономной ПЭВМ позволяют значительно расширить возможности пользователя, еще более значительный эффект можно получить при объединении отдельных ПЭВМ в локальную компьютерную сеть, которая обеспечивает функционирование нескольких ПЭВМ как единую систему. Вычислительные сети объединяют различные службы, ускоряют документооборот, позволяют хранить необходимую информацию и предоставляют доступ к ней по запросу. Естественным приложением ИТ являются компьютерные телекоммуникации и глобальные сети, обеспечивающие доступ пользователей к глобальным информационным ресурсам и выход в мировое информационное пространство.

Количество информации которую необходимо передавать и обрабатывать растет от года к году. Одним из возможных решений, которое позволяет компенсировать такой рост, является кодирование данных, которое позволяет сократить требования к объему устройств хранения данных и главное, к пропускной способности каналов связи. Условиями его применимости является избыточность информации и возможность установки специального программного обеспечения, либо аппаратуры, как вблизи источника, так и вблизи приемника информации. Оба эти условия легко выполнимы.

Цель работы. Показать особенности использования алгоритмов сжатия и передачи биомедицинских данных в распределенной программно-аппаратной системе, через локальные и глобальные сети.

Анализ литературы. Вычислительные сети (ВС) обычно используют специально проложенные высококачественные и хорошо защищенные от помех линии связи [1]. При этом среднескоростной считается сеть, имеющая пропускную способность 100 Мбит/с. При помощи ВС можно реализовать распределенную обработку и хранение данных. Обработка данных в этом случае распределена между несколькими объектами: сервером и клиентами или несколькими клиентами [1]. Клиенты формируют запросы на сервер (или другой клиент) для выполнения сложных процедур, чтения файлов, поиска информации в базе данных и т.д. Запрос выполняется, результаты выполнения передаются запрашивавшему их клиенту.

При организации обмена данными между двумя клиентами, в ряде сетей в которых клиенты подключены с использованием технологии NAT (преобразование сетевых адресов) различных типов, возникает задача определения адреса нужного компьютера в сети, для ее решения существует ряд методов: STUN (TURN), UDP hole punching, IPv6 Teredo и т.д.[2].

Большинство данных, которые передаются по ВС, являются избыточными, при этом степень избыточности во многом зависит от типа данных. Например, для видеоданных степень избыточности в несколько раз больше чем для графических данных, чья степень избыточности, в свою очередь, больше чем степень избыточности текстовых данных. Другим фактором, влияющим на степень избыточности, является принятая система кодирования. Примером систем кодирования могут быть обычные языки общения, которые являются ни чем другим, как системами кодирования понятий и идей для высказывания мыслей. Установлено, что "кодирование" текстовых данных с помощью русского языка дает в среднем избыточность на 20-25% большую, чем "кодирование" аналогичных данных на английском языке[3].

Для человека избыточность данных часто связана с качеством информации, поскольку избыточность улучшает понятность и восприятие информации. Но, когда речь идет о хранении и передаче информации средствами компьютерной техники - избыточность играет отрицательную роль, поскольку она приводит к возрастанию стоимости хранения и передачи информации. Особенно актуальной эта проблема является в случае обработки значительных объемов информации (десятки и сотни гигабайт) при незначительных объемах носителей данных. В связи с этим, задача уменьшения избыточности или кодирования данных является актуальной. Для ее решения применяются алгоритмы сжатия, как классические, например алгоритм LZW (Лемпела-Зива-Велча), так и разработанные относительно недавно, например, сжатие на основе преобразования BWT (Барроуза – Уиллера)[4].

Реализация. Систему хранения и передачи биомедицинских данных целесообразно разрабатывать, исходя из следующих принципов:

- возможность свободного расширения вычислительной сети, как за счет замены оборудования на более производительное, так и при помощи добавления новых вычислительных узлов и переконфигурирования сети;
- эффективный, быстродействующий механизм управления обменом по сети;
- возможность добавления и расширения ПО используемого для обработки данных.

Для построения ВС, целесообразно использовать стандартное сетевое оборудование и компьютеры общего назначения, а предоставлять возможность обмена данными с персональных и мобильных устройств. Это позволит легко конфигурировать сеть, в соответствии с требованиями заказчика, заменять вышедшие из строя узлы, а также модернизировать сеть. При этом использование стандартных компонентов позволит сохранить стоимость аппаратной части системы и затраты на ее обслуживание на достаточно низком уровне. На рисунке 1 приведена структурная схема такой системы.

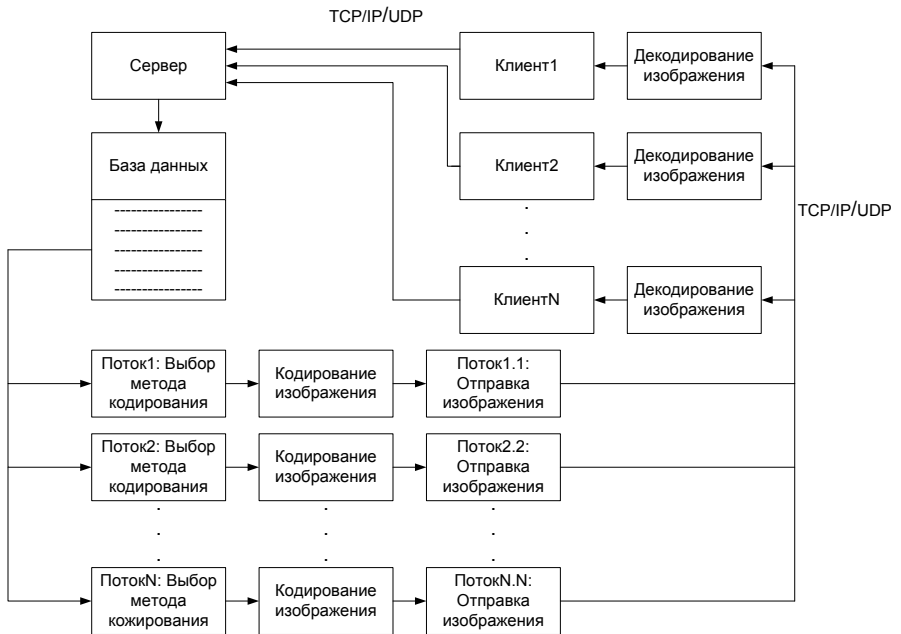


Рис. 1 – Структурная схема системы хранения данных

Основная сложность в построении системы заключается в разработке специализированного ПО для кодирования данных. Все методы кодирования данных основаны на простом принципе - если наиболее часто встречающиеся элементы закодировать более короткими кодами, а реже встречающиеся – более длинными, то для хранения всех данных потребуется меньше места,

чем, если бы все элементы представлялись кодами одинаковой длины. Точная взаимосвязь между частотами появления элементов, и оптимальными длинами кодов описана в так называемой теореме Шеннона об источнике шифрования, которая определяет предел максимального сжатия без потерь и энтропию [4].

Если вероятность появления элемента s_i равна $p(s_i)$, то наиболее выгодно представлять этот элемент кодом длиной в $\log_2 p(s_i)$ бит. Если при кодировании добиться того, что длина всех элементов будет приведена к $\log_2 p(s_i)$ битам, то и длина всей кодируемой последовательности будет минимальной из возможных. При этом, если распределение вероятностей всех элементов $F = \{p(s_i)\}$ неизменно, и вероятности элементов взаимно независимы, то средняя длина кодов может быть рассчитана по формуле (1):

$$H = -\sum_i p(s_i) * \log_2 p(s_i) \quad (1)$$

Однако вероятность появления элемента не может быть независимой, в этом случае, для каждого нового кодируемого элемента s_i распределение вероятностей F примет некоторое значение F_k , то есть для каждого элемента $F = F_k$ и $H = H_k$.

Можно сказать, что источник находится в состоянии k , которому соответствует некий набор вероятностей $p_k(s_i)$ для всех элементов s_i .

Поэтому, учитывая эту поправку, можно выразить среднюю длину кодов по формуле (2)

$$H = -\sum_k P_k * H_k = -\sum_{k,i} P_k * p_k(s_i) \log_2 p_k(s_i) \quad (2)$$

где P_k — вероятность нахождения источника в состоянии k [4].

Рассмотрим применение LZW алгоритма для кодирования данных. Этот алгоритм использует расширяющийся словарь, в котором первоначально содержится 256 слов длиной в одну букву. В процессе работы словарь увеличивается до своего максимального объема $|V_{\max}|$ слов. Обычно, объем словаря достигает нескольких десятков тысяч слов. Каждое слово имеет свою известную длину. Таким образом, количество слов в словаре точно равно его текущему объему. В процессе работы словарь заполняется по алгоритму приведенному на рисунке 2:

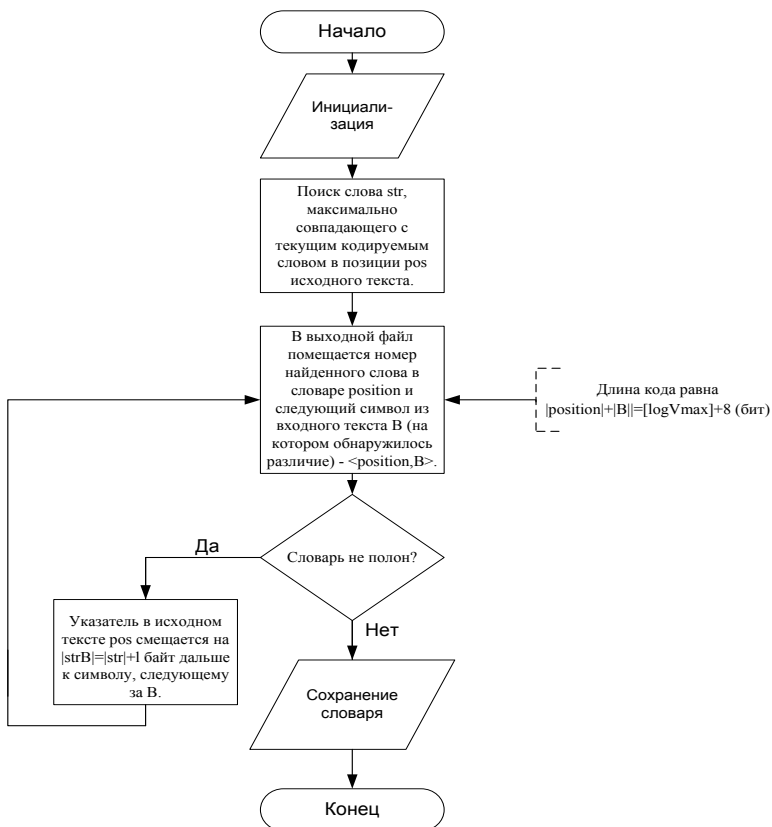


Рис. 2 – Алгоритм заполнения словаря LZW метода

Так как словарь увеличивается постепенно и одинаково для кодировщика и декодировщика, для кодирования позиции нет необходимости использовать $\lceil \log V_{\max} \rceil$ бит, а можно брать лишь $\lceil \log V \rceil$ бит, где V -текущий объем словаря [4].

Альтернативой алгоритму LZW являются – алгоритмы на основе BWT преобразования. Основная задача этого преобразования заключается в том, чтобы переставить символы в последовательности таким образом, чтобы увеличить коэффициент сжатия для методов кодирования.

Данные состоят из набора стабильных сочетаний символов (контекстов). Контекст позволяет предсказать некоторый неизвестный символ, а преобразование собирает вместе символы, соответствующие сходным контекстам. таким образом, чем больше стабильных контекстов в блоке данных, тем лучше будет сжиматься полученный в результате преобразования блок. На практике, в результате преобразования текстов более половины из всех символов следует за такими же [4].

Рассмотрим характерные особенности алгоритмов сжатия (компрессии) данных. Скорость компрессии для BWT - на уровне LZW, но при этом у LZW скорость декомпрессии, как правило, в 3-4 раза быстрее. Степень компрессии сильно зависит от типа данных. BWT оперирует сразу целым блоком данных. Это делает затруднительным использование алгоритма в тех областях применения, где требуется быстрое сжатие данных, символ за символом. В этом отношении BWT более требователен, чем методы семейства LZW, использующие для сжатия скользящее окно.

Выводы. Представление и хранение биомедицинских данных требует больших объёмов данных и предъявляет высокие требования к сетевому оборудованию при их передаче по каналам связи и к ёмкости внешних носителей при хранении. Выбор наиболее оптимального метода кодирования и нахождение путей максимально эффективной передачи данных по каналам связи является важной задачей.

Список литературы: 1. Персональные компьютеры в сетях TCP/IP – Киев, издательская группа BHV, 1997. **2** Rosenberg, J., Weinberger, J., Huitema, C., Mahy, R., “STUN - Simple Traversal of User Datagram Protocol (UDP) Through Network Address Translators (NATs)”, IETF, RFC3489, March 2003. **3.** Сэлмон Д. Сжатие данных, изображений и звука. Data Compression Methods. Серия: Мир программирования. Издательство: Техносфера, 2004. - 368 с. **4.** Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. - М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. - 384 с.

Bibliography (transliterated): 1. Personal'nye komp'jutery v setjah TCP/IP – Kiev, izdatel'skaja gruppa BHV, 1997. **2** Rosenberg, J., Weinberger, J., Huitema, C., Mahy, R., “STUN - Simple Traversal of User Datagram Protocol (UDP) Through Network Address Translators (NATs)”, IETF, RFC3489, March 2003. **3.** Sjelomon D. Szhatie dannyh, izobrazhenij i zvuka. Data Compression Methods. Serija: Mir programmirovanija. Izdatel'stvo: Tehnosfera, 2004. - 368 s. **4.** Vatolin D., Ratushnjak A., Smirnov M., Jukin V. Metody szhattija dannyh. Ustrojstvo arhivatorov, szhatie izobrazhenij i video. - M.: DIALOG-MIFI, 2002. - 384 s.

Поступила (received) 13.12.2013

А. И. ГАПОН, канд. техн. наук, проф. НТУ “ХПИ”
О. Н. ЕВСЕЕНКО, магистр НТУ “ХПИ”;

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛООВОГО ОБЪЕКТА НА РС-СЕТКАХ

Производится выбор метода моделирования. Осуществляется построение математической модели теплового объекта на основе метода РС-сеток. Снимаются переходные характеристики объекта. Исследуется реакция объекта на серию ШИМ-импульсов.

Ключевые слова: модель, тепловой объект, метод РС-сеток, масштабные коэффициенты, переходная характеристика, ШИМ.

Введение. Моделирование — важный процесс при изучении объекта, который позволяет упрощенно описать сложную систему, отразив её существенные свойства. Это позволяет использовать модель в качестве заместителя изучаемой системы.

Математическое моделирование основано на идентичности дифференциальных уравнений, описывающих явление в оригинале, и модели, отличающихся по своей природе.

Основные преимущества математического моделирования в сравнении с физическим: при математическом моделировании более наглядно осуществляется индикация и регистрация результатов исследований, можно в широких пределах варьировать исходные данные задачи для выбора оптимальных (по заданному критерию) параметров исследуемой системы, время решения задачи может быть изменено в широких пределах [1].

Реализация управления объектом должна основываться на дискретных системах — в них проще реализовать сложные алгоритмы управления. При использовании ЦВМ алгоритм задается в виде программы, сложность которой практически не влияет на конструкцию системы. Смена программы управления производится без больших затрат времени. В непрерывных САУ повышение сложности алгоритма управления требует включения в состав системы новых элементов, а замена алгоритма связана с существенным усложнением конструкции [2].

Цель работы. Построение математической модели реального теплового объекта и исследование его поведения на РС-сетках на импульсные воздействия, параметры которых вычисляются по методу, предложенному в работе [3].

Анализ литературы. Из многообразия методов математического моделирования [4] был сделан выбор в пользу метода РС-сеток. Суть метода моделирования на РС-сетках заключается в разделении моделируемой

области на элементарные объемы и замене их эквивалентными электрическими схемами замещения, состоящими из резисторов и емкостей.

Схема разбивки области решаемой задачи сеткой может быть самой разнообразной и зависит от многих факторов, определяющим из которых является точность решения. Точность решения при замене сплошной среды сеткой дискретных элементов зависит от шага сетки и величины градиентов температур в данной области.

Преимуществом этого метода является то, что для расчета значений RC-сетки для каждого элемента не требуется дополнительной информации об объекте.

Реализация. Значения RC-элементов получают из экспериментальной кривой разогрева объекта.

В качестве объекта исследований была выбрана стальная труба размерами: длина 35.5 см., диаметр 3.2 см., с намотанным на одном конце нагревателем длиной 8.2 см. от начала трубы и пятью датчиками, равноудаленными друг от друга на 5 см. Данные с датчиков снимались с периодом, равным 5 секундам [5].

При переходе от тепловой схемы замещения к электрической (рис. 1) необходимо учесть, что аналогом изменения температуры ΔT на электрической модели является изменение напряжения ΔU , теплового сопротивления Θ_{ja} – электрическое сопротивление R , теплоёмкости C_{ja} – электроёмкость C , мощности рассеивания P – сила тока внешнего источника $I_{э.т}$ реального времени – время машинное.

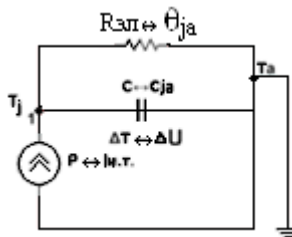


Рис. 1 – Переход от тепловой модели к электрической

При этом уравнение теплопроводности (1) будет выглядеть как уравнение напряжения в точке 1 (рис. 1) для RC-цепи (2), а переходный процесс изменения температуры (3) — как переходный процесс изменения напряжения (4).

$$\frac{\partial T_j}{\partial t} = \frac{-T_j}{\Theta_{ja} \cdot C_{ja}} + \frac{P}{C_{ja}}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{-U}{R \cdot C} + \frac{I_{э.т.}}{C}, \quad (2)$$

$$T_j(t) = T_{j2} - (T_{j2} - T_{j1}) \cdot e^{\frac{-t}{\Theta_{ja} \cdot C_{ja}}}; \quad (3)$$

$$U(t) = U_2 - (U_2 - U_1) \cdot e^{\frac{-t}{R \cdot C}} \quad (4)$$

Сам переход от тепловой схемы замещения модели к электрической осуществляется путем перемножения значений параметров тепловой модели на соответствующие масштабные коэффициенты температуры K_T , теплового потока K_Q , сопротивления K_R , теплоёмкости K_c , времени K_t .

$$K_T = \frac{T}{U}; \quad (5)$$

$$K_Q = \frac{Q}{I}; \quad (6)$$

$$K_t = \frac{t_{\text{теп}}}{t_3} \quad (7)$$

Расчёт электрической модели. Выбор масштабных коэффициентов производится из соображений удобства задания исходных данных и удобства измерения искомой величины.

Так как значения температурной кривой начинаются с 22°C , а не с 0, то формула для масштабных коэффициентов преобразуется в (8).

$$K_T = \frac{T - T_{\min}}{U} \quad (8)$$

$$K_T = \frac{100 - 22}{10} = 7.8;$$

$$K_t = \frac{1}{50} = 0.02;$$

По экспериментальной кривой, полученной в [5] (рис. 2), определим постоянную времени τ по уровню 63.2% от максимального значения температуры по формуле (9), 2τ по уровню 86,5% от T_{\max} по формуле (10) и 3τ по уровню 95% от T_{\max} по формуле (11) для пяти датчиков, результаты сведены в таблицу 1.

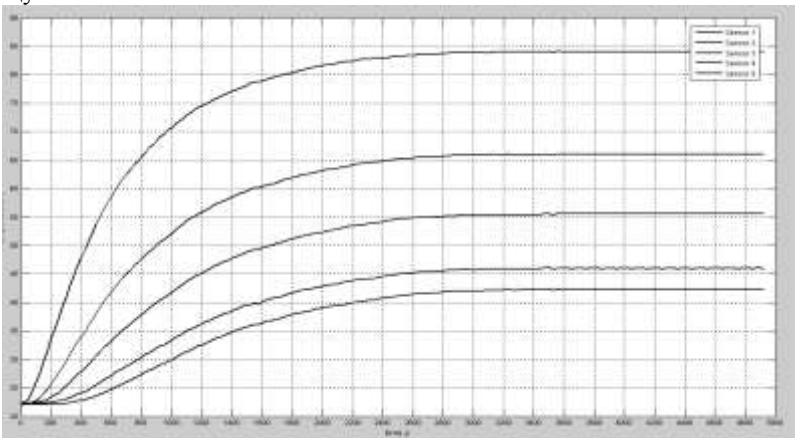


Рис. 2 – Переходные характеристики теплового объекта для пяти датчиков

$$T_1 = (T_{\max} - T_{\min}) \cdot 0.632 + T_{\min} \quad (9)$$

$$T_2 = (T_{\max} - T_{\min}) \cdot 0.865 + T_{\min} \quad (10)$$

$$T_3 = (T_{\max} - T_{\min}) \cdot 0.95 + T_{\min} \quad (11)$$

Таблица 1 – Исходные данные для построения кривых

№ датчика	1	2	3	4	5
t, c	680	880	1170	1200	1400
$2t, c$	1330	1490	1790	1850	2020
$3t, c$	1900	2300	2210	2300	2600

Далее по рассчитанным значениям постоянной времени, из учёта потерь тепла на нагрев окружающей среды произведём выбор значений элементов и построим схему в программном прикладном пакете моделирования электронных схем Multisim v 12.0.

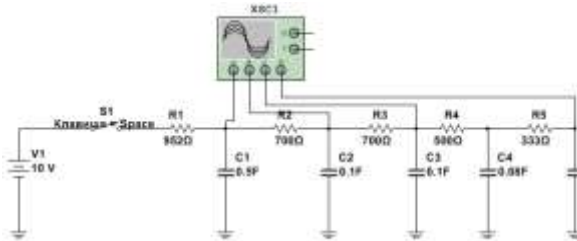


Рис. 3 – Построенная модель теплового объекта на RC–элементах:
 R1,C1...R5,C5 — RC–сетка для пяти точек разбегия;
 S1 — реле; V1 — источник питания

Далее получим переходную характеристику объекта. По определению переходная характеристика – это реакция объекта на единичное ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях [6].

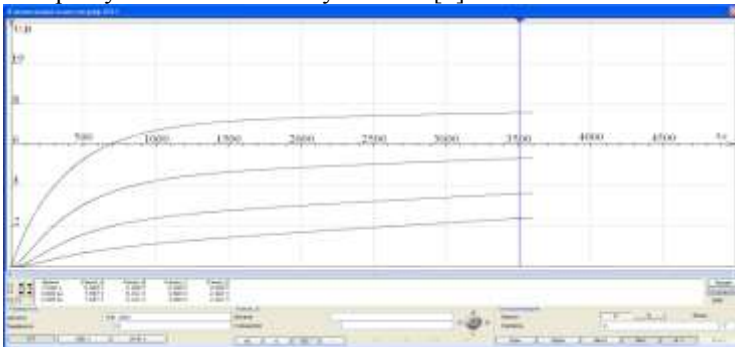


Рис. 4 – Переходные характеристики моделируемого объекта

Смоделируем реакцию объекта на серию ШИМ-импульсов, для которых параметры вычисляются по методу [3], для ближайшего к нагревателю датчика (рис. 5).

Далее сравним результаты с заданной температурной кривой (рис. 6) и найдём погрешность результата.

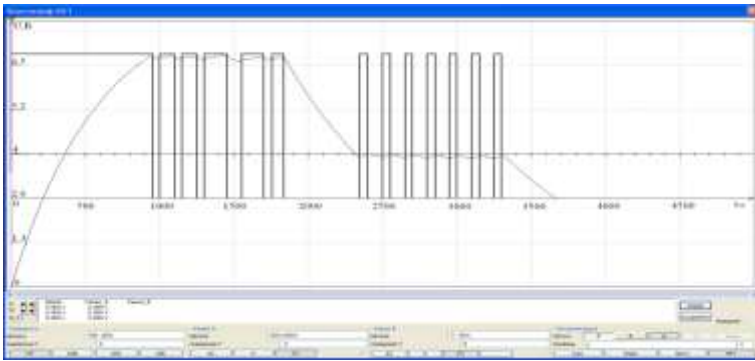


Рис. 5 – Реакция объекта на серию ШИМ-импульсов



Рис. 6 – Сравнение заданной и полученной кривой

Абсолютная погрешность результата определяется по формуле (12), относительная по формуле (13):

$$\Delta T = |T_{np} - T_0| \quad (12)$$

$$\delta_{\text{отн}} = \frac{\Delta T}{T_{np}} \cdot 100\% \quad (13)$$

где θ_{np} — приближённое значение температуры;

θ_0 — точное значение температуры.

Для участка, где заданная температура = 75 °С, абсолютная погрешность и относительная погрешности равняются:

$$\Delta T = |75.8 - 75| = 0.8^\circ\text{C};$$

$$\delta_{\text{отн}} = \frac{0.8}{75.7} \cdot 100\% = 1.05\%$$

Для участка, где заданная температура = 54 °С, абсолютная погрешность и относительная погрешности равняются:

$$\Delta T = |54 - 53.4| = 0.6^\circ\text{C};$$

$$\delta_{\text{отн}} = \frac{0.6}{53.6} \cdot 100\% = 1.12\%$$

Выводы. Из широкого разнообразия методов математического моделирования был сделан выбор в пользу построения аналитической модели на основе метода РС-сеток, для которого значения РС-элементов получают из экспериментальной кривой разогрева объекта.

Построена математическая модель теплового объекта на РС-элементах, снята его переходная характеристика и проверена его реакция на серию импульсов. Была подтверждена возможность отработки алгоритмов управления температурой объекта на его электрической модели.

Погрешность результата математической модели дала аналогичный результат, как и погрешность для реальной тепловой модели.

Список литературы: 1. Цаплин А. И. Моделирование теплофизических процессов и объектов в металлургии : учеб. пособие / А. И. Цаплин, И. Л. Никулин. – Пермь : Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – 299 с. 2. Теория автоматического управления : учеб. пособие / Е. А. Санковский [и др.] ; ред. А. С. Шаталов. – М. : Высш. shk., 1977. – 448 с. : ил. 3. Спосіб програмного управління тепловим об'єктом з застосуванням широтно-імпульсної модуляції : патент на корисну модель № 81276 Україна : МПК G05D 23/19 (2006.01) / Савицький С. М., Гапон А. І., Качанов П. О., Євсеєнко О. М., Вискребенцев В. О. ; заявник Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». – № u201300059 ; заявл. 02.01.2013 ; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 4 с. 4. Блинов Ю. Ф. Методы математического моделирования. Ч. 1 [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / Блинов Ю. Ф., Иванцов В. В., Серба П. В. ; ТТИ ЮФУ. – Таганрог, 2012. – 42 с. –Режим доступа: <http://fep.tti.sfedu.ru/russian/tmina/education/literatura/mmm1.pdf>. – Загл. с экрана.

5. Савицький С. М. Експериментальні дослідження способів управління тепловими об'єктами / Савицький С. М., Євсеєнко О. Н., Вискребенцев В. О. // Актуальні проблеми автоматики і приборостроєння України : матеріали наук.-техн. конф., 24–25 дек. 2012 г. / НТУ «ХПІ». — Харків, 2012. – С. 9–10. 6. Теория автоматического управления. В 2 ч. Ч. 1. Теория линейных систем автоматического управления / [Н. А. Бабаков и др.] ; под ред. А. А. Воронова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. shk., 1986. – 367 с. :

Bibliography (transliterated): 1. Caplin A. I. Modelirovanie teplofizicheskikh pro-cessov i ob#ektov v metallurgii : ucheb. posobie / A. I. Caplin, I. L. Nikulin. – Perm' : Izd-vo Perm. gos. tehn. un-ta, 2011. – 299 s. 2. Teorija avtoma-ticheskogo upravlenija : ucheb. posobie / E. A. Sankovskij [i dr.] ; red. A. S. Shatalov. – M. : Vyssh. shk., 1977. – 448 s. : 3. Sposib program-nogo upravlinnja teplovim ob'ektom z zastosuvannjam shirotno-impul'snoї mo-duljacii : patent na korisnu model' № 81276 Ukraїna : MPK G05D 23/19 (2006.01) / Savic'kij S. M., Gapon A. I., Kachanov P. O., Evseenko O. M., Viskrebencev V. O. ; zajavnik Nac. tehn. un-t «Hark. politehn. in-t». – № u201300059 ; zajavl. 02.01.2013 ; opubl. 25.06.2013, Bjul. № 12. – 4 s. 4. Blinov Ju. F. Metody matematicheskogo modelirovanija. Ch. 1 [Jel-ektronnyj resurs] : jelektron. ucheb. posobie / Blinov Ju. F., Ivancov V. V., Serba P. V. ; TTI JuFU. – Taganrog, 2012. – 42 s. –Rezhim dostupa: <http://fep.tti.sfedu.ru/russian/tmina/education/literatura/mmm1.pdf>. – Zagl. s jekrana. 5. Savickij S. M. Jeksperimental'nye issledovanija sposobov upravlenija teplovymi ob#ektami / Savic-kij S. M., Evseenko O. N., Vyskrebencev V. O. // Aktual'nye problemy avto-matiki i priborostroenija Ukrainy : materialy nach.-tehn. konf., 24–25 dek. 2012 g. / NTU «HPI». — Har'kov, 2012. – S. 9–10. 6. Teorija avtomaticheskogo upravlenija. V 2 ch. Ch. 1. Teorija linejnyh sistem avtomaticheskogo upravlenija / [N. A. Babakov i dr.] ; pod red. A. A. Voronova. – 2-e izd., pere-rab. i dop. – M. : Vyssh. shk., 1986. – 367 s.

Поступила (received) 10.11.2013

І.В. ГРИГОРЕНКО, к.т.н., доцент НТУ «ХПІ»

А.С. БЕЛЄВЦОВА, магістр НТУ «ХПІ»

ПОБУДОВА ТЕСТОВИХ ВПЛИВІВ ДЛЯ ДІАГНОСТИЧНОГО ПРИБЛАДУ ЛАЗЕРНИХ СИСТЕМ

У статті запропоновано варіант побудова тестових впливів для діагностичного приладу лазерних систем контролю. Висвітлені аналітичні залежності, які визначають процеси зміни вхідного сигналу у динамічному режимі.

Ключові слова: системи лазерного контролю, корекція похибки системи лазерного контролю, тестові методи контролю лазерних систем, алгоритм підвищення точності системи.

Вступ. Задача контролю лазерних систем виникла разом зі самими системами. На цей час існують багато систем лазерного контролю як технологічних процесів, так і окремих об'єктів, які дають можливість вирішувати конкретні задачі, але не відповідають на запитання: наскільки достовірні данні цього контролю?

Аналіз основних досягнень і літератури. В роботі [1] розглянуто пристрій для контролю лазерних приладів, оптичний блок якого виконаний у вигляді призми й двох клинів, розташованих перед об'єктивом, проте даний винахід механічно ускладнений і вимагає великих матеріальних затрат. В роботі [2] пристрій для контролю лазерних технологічних процесів містить відеокамеру з об'єктивом і фотодіод, оптично зв'язані з системою лазера, що сканує і фокусує, але він має невисоку точність вимірювання та низьку швидкодію. Запропонований у роботі прилад має значні переваги по точності контролю у порівнянні з попередніми, що дозволяє значно підвищити точність вимірювання геометричних розмірів та якості поверхні виробів завдяки використанню тестових зразкових ділянок. Питання тестування систем за допомогою подання адитивних і мультиплікативних тестів з подальшим обчисленням реляційно-різницевих операторів корекції розглядалося в роботі [3].

Мета дослідження, постановка задачі. Метою роботи є розробка методу тестового контролю для існуючого лазерного діагностичного приладу, який надасть можливість практично реалізувати теорію реляційно-різницевих операторів корекції для підвищення точності контролю лазерних систем.

Матеріали досліджень. В роботі [4] вперше запропоновано метод підвищення точності вимірювальних перетворювачів (ВП) на основі динамічних реляційно-різницевих операторів корекції, що дозволило значно знизити похибку нелінійності та динамічну складову похибки, за рахунок

впровадження «ковзаючого» тестового контролю ВП одночасно з дією вхідного сигналу. Розглянемо можливість використання такого підходу для побудови тестових сигналів у лазерних системах контролю. У таких системах – маємо справу зі світловими потоками. Оскільки інтенсивність світлового потоку можна перетворити на електричний сигнал, то відповідно є можливість порівняти два сигнали – один від об'єкту вимірювання, другий – від еталонної поверхні.

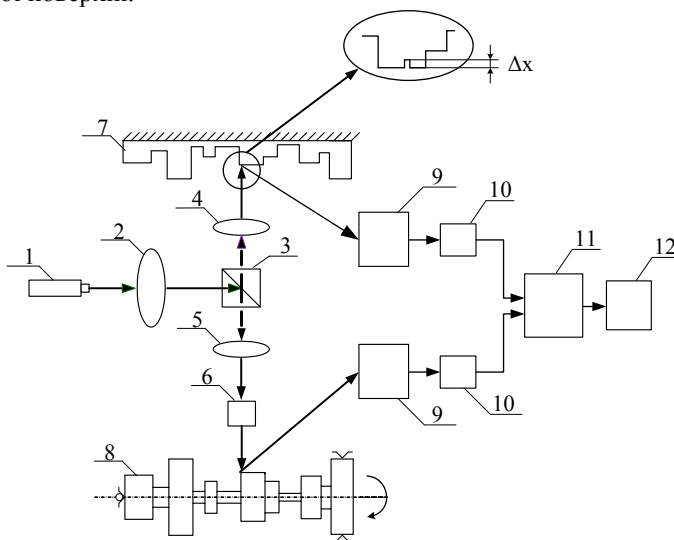


Рис. 1 – Схема системи контролю

Сутність роботи системи пояснюється рис. 1. Пристрій, працює наступним чином: Світловий потік від лазерного каналу 1, проходячи через фокусуючу двоопуклу лінзу 2, потрапляє на світлоподільну призму 3, яка ділить один світловий потік на два різних за інтенсивністю світлопотока. Обидва потоки фокусуються за допомогою окремих фокусуючих систем 4, 5.

Для вирівнювання інтенсивностей на шляху робочого світлового потоку встановлено оптичний атенюатор 6. Світлові потоки потрапляють відповідно на еталонну за геометричними розмірами поверхню 7 і об'єкт вимірювання 8.

На еталонну поверхню нанесено ділянку зразкового перепаду розміру ΔX . З об'єктів 7 і 8 зчитується інформація про якість їх поверхні за допомогою відбиття світлових потоків від поверхонь даних об'єктів. Відбиваючись від об'єктів 7 і 8, світловий потік потрапляє на фотоприймачі 9, які перетворюють інтенсивність світлового потоку в електричний сигнал. З виходів фотоприймачів 9 обидва електричні сигнали (напруга) підсилюються, надходячи до підсилювачів 10. Для порівняння електричних сигналів використовуємо компаратор 11. Дані передаються на блок обробки даних 12.

Для перетворення відбитих світлових потоків у розглянутій системі використані фотодіоди. Схему фотопідсилювача можливо скласти таким чином, як показано на рисунку 2 [5]. Обидва резистори R_1 та R_2 мають однакові номінали.

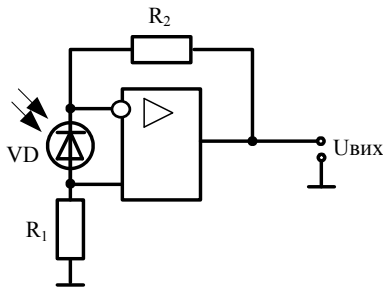


Рис. 2 – Схема фотопідсилювача з фотодіодом

У схемі фотодіод працює в режимі генерації фото-ЕРС (струм через діод визначається тільки значенням фотоструму). Фотодіодний режим характеризується малою інерційністю, підвищеною чутливістю до довгохвильової частини оптичного спектра, широким динамічним діапазоном лінійності характеристик. Інерційність фотодіодів залежить від часових характеристик процесу фотогенерації носіїв, умов поділу електронно-діркових пара, ємності переходу, а також опору навантаження.

Розглянемо як здійснюється формування вихідного сигналу підсилювачів.

На рисунку 3 (а, б, в) представлені графічні зображення результатів тестового контролю при скануванні ділянок вимірюваного об'єкта і зразка. Зображені залежності напруг від часу, за який лазерний промінь проходить вздовж поверхні деталі.

На рисунку 3а зображений графік залежності напруги на виході фотоприймача U_1 при скануванні поверхні деталі

На рис. 3б зображений графік залежності напруги на виході фотоприймача U_2 від часу, який витрачає інший лазерний промінь на сканування зразкового об'єкта, на який нанесено зразкові ділянки певного розміру. Геометричні розміри деталі і зразкового об'єкта однакові.

На рис. 3в - графік вихідної напруги з компаратора $U_{вих}(t)$. Глибина зразкових ділянок відповідає амплітуді Δ – відхиленню номінального значення розміру об'єкту вимірювання від зразкового об'єкта.

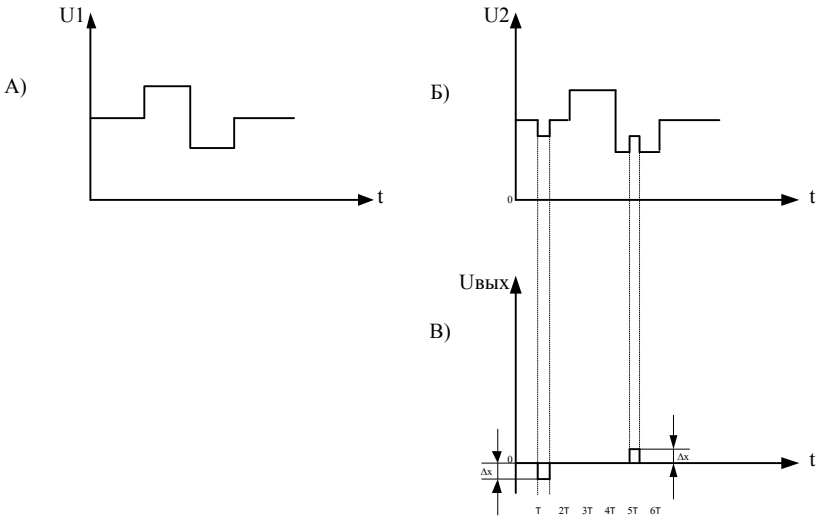


Рис. 3. – Графіки залежності $U_{\text{вих}}(t)$

Таким чином, якщо система, що контролюється, реагує на зразкові ділянки, то на виході блоку обробки даних маємо різницевий сигнал заданого рівня, що говорить про чутливість та точність роботи системи.

Оригінал функції вхідного сигналу представимо у вигляді системи рівнянь

$$\begin{cases}
 Y_1(t_1) = Y(0) + \alpha \cdot t_1; & [t_1 \in 0, T] \\
 Y_2(t_2) = Y(0) + \alpha \cdot t_2 + k \cdot (\alpha \cdot (t_2 - T) + Y(0)); & [t_2 \in T, 2T] \\
 Y_3(t_3) = Y(0) + \alpha \cdot t_3 + k \cdot (\alpha \cdot (t_3 - 2T) + Y(0)) - \\
 \quad - k \cdot (\alpha \cdot (t_3 - 3T) + Y(0)); & [t_3 \in 2T, 3T] \\
 Y_4(t_4) = Y(0) + \alpha \cdot t_4, & [t_4 \in 3T, 4T]
 \end{cases} \quad (1)$$

де $Y(0)$ – значення сигналу на початку контролю;

α – розрахункове значення оцінки швидкості зміни вхідного сигналу;

t_1, t_2, t_3, t_4 – моменти поточного часу, віддалені одне від одного на інтервал T :

T :

$$t_1 - t_0 = T, \quad t_2 - t_0 = 2T, \quad t_3 - t_0 = 3T, \quad t_4 - t_0 = 4T.$$

k – рівень мультиплікативного тестового впливу;

Таким чином динамічна різницева модель оператору корекції має вигляд

$$\Delta Y(t) = \begin{cases} \Delta Y_{21}(t2, t1) = Y_2(t2) - Y_1(t1), & t2 \in [T, 2T] \\ \Delta Y_{31}(t3, t1) = Y_3(t3) - Y_1(t1), & t3 \in [2T, 3T] \end{cases} \quad (2)$$

Для розрахунку співвідношення (2) необхідно формувати також адитивний тестовий вплив, що є цілком можливим.

Результати досліджень. Аналіз отриманих результатів дає можливість стверджувати, що при динамічному контролі лазерних систем необхідно проводити періодичне тестування безпосередньо в процесі експлуатації та використовувати при обробці результатів реляційно-різницевої моделі операторів корекції.

Висновки. Використання діагностичного приладу для лазерних систем контролю надасть можливість підвищити точність вимірювань завдяки наявності тестових зразкових ділянок. У наступній роботі буде розглянута використання реляційно-різницевої моделі з урахуванням адитивного тесту, що є необхідним для подальших досліджень.

Список літератури: 1. Г.І. Федченко, С.І. Щеглов, С.М. Зубок. Устройство для контроля лазерного прибора./Патент РФ № 2419079, кл. G01M11/02, 2009. 2. J.-P.Kruth, J.Duflou et al. // Proceedings of the 5th LANE 2007. V.1. P.23-30. Erlangen. Germany.3. Григоренко І.В. Розвиток тестових методів підвищення точності електричних компенсаційних вимірювальних перетворювачів у динамічних режимах: дис. на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.11.05 / Ігор Володимирович Григоренко – Харків, 2010. – 224 с.4 Кондрашов С.І. Підвищення точності вимірювальних перетворювачів з формуванням у реальних умовах тестових впливів: дис. на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук: 05.11.05 / Сергій Іванович Кондрашов – Харків, 2004. – 412 с. 5. В.І. Щербаків, Г.І. Гнездов. Электронные схемы на операционных усилителях: Справочник. - К.: Техніка, 1983.-213с.

Bibliography (transliterated):1. H.I. Fedchenko, S.I. Shcheghlov, S.M. Zubok. Ustroystvo dlya kontrol'ya lazernoho prybora./Patent RF # 2419079, kl. G01M11/02, 2009. 2. J.-P.Kruth, J.Duflou et al. // Proceedings of the 5th LANE 2007. V.1. P.23-30. Erlangen. Germany.3. Hryhorenko I.V. Rozvytok testovykh metodiv pidvyshchennya tochnosti elektrychnykh kompensatsiynykh vymiryval'nykh peretvoryuvachiv u dynamichnykh rezhymakh: dys. na zdobuttya naukovoho stupenya kandydata tekhnichnykh nauk: 05.11.05 / Ihor Volodymyrovych Hryhorenko – Kharkiv, 2010. – 224 s.4 Kondrashov S.I. Pidvyshchennya tochnosti vymiryval'nykh peretvoryuvachiv z formuvannyam u real'nykh umovakh testovykh vplyviv: dys. na zdobuttya naukovoho stupenya doktora tekhnichnykh nauk: 05.11.05 / Serhiy Ivanovych Kondrashov – Kharkiv, 2004. – 412 s. 5. V.I. Shherbakov, G.I. Gnezdov. Jelektronnye shemy na operatsionnykh usilitel'jah:Spravochnik. - K.: Tehnika, 1983.-213s.

Надійшла (received) 14.12.2013

В.К. ГУСЕЛЬНИКОВ, канд. техн. наук, проф. НТУ «ХПІ»;
Т.С. ДЕМЕНТ'ЄВА, студентка НТУ «ХПІ»

ЦИФРОВИЙ ВИМІРЮВАЧ ТЕМПЕРАТУРИ

У статті розглянуті питання побудови цифрового вимірювача температури. Було обґрунтовано підхід до вибору датчика температури, також була проведена оцінка похибок даного приладу.

Ключові слова: вимірювання, температура, датчики температури, мікроконтролер, інтерфейс RS 485, похибка.

Вступ. Вимірювання, контроль і регулювання температури є одним з невід'ємних і важливих завдань в сучасному світі. Таке завдання стоїть і перед промисловістю, і перед сільським господарством, і в побуті, і навіть в області високих технологій. У різних випадках завдання регулювання температури має свою індивідуальну мету і спосіб вирішення.

Хоча поняття температури інтуїтивно зрозуміле, як стан тепла й холоду, її вимірювання, тобто співставлення з певною одиницею температури й кількісне вираження у вигляді числа, є методологічно складною проблемою. Температуру неможливо виміряти безпосередньо. Проте, при нагріванні або охолодженні тіла змінюються його фізичні властивості: довжина і об'єм, густина, пружні властивості, електропровідність тощо. Основою для вимірювання температури може бути зміна будь-якої властивості будь-якого тіла, якщо для нього відома залежність даної властивості від температури. Вибране для вимірювання температури тіло називають термометричним, а прилад для вимірювання температури - термометром.

В сучасному світі вимірювання, контроль і регулювання температури є одним з невід'ємних і важливих завдань. Таке завдання стоїть і перед промисловістю, і перед сільським господарством, і в побуті, і навіть в області високих технологій. У різних випадках завдання регулювання температури має свою індивідуальну мету і спосіб вирішення.

Покладати на людину завдання контролю і регулювання температури технологічних процесів в епоху високих комп'ютерних технологій просто не раціонально. Сьогодні для цього використовують різні цифрові датчики та регулятори температури з використанням мікропроцесорної техніки.

Мета статті. Температуру вимірюють за допомогою пристроїв, що використовують різні термометричні властивості рідин, газів і твердих тіл. Існують десятки різних пристроїв, що використовуються в промисловості, при наукових дослідженнях, для спеціальних цілей. Метою статті є розробка цифрового вимірювача температури в діапазоні від -40 °C до $+120$ °C, похибка вимірювання не повинна перевищувати 1 %. Цей прилад може

використовуватися на підприємствах, де необхідні контроль і управління температурними процесами, в системах контролю температур в будівлях, обладнанні або машинах. Проектований пристрій повинен бути цифровим і мікропроцесорним. Тому обираємо саме цифрові датчики температури, які призначені для вимірювання та моніторингу температури віддаленого об'єкта. Більш досконалі термометри – модель Ds18B20, їх швидкість перетворення визначається розрядністю результату, програмованої безпосередньо по 1-wire-лінії. Також було розроблено структурну схему для даного приладу, яка наведена на рис. 1.

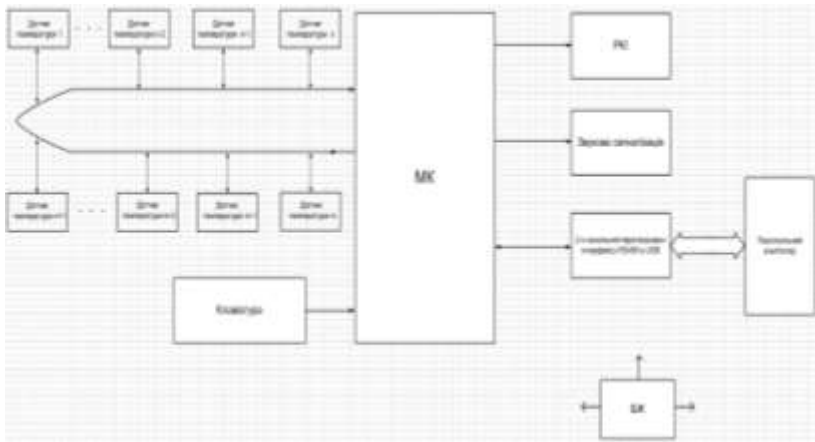


Рис. 1 – Структурна схема цифрового вимірювача температури

Структурна схема цифрового вимірювача температури включає наступні елементи:

- мікроконтролер для обробки інформації, отриманої від датчиків температури;
- рідкокристалічний екран, вбудований в пристрій, на який виводиться інформація про температуру;
- приймач для узгодження МК з персональним комп'ютером оператора по довгій лінії в двох напрямках;
- систему звукового оповіщення;
- систему мережевого і автономного живлення;
- функціональну клавіатуру.

Мікроконтролер виробляє циклічне опитування підключених до нього датчиків температури. МК відсилає в комп'ютер значення температури від усіх датчиків. Виміряна температура не тільки зберігається, але і виводиться на рідкокристалічний екран (РКІ). За допомогою клавіатури можна перегля-

нути температуру певного датчика. Якщо значення вимірної температури виходять за діапазон, заданий заздалегідь, то відбувається подача сигналу звукового оповіщення.

Також мікроконтролер може зберігати кілька значень температури від кожного датчика. Зв'язок з комп'ютером здійснюється за допомогою послідовного інтерфейсу RS485. У стандарті RS-485 для передачі і прийому даних застосовують кабелі (вита пара). Інтерфейс відрізняється високою перешкодозахищеністю. RS-485 реалізує магістральний принцип обміну даними. Для усунення віддзеркалень сигналів, що виникають в довгих лініях зв'язку, на обох кінцях їх обов'язково встановлюють узгоджуючі резистори (120 Ом). Максимальна довжина лінії стандарту RS485 сягає 1200 м, швидкість передачі - до 10 Мбіт/с. Для надійної роботи є безперебійний блок живлення.

Загальна похибка вимірювання цифрового вимірювача температури складається з похибки окремих вузлів. Основними джерелами похибки є датчик температури Ds18b20 і мікроконтролер (про інших джерелах не йдеться тому, що вони вносять зовсім малі похибки, якими ми можемо знехтувати).

Похибка вимірювання не перевищує 1%.

Абсолютна похибка $\pm 0,7$ °C

Відносна похибка $\pm 1,75$ %,

Наведена похибка $\pm 0,437$ %

Результати досліджень. Цей пристрій буде застосовано на АТЗТ «Хладпром». На даному підприємстві є п'ятиповерховий розподільний холодильник, місткістю 16000 тон, який використовується для зберігання продуктів харчування. Перевагою встановлення цього пристрою стане:

– економія електричної енергії та потужностей компресорного цеху, внаслідок зникнення періодичної розгерметизації при відчиненні дверей для зняття показань термометра;

– більш раціональне використання робочого часу машиніста компресорного цеху, який слідкує за підтриманням температурного режиму в морозильних камерах, а також поліпшення умов його праці;

– збільшення терміну, необхідного для періодичного розморожування морозильних камер, планове розморожування яких зараз відбувається один раз на місяць;

– збільшення терміну зберігання продуктів, які знаходяться у морозильних камерах, тому що з'явиться можливість миттєвого реагування на незаплановані зміни температурного режиму;

– подовження терміну експлуатації компресорів.

Розроблений пристрій може також використатися в медичній, хімічній, фармацевтичній промисловостях та побуті.

Область застосування даної розробки не обмежується лише АТ «Хладпром» і може бути застосована на будь-якому підприємстві, де потрібен контроль температури одночасно в декількох точках одним оператором.

Висновки. Розроблений пристрій відрізняється відносною простотою конструкції, що забезпечує його високу надійність і низьку собівартість. У подальших роботах планується оснастити цифровий вимірювач температури дистанційною передачею інформації та пам'яттю.

Список літератури: 1. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы – Учебник для ВУЗов по специальности « Автоматизация теплоэнергетических процессов». – 3-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1978. – 704 с., ил. 2. Измерения в промышленности. Справ. Изд. В 3-х кн. КН. 1. Теоритические основы. Пер. с нем./Под ред. Провоса П. –2-е изд., перераб. и доп. – Металлургия, 1990– 492с. 3. Виглеб Г. Датчики. Пристрій і застосування. –М.: Мир, 1989. 4. Белов А.В. Конструирование устройств на микроконтроллерах – СПб.: Наука и техника, 2005. –256 с.: ил. 5. www.analog.com – сайт производителя Analog Devices. 6. Лантев В. Цифровой измеритель температуры на базе AVR микроконтроллера и RC-цепочки. //Электронные компоненты – 2001– №2 – с. 46–49. 7. Чинков В.М. Основи метрології та вимірювальної техніки – НТУ «ХП», 2005. – 524с.

Bibliography (transliterated): 1. Preobrazhenskij V.P. Teplotnicheskie izmerenija i pribory – Uchebnik dlja VUZov po special'nosti « Avtomatizacija teplo-jenergeticheskikh processov». – 3-e izd., pererab. – М.: Jenergija, 1978. – 704 s., il. 2. Izmerenija v promyslennosti. Sprav. Izd. V 3-h kn. KN. 1. Teoritiche-skie osnovy. Per. s nem./Pod red. Provosa P. –2-e izd., pererab. i dop. – Me-tallurgija, 1990– 492s. 3. Vignleb G. Datchiki. Pristrij i zastosuvannja. –М.: Mir, 1989. 4. Belov A.V. Konstruirovanie ustrojstv na mikrokontrollerah – SPb.: Nauka i tehnika, 2005. –256 s.: il. 5. www.analog.com – sajт proizvo-ditelja Analog Devices. 6. Laptev V. Cifrovoj izmeritel' temperatury na baze AVR mikrokontrollera i RC-cepochki. //Jelektronnye komponenty – 2001– №2 – s. 46–49. 7. Chinkov V.M. Osnovi metrologij i vimirjuval'noi tehniki – NTU «HP», 2005. – 524s.

Надійшла (received) 05.02.2014

В.К. ГУСЕЛЬНИКОВ, канд. техн. наук, проф. НТУ "ХПІ"
Г.В. ЧОРНА, студентка, магістр НТУ "ХПІ"
Т.Б. БЕЛІКОВА, ст. викладач ХГЕУ

ЦИФРОВИЙ ВИМІРЮВАЧ ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА

У статті розглянуті питання побудови цифрового вимірювача фізичних параметрів повітряного середовища. Було обґрунтовано підхід до вибору первинних вимірювальних перетворювачів, проведений аналіз можливих похибок цифрового вимірювача.

Ключові слова: клімат-контроль, повітряне середовище, цифровий вимірювач.

Постановка проблеми. На даному етапі все більше уваги приділяється комфортності середі перебування людини, і, як наслідок, зростає потреба в системах контролю параметрів довкілля. Ефективність такого контролю залежить від якості первинних перетворювачів, які є основними чутливими органами вимірювальної апаратури. Вимірювання вологості, температури, атмосферного тиску та швидкості вітру з використанням сучасних сенсорів знайшли широке застосування і є одним із поширених напрямків вимірювань. Це обумовлено тим, що вологість, температура, атмосферний тиск значно впливають як на роботу технічних об'єктів, так і на самопочуття людей. У зв'язку з цим досить важливим завданням сучасного приладобудування та вимірювальної техніки є вибір надійних методів вимірювання цих величин у різних виробництвах, створення вимірювальних приладів необхідної точності, стабільності та швидкодії, а також дослідження впливів на результат вимірювань всієї сукупності факторів, які супроводжують вимірювальний процес.

Аналіз літератури. На цей час велика кількість систем клімат-контроль виставлені у середовищі Інтернет. Розглянуті системи мають один важливий недолік – велика ціна. У джерелі [1] наведена система клімат-контролю для жилого будинку, але в ній не розглядаються можливі похибки даної вимірювальної системи, переваги її використання. Подібні системи наведені у джерелі [2], але також не розглядаються питання метрологічної надійності та елементної бази, що в них використовується.

Метою статті є розвиток і удосконалення цифрових вимірювачів фізичних параметрів повітряного середовища з метою забезпечення високої точності вимірювань при зниженні вартості приладів.

Для забезпечення високої точності вимірювань необхідно здійснити підсилення сигналу первинного перетворювача, лінеаризацію передатної характеристики, компенсацію початкового зміщення та похибок, які

виникають у зв'язку зі зміною температури довкілля. Ефективно виконувати подібні перетворювання можна тільки з використанням цифрової обробки даних і виконання одночасно з вимірюванням вологості вимірювання температури навколишнього середовища. Останнім часом намітилась стійка тенденція щодо зменшення вартості мікроелектронних пристроїв обробки інформації, зокрема, на основі мікропроцесорних систем, внаслідок чого первинні вимірювальні перетворювачі поступово набувають визначальної ролі з точки зору вартості інформаційно-вимірювальної системи. Крім того, саме метрологічні характеристики первинних вимірювальних перетворювачів в значній мірі визначають точність всієї вимірювальної системи. Широке застосування напівпровідникових матеріалів та розробка на їх основі первинних вимірювальних перетворювачів, сумісних з мікропроцесорними пристроями, є основним напрямком розвитку сучасної сенсорної техніки. Характеристиками, які визначають вибір того чи іншого сенсора стають: висока точність, компактність, мале енергоспоживання й можливість проведення вимірювань в умовах виробництва. Отже, проблема створення вимірювальної системи з високими метрологічними характеристиками та уніфікованим вихідним сигналом, який можна перетворювати у форму коду з незначними похибками, залишається актуальною.

Структурна схема цифрового вимірювача фізичних параметрів повітряного середовища наведено на рис. 1. включає наступні елементи: 1 - ПВП1, ПВП2, ПВП3 і ПВП4 - первинні вимірювальні перетворювачі. Вони призначені для виробки сигналів вимірювальної інформації в формі, зручній для передачі, подальшого зберігання чи обробки. ПВП1 – датчик відносної вологості, ПВП2 – датчик температури, ПВП3 – датчик атмосферного тиску, ПВП3 – ультра звуковий датчик швидкості вітру; 2 - ВВП – вторинний вимірювальний перетворювач. ВВП здійснює проміжні перетворення первинної вимірювальної інформації; 3 - П – підсилювач сигналу вимірювальної інформації до рівня, необхідного для подачі її на АЦП; 4 - АЦП – аналого-цифровий перетворювач. АЦП здійснює перетворення аналогового сигналу в цифровий код; 5 - МК – мікроконтролер. Цей блок контролює, синхронізує, обробляє отриману інформацію, відправляє її на цифровий відліковий пристрій (табло) та передає її до пам'ятовуючого пристрою і до ЕОМ; 6 - ІФБ – інтерфейсний блок, призначений для забезпечення можливості обміну інформацією між мікроконтролером та ЕОМ; 7 - ПК – пульт керування. Дає змогу оператору здійснювати контроль та управління роботою МК; 8 - ЦВП - цифровий відліковий пристрій для відображення інформації у зручному для оператора вигляді; 9 - ПЗП – постійний пам'ятовуючий пристрій, призначений для зберігання результатів вимірювань; 10 - Блок живлення – допоміжний пристрій, що забезпечує живлення усіх компонентів вимірювача.

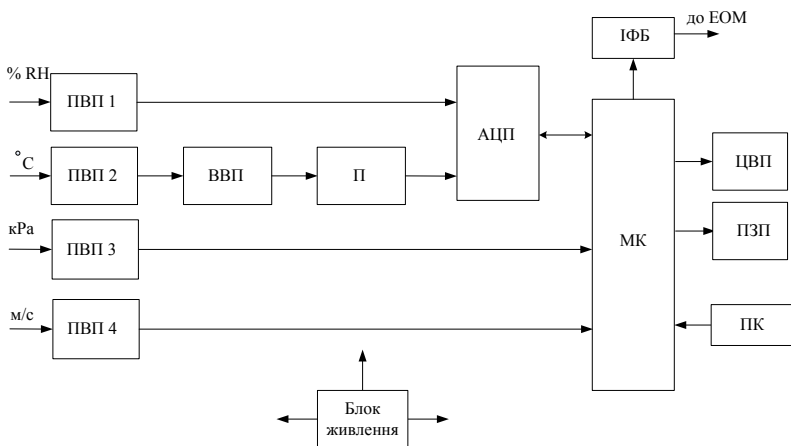


Рис. 1.– Цифровий вимірювач фізичних параметрів повітряного середовища

На цей час актуальним залишається завдання вибору ПВП і варіанта його підключення, тому що саме метрологічні характеристики ПВП у вирішальній мірі визначають точність всієї вимірювальної системи.

Для задачі, що стоїть в даній роботі, а саме, незначна віддаленість від об'єкту вимірювань, можна зупинитися на варіанті двохпровідного підключення терморезистору до мостової схеми. Зміна вихідної напруги мосту досить мала, тому потребує підсилення. Сигнали з виходу мосту мають бути подані на підсилювач, з якого надійдуть до АЦП.

Датчик вологості НіН 4010 00X має на виході сигнал напруги, що має розмах 4,0...5,8 В, що дозволяє напряму підключати їх до АЦП [3].

Датчик атмосферного тиску представляє собою мініатюрний гібридний модуль, що виготовляється на основі п'єзорезистивного датчика тиску й інтерфейсної мікросхеми аналого-цифрового перетворювача. Формат цифрових даних читається у вигляді 16-розрядного слова, що відповідає вимірюваному ADC напрузі залежно від тиску й температури. Датчик має малий струм споживання близько 500 мікроамперів і при цьому можуть харчуватися напругою від 2,2В до 3,6В.

У датчику є функція автоматичного перемикання в режим економії енергії, тобто сплячий режим. Тому він ідеально підходить для пристроїв, що носяться, де енергоспоживання відіграє немаловажну роль.

Датчик швидкості вітру – це ультразвуковий анемометр S1404Z не має частин, що рухаються. Широкий діапазон робочих температур (від - 55°C до +55°C), має міцну й надійну конструкцію, що роблять його особливо підходящим для використання в суворих умовах навколишнього середовища, та

цифровий вихід, що дозволяє підключати його безпосередньо до мікроконтролера. Сигнали вимірювальної інформації з каналів 1 (вологість) і 2 (температура) поступають на двоканальний аналого-цифровий перетворювач. Цифровий код з АЦП надходить в мікроконтролер, який обробляє їх, лінеаризує функції перетворення, робить корекцію похибок і передає результат в цифровий відліковий пристрій і персональний комп'ютер, для зв'язку з яким передбачений інтерфейсний блок приладу. Результати вимірювань запам'ятовуються в ПЗП.

Загальна похибка вимірювання даного приладу складається з похибки окремих вузлів. А саме: похибка датчика відносної вологості $\pm 2\%$ RH; похибка первинного вимірювального перетворювача температури - платинового терморезистора (HEL 775-A-T-1) 0,1 %; похибка посилення AD 623 дорівнює 0,35 %; похибка датчика атмосферного тиску HP03SA дорівнює 0,1 %; похибка датчика швидкості вітру S1404Z дорівнює 0,1 %; похибка АЦП при вимірюванні вологості 0,03 %; похибка АЦП при вимірюванні температури 0,025%. Сумарна похибка цифрового вимірювача фізичних параметрів повітряного середовища при обраній елементній базі не перевищує 3%.

Висновки. Ціна дослідного зразка цифрового вимірювача фізичних параметрів повітряного середовища склала 3829,8 грн., що у два рази менше існуючих аналогів.

Перспективи подальших досліджень. У подальших роботах планується провести детальний аналіз похибок цифрового вимірювача та визначити шляхи зменшення впливу похибок нелінійностей перетворювачів на результат вимірювань.

Список літератури: 1. Система климат контроль в умном доме <http://smarton.com.ua>. 2. Встроенные системы климат контроля <http://library.stroit.ru>. 3. Fairchild Semiconductor. Справочник микросхем, 2003г // <http://www.fairchildsemi.com>. 4. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назва та позначення.

Bibliography (transliterated): 1. Sistema klimat kontrol' v umnom dome <http://smarton.com.ua>. 2. Vstroennyye sistemy klimat kontrolja <http://library.stroit.ru>. 3. Fairchild Semiconductor. Spravochnik mikrochem, 2003g // <http://www.fairchildsemi.com>. 4. DSTU 3651.0-97 Metrologiya. Odinid fizichnih velichin. Osnovni odinid fizichnih velichin Mi^tk^shii sistemi odinic'. Osnovrn polozhennja, nazva ta poznachennja.

Надійшла (received) 22.10.2013

А. П. ДАВИДЕНКО, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;
Е. А. ПАНЧЕНКО, студент, НТУ «ХПИ»

ЭЛЕКТРОИМПЕДАНСНЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ПЛОСКИХ ПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрен метод контроля плоских материалов (пленок, листов) и химических растворов. Данный метод реализуется с помощью набора подводящих линий (проводников), которые лежат в двух параллельных плоскостях и являются ортогональными по отношению друг к другу. На основе данных измерений комплексной проводимости строится график поверхности, который дает возможность обнаружить нарушения и дефекты в структуре исследуемого материала. Построена имитационная модель плоского проводящего материала с помощью программного пакета Multisim. На имитационной модели проводящего материала были поставлены опыты, результаты которых подтвердили действенность рассмотренного метода.

Ключевые слова: метод контроля, плоский материал, имитационная модель, элементарный объем, поверхность.

Введение. В неразрушающем контроле (НК) существует большое разнообразие методов и способов диагностики различных объектов контроля (ОК). Центральным вопросом данной статьи является дефектоскопия плоских проводящих ОК. Подобные задачи возникают при производстве и контроле функциональных тонких пленок, электрохимической бумаги, проводящих полимеров и металлической фольги для использования в микросхемах и электронных платах, а также при дефектоскопии композитов из углеродистого волокна. Для решения данной задачи возможно использование таких видов НК, как магнитный, вихретоковый, радиоволновой и радиационный.

Анализ литературы. Основные подходы для решения поставленной задачи приведены в [2, 3, 4].

Цель статьи. Рассмотрение способа реализации электроимпедансного метода при диагностике плоских проводящих материалов, описание имитационной модели процессов, анализ результатов поставленных опытов на имитационной модели.

Постановка проблемы. Рассматриваемый электроимпедансный метод входит в группу электропараметрических методов электрического НК, основанных на создании в контролируемом объекте электрического поля, непосредственным воздействием на него электрическим возмущением, (например, электростатическим полем, полем постоянного или переменного стационарного тока). В качестве первичного информативного параметра используются электрические характеристики объекта контроля [1].

Сущность электроимпедансного метода заключается в контроле технического состояния ОК путем измерения значения его импеданса или адмитанса в широком диапазоне частот.

Для этого через контролируемый участок ОК пропускают электрический ток, и по полученному значению электрического сопротивления судят о геометрических размерах ОК, наличии и местоположении дефектов, а также о размерах параметрах этих дефектов [2].

В большинстве случаев для дефектоскопии плоских ОК применяются методы, основанные на перемещении либо измерительного механизма, либо самого исследуемого объекта. Рассматриваемый метод измерения позволяет проводить анализ без перемещения каких-либо частей измерительной схемы. На рисунке 1 представлена реализация данного метода.

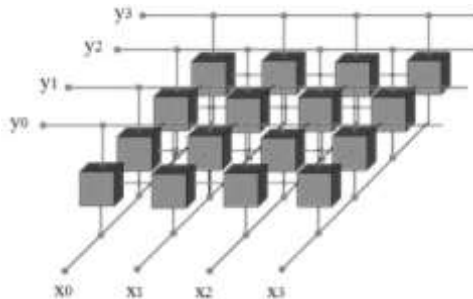


Рис. 1 – Реализация электроимпедансного метода НК

Между двумя наборами токоподводящих электродов, которые располагаются перпендикулярно друг другу, образуя сетку, помещается плоский ОК. Это позволяет обследовать все пространство между наборами электродов, определяя распределение проводимостей между каждой парой скрещивающихся электродов. О наличии и местоположении дефекта можно судить по существенному изменению (всплеску) значения электрического импеданса при сканировании ОК с экстремумом, соответствующим нахождению дефекта в точке скрещивания потенциальных электродов.

Математическое описание распределения плотности тока в электропроводящем объекте при подключении к нему потенциальных электродов может быть получено путем решения краевой задачи с использованием уравнений Максвелла с определенными граничными условиями. Аналитическое решение данной задачи является весьма затруднительным, и в практике НК находится, как правило, с учетом ряда допущений на основании методов имитационного, физического и математического моделирования. Цель решения данной задачи – оптимизация параметров контроля, в частности, расстояний между потенциальными электродами. Выбор указанных параметров непосредственно влияет на метрологические характеристики метода при измерении геометрических параметров ОК и его дефектов, прежде всего, на чувствительность и точность измерения [3].

Для исследования данного метода была построена имитационная модель. Анализ специализированной литературы показал, что сплошную среду

электрической модели можно заменить, допуская известную степень приближения, большим числом элементарных объемов, составленных из сопротивлений [4]. На рисунке 2 изображен элемент из шести сопротивлений, заменяющий параллелепипед, вырезанный из сплошной среды, который является элементом электрической модели.

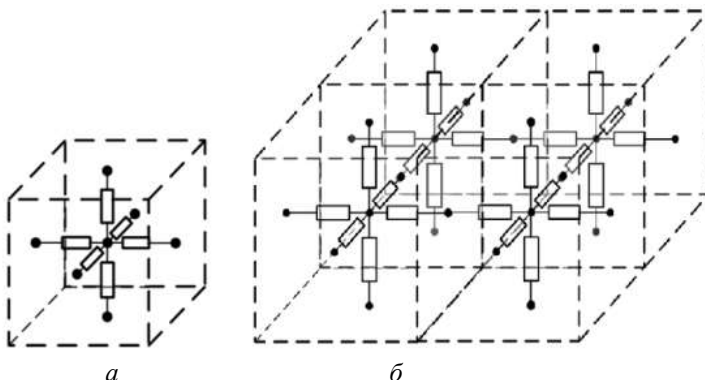


Рис. 2 – Элементарный объем электрической модели (а) и фрагмента ОК (б)

На рисунке 3 изображена имитационная модель элементарной ячейки и фрагмента модели ОК, которые построены с помощью программы Multisim. Фрагмент ОК представляет собой сетку размерами 2x2 элементарных объема.

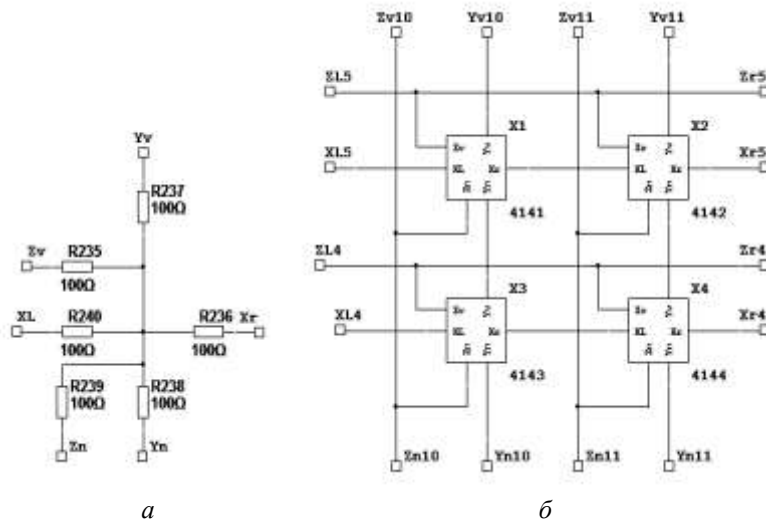


Рис. 3 – Имитационная модель элементарной ячейки (а) и фрагмента модели ОК размером 2x2 элементарных объема (б)

Результаты исследований. На представленной имитационной модели был поставлен ряд опытов, изложенных ниже.

Опыт 1. Имитационная модель ОК состоит из 256 ячеек, то есть из 16×16 элементарных объемов. Значения сопротивлений резисторов в каждой ячейке равны, поэтому материал ОК можно считать однородным. В каждой такой ячейке было произведено измерение токов. После по полученным значениям был построен график поверхности, который изображен на рисунке 4.

На расстоянии трех ячеек от края наблюдается влияние краев ОК на распределение электрической проводимости.

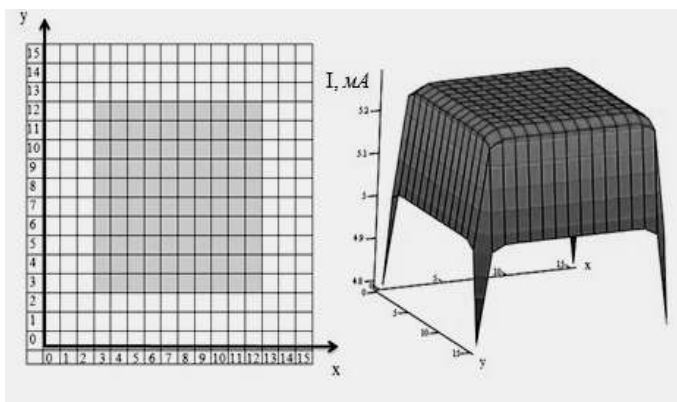


Рис. 4 – Результаты опыта 1

График распределения токов для центральной части объекта контроля представленный на рис. 5 позволяет исключить краевые эффекты.

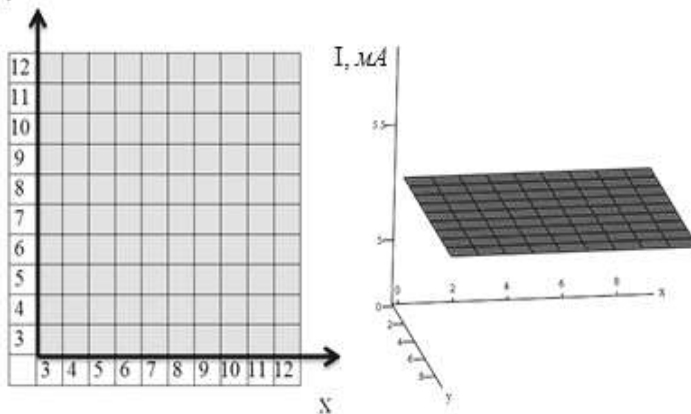


Рис. 5 – График распределения токов в центральной части для однородного ОК

Опыт 2. В одной из ячеек сопротивление было увеличено на 20 %. На графике, приведенном на рисунке 6 можно наблюдать всплеск в области ячейки с повышенным сопротивлением. Сопротивление увеличивается, следовательно, проводимость падает. Обратный эффект возникает при понижении сопротивления ячейки на 20 %.

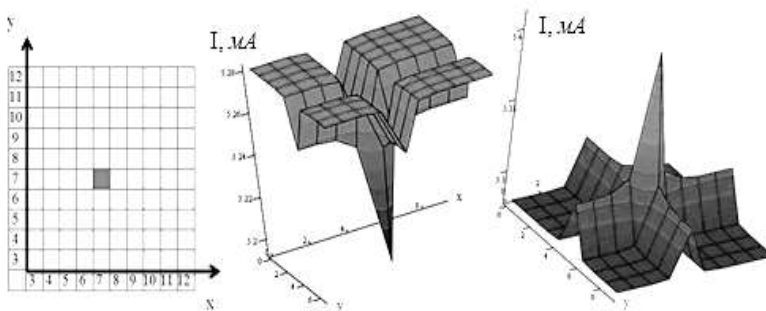


Рис. 6 – Результаты опыта 2

Опыт 3. В данном опыте изменялись 3 ячейки, но изменения вносились с разными знаками. Две ячейки были меньше на 20%, а одна была на 20 % больше. График приведен на рисунке 7.

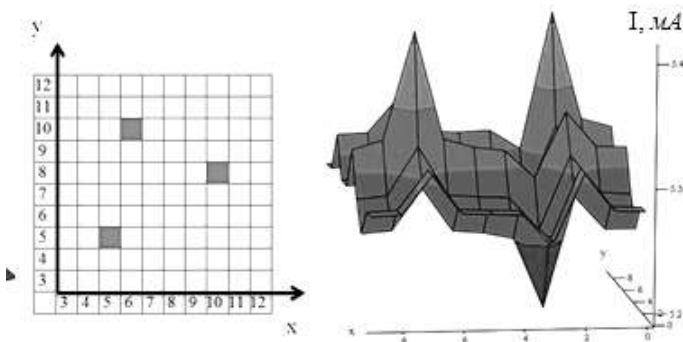


Рис. 7 - Результаты опыта 3

Дискретность получаемой характеристики увеличивает погрешность измерений, т.к. электрическое поле действует не только на элементы находящиеся непосредственно в точке между скрещивающимися линиями, но и на элементы находящиеся вблизи этой точки. Следовательно, в результате измерения будут учитываться проводимости этих частиц. Результирующая характеристика получается дискретной и данные о частицах, находящихся между «узлами» сетки могут быть утеряны. Поэтому следует выбирать оптимальное расстояние между электродами, при котором можно с минимальной

погрешностью определять проводимость зон между точками скрещивания с помощью снятых с ближайших точек. Речь идет о соизмеримости шага сетки с размерами и расположением возможных дефектов. Схемная реализация измерительной системы, может быть осуществлена с помощью аналоговых коммутаторов, которые выбирают одну из пар x - и y -линий, между которыми измеряется проводимость.

Конструктивно возможно выполнить измерительную сетку с микронным шагом, и коммутаторы в одной микросхеме.

Выводы. Получены результаты, показывающие возможность применения метода для контроля однородности пленок и обнаружения дефектов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на определение разрешающей способности метода, анализ чувствительности; исследование трехмерной модели объемных тел; установление соотношений между шагом сетки и параметрами ОК; проведение реальных экспериментов с различными материалами.

Список литературы: 1. ГОСТ 25315-82 Контроль неразрушающий электрический. Термины и определения. 2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 5: Кн. 2: К. В. Подмастерьев и др. Электрический контроль. – М.: Машиностроение, 2006. – 679 с: ил. 3. Х.Гулд, Я.Тобочник "Компьютерное моделирование в физике", В 2-х частях, Часть первая. М., Мир, 1990.–400 с. 4. Е. Н. Макиевцов "Модели из кубиков". М: Сов. Радио, 1978.– 192 с., ил.
Bibliography (transliterated):1. GOST 25315-82 Kontrol' nerazrushajushhij jelektri-cheskij. Terminy i opredelenija. 2. Nerazrushajushhij kontrol': Spravochnik: V 8 t. Pod obshh. red. V. V. Kljueva. T. 5: Kn. 2: K. V. Podmaster'ev i dr. Jelek-tricheskiy kontrol'. – M.: Mashinostroenie, 2006. – 679 s: 3. H.Guld, Ja.Tobochnik "Komp'juternoe modelirovanie v fizike", V 2-h chastjah, Chast' pervaja. M., Mir, 1990.–400 s. 4. E. N. Makievcov "Modeli iz kubikov". M: Sov. Radio, 1978.– 192 s.

Поступила (received) 16.01.2014

О. П. ДАВИДЕНКО, професор НТУ «ХПІ»;
Л. І. СИДОРОВА, студентка НТУ «ХПІ»

КОРЕЛЯЦІЙНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТ РІДИНИ

У статті розглянуто можливість застосування кореляційного методу, заснованого на акустичних сигналах, для контролю витрат води в трубопроводах без допоміжних джерел збурення.

Ключові слова: витратомір, кореляційна функція, акустичні сигнали, контроль витрат.

Вступ. Подальший розвиток світової економіки ґрунтується на впровадженні останніх досягнень науки у виробництво, розробці та серійному виробництві новітніх приладів та матеріалів. Функціонування будь-якої галузі сучасної економіки, наприклад, енергетики, машинобудування, хімічної та харчової промисловості неможливе без використання сучасних лічильників та витратомірів для автоматизації технологічних процесів. У світлі неухильного зростання тарифів на енергоресурси та воду в сфері житлового та промислового споживання все більш актуальною стає тема більш точного підрахунку витрат цих ресурсів.

Оскільки в рідині завжди присутні найдрібніші бульбашки газу або пари, то, рухаючись з потоком і потрапляючи в область тиску $p < p_{кр}$, вони втрачають стійкість і набувають здібності до необмеженого зростання. Після переходу в зону підвищеного тиску і вичерпання кінетичної енергії рідини, що розширюється, бульбашки припиняють зростання і вони починають скорочуватися. Якщо бульбашка містить достатньо багато газу, то після досягнення нею мінімального радіусу, вона відновлюється і здійснює декілька циклів затухаючих коливань. А якщо газу мало, то бульбашка закривається повністю в першому періоді життя. Таким чином, поблизу обтічного тіла створюється досить чітко обмежена "зона кавітації", заповнена рухомими бульбашками. Скорочення бульбашки відбувається з великою швидкістю і супроводжується звуковим імпульсом.

Якщо ступінь розвитку кавітації такий, що у випадкові моменти часу виникає і закривається безліч бульбашок, то явище супроводжується сильним шумом з суцільним спектром від декількох сотень Гц до сотень і тисяч кГц.

Мета дослідження. Розглянути можливість застосування кореляційного методу, заснованого на акустичних сигналах, для контролю витрат води в трубопроводах без допоміжних джерел збурення.

Матеріали дослідження. Схема експерименту показана на рисунку 1.1.

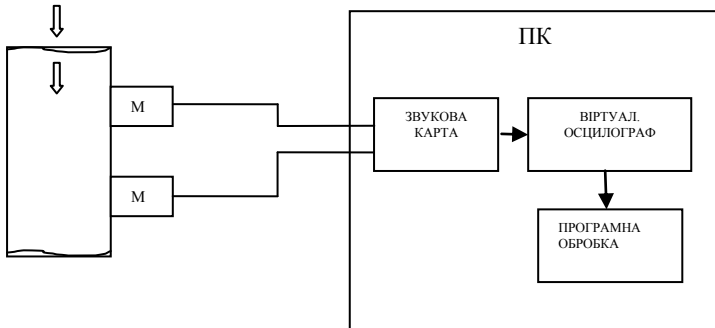


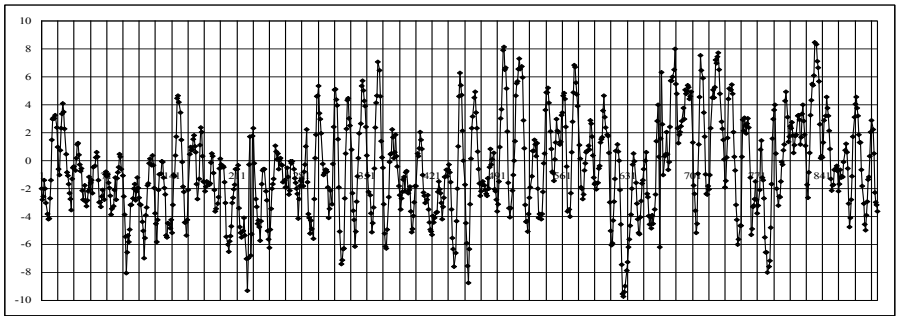
Рис. 1 – Схема експерименту

Для досліду до трубопроводу кріпиться два електретні мікрофона, які під'єднуються до звукової карти на персональному комп'ютері. Якщо відкрити кран на трубопроводі, утворюється потік води в якому бульбашки води здійснюють шум. За допомогою програми віртуального осцилографа на персональному комп'ютері вираховуються дані цього шуму (точка відліку).

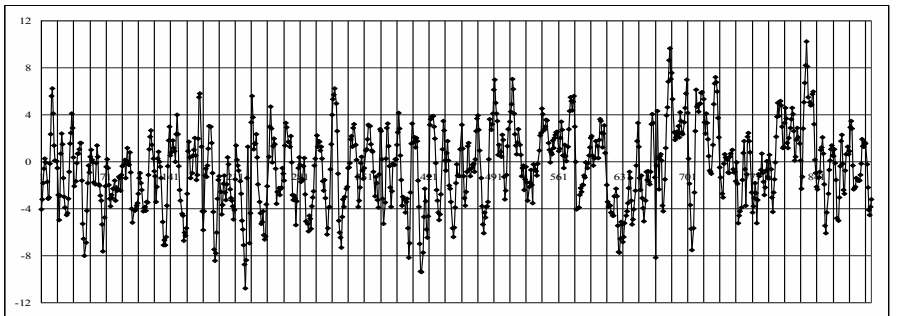
Результати досліджень. Експериментально визначено, що 10 літрів води витікає за 82 секунди. Від відстані мікрофонів один від одного залежить кількість точок відліку. Експеримент проводився на відстані 10 мм. Для розрахунку витрати рідини потрібно визначити час, за який вода пройде 10 мм відстані. Два максимуми на кореляційній кривій, відповідають моменту проходження води у двох точках. В експерименті ці точки – це точки закріплення на трубі електретних мікрофонів. Частота дискретизації звукової карти 48 кГц.

При математичній обробці даних у програмі «Mathcad», знаючи об'єм води, визначається значення витрати води, яке дорівнює 0,12 л/с. За допомогою значень площі перерізу труби і витрати води, знаходиться середня швидкість потоку води 604,69 мм/с. Визначивши час, за який вода протікає відстань між двома мікрофонами і час дискретизації, розраховується теоретична кількість точок відліку, за які кореляційна функція досягне максимуму. В результаті розрахунку отримуємо 825 точок відліку.

На рисунку 2 зображені сигнал з першого мікрофона (а) і сигнал з другого мікрофона (б). На основі двох сигналів будувється взаємкореляційна функція, яка зображена на рисунку 3.



а



б

Рис. 2 – Сигнали з першого (а) і другого (б) мікрофонів

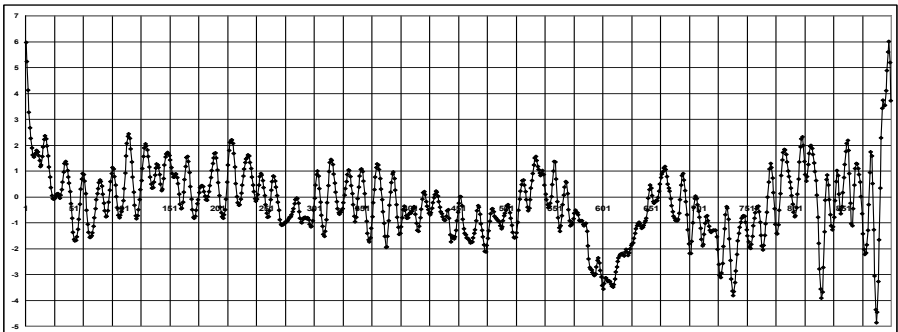


Рис. 3. – Взаємкореляційна функція

На рисунку 3 кореляційна функція досягає максимум у точці 898, що відповідає швидкості потоку 556,792 мм/с.

Визначивши теоретичний і експериментальний максимуми на кореляційній кривій, можна побачити різницю значень. Це говорить про присутність похибки експерименту, яка приблизно дорівнює 10%. Відстань між мікрофонами має бути малою, щоб сигнал не змінював свої характеристики. Але

відстань, яка була взята для експерименту майже така, як і діаметр мікрофонів. Це вочевидь і є причиною великої похибки експерименту. Для зменшення похибки необхідне конструктивне рішення – точковий контакт мікрофонів з трубопроводом.

Висновок. За допомогою даного експерименту підтверджено працездатність кореляційного методу для визначення витрат рідини в трубопроводі без порушення цілісності системи і без допоміжних джерел збурення. Для використання цього методу на практиці у побутовій чи виробничій сфері, необхідно вирішити ще ряд основних питань, а саме: удосконалити конструкцію установки та провести експеримент на основі нової конструкції, а також визначити оптимальну відстань між мікрофонами. Ще необхідно застосувати більш ефективний метод математичної обробки результатів експерименту.

Список літератури: 1. Бендат Д. Измерение анализ случайных процессов: справочник / Д. Бендат. – К.: Изд-во «Мир», 1971. – 464 с. 2. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества: справочник / П. П. Кремлевский. – К.: Изд-во «Мишиностроение», 1989. – 567 с. 3. Бриндли К. Измерительные преобразователи: справочник / К. Бриндли. – К.: Изд-во «Энергоатомиздат», 1991. – 346 с. 4. Джексон Р. Г. Новейшие датчики / Р. Г. Джексон. – К.: Изд-во «Техносфера», 2007. – 384 с. 5. Евтихийев Н. Н. Измерение электрических и неэлектрических величин / Н. Н. Евтихийев. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

Bibliography (transliterated): 1. Bendat D. Izmerenie analiz sluchajnyh processov: spravochnik / D. Bendat. – K.: Izd-vo «Mir», 1971. – 464 s. 2. Kremlevskij P. P. Rashodomery i schetchiki kolichestva: spravochnik / P. P. Kremlevskij. – K.: Izd-vo «Mishinostroenie», 1989. – 567 s. 3. Brindli K. Izmeritel'nye preobrazovateli: spravochnik / K. Brindli. – K.: Izd-vo «Jenergoatomizdat», 1991. – 346 s. 4. Dzhekson R. G. Novejshie datchiki / R. G. Dzhekson. – K.: Izd-vo «Tehnosfera», 2007. – 384 s. 5. Evtihiev N. N. Izmerenie jelektricheskikh i nejelektricheskikh velichin / N. N. Evtihiev. – M.: Jenergoatomizdat, 1990. – 352 s.

Надійшла (received) 05.12.2013

Ю.М. ЕПИФАНОВ, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., Институт
сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков;
В.С. СУЗДАЛЬ, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., Институт
сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков;
А.В. СОБОЛЕВ, канд. техн. наук, Институт сцинтилляционных
материалов НАН Украины, Харьков

РАНДОМИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ МИМО-СИСТЕМАМИ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ

Для кристаллизации сцинтилляционных монокристаллов рассмотрен метод стабилизации по состоянию и выходу линейной МИМО-системы на основе специфического преобразования подобия исходной системы, что позволяет в явном виде определить элементы, изменение которых с помощью обратной связи обеспечивает устойчивость замкнутой системы.

Ключевые слова: монокристалл, метод Чохральского, система, управление, стабилизация, устойчивость, рандомизация.

Введение. Аппарат исследования динамических систем получил широкое распространение для множества современных объектов управления, которые могут быть представлены в виде линейных моделей и для которых используют как регулярные, так и нерегулярные (теория локализации систем) законы управления, а также выполняют параметризацию этих законов. Задача стабилизации линейной динамической системы, в той или иной постановке, до сих пор не утратила своей актуальности. В процессе решения всех известных постановок этой задачи обеспечиваются некоторые заданные требования к процессу управления. К настоящему времени ставится вопрос о таких способах реализации этих требований, которые дают возможность упростить решение задачи синтеза управления, обеспечить устойчивость и высокое качество управления.

Анализ исследований и публикаций. В практике решения задачи стабилизации линейных систем с многими входами и многими выходами возникает ряд проблем, которые рассматривались в следующих работах: размещение полюсов замкнутой системы [1]; формулировка и решение математически строгой задачи модального управления обыкновенными многоходовыми линейными системами [2, 3]; использование *LMI*-областей [4 – 6], границы которых описываются определенного вида линейными матричными неравенствами; использование алгебраических и матричных методов в линейных МИМО-системах [7].

Формирование целей и задач. Особое внимание в настоящее время уделяется исследованиям методов стабилизации по состоянию и выходу линейной МИМО-системы, выполненных на основе преобразования

© Ю. М. Епифанов, В. С. Суздаль, О. В. Соболев, 2014

подобия исходной системы и устраняющих трудности вычислительного характера с ростом размерности пространства состояний.

Целью настоящей работы является решение задачи синтеза закона стабилизации для многомерного процесса с использованием рандомизации для процедуры генерации матриц определенных размеров.

Для достижения поставленной цели необходимо для МИМО-системы обеспечить выполнение требования в смысле размещения собственных значений матриц замкнутой системы в заданной области и в практических приложениях осуществить синтез стабилизирующего регулятора по состоянию и по выходу для системы управления процессом выращивания монокристаллов.

Материалы исследований: рандомизированный синтез. В качестве объекта управления выбрана линейная многомерная динамическая система:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu, \quad x(t_0) = x_0, \\ y &= Cx; \quad x \in R^n, \quad u \in R^r, \quad y \in R^m, \end{aligned} \quad (1)$$

где x – вектор состояния, y – выходной вектор, u – вектор управления, подаваемого на вход ОУ x_0 – начальные условия, т.е. состояние ОУ в начальный момент времени t_0 , A, B, C – постоянные матрицы соответствующих размеров.

Для системы (1) существует управление с обратной связью

$$u = Fx, \quad (2)$$

где $F \in R^{r \times n}$ – матрица регулятора по состоянию, либо

$$u = Ky = KCx, \quad (3)$$

где $K \in R^{r \times m}$ – матрица регулятора по выходу.

Управление системой (1) с помощью законов (2) или (3) является такой задачей, когда необходимо найти такие матрицы F или K , что выполняются некоторые требования, например, по размещению полюсов замкнутой системы (собственных значений матриц $A + BF$, $A + BKC$ на комплексной плоскости) или требования к переходным процессам в замкнутой системе в смысле минимума некоторого заданного функционала. Такая задача, например, была решена в [8] на основе специфического преобразования подобия исходной системы.

Известно, что если для некоторой матрицы $M \in R^{n \times n}$ выполняется неравенство Ляпунова

$$M^T P + PM < 0, \quad P^T = P > 0, \quad (4)$$

то эта матрица является асимптотически устойчивой.

Исходя из (4) докажем следующие теоремы.

Теорема 1. Пусть для системы (1) выполняется матричное неравенство Ляпунова

$$\left(\begin{array}{c|c} B^L AB^{LT} & B^L AB \\ \hline X & Y \end{array} \right)^T Z + Z \left(\begin{array}{c|c} B^L AB^{LT} & B^L AB \\ \hline X & Y \end{array} \right) < 0, \quad (5)$$

где $Z = Z^T > 0$, $X \in R^{s \times (n-s)}$, $Y \in R^{s \times s}$ – искомые матрицы, тогда асимптотически устойчива любая матрица $A + BF$, у которой

$$F = XB^L + YB^+ - B^+ A, \quad (6)$$

где B^+ – псевдообратная матрица Мура-Пенроуза, B^L – левый делитель нуля, который удовлетворяет условию $B^L B = 0_{r \times r}$, B^{LT} – ортогональная матрица, удовлетворяющая условию $B^L B^{LT} = I_{n-r}$ [9].

Из выполнения матричного неравенства Ляпунова (5) следует, что асимптотически устойчива матрица

$$\left(\begin{array}{c|c} B^L AB^{LT} & B^L AB \\ \hline X & Y \end{array} \right). \quad (7)$$

Пусть матрица преобразования подобия [8]

$$T = \left(\begin{array}{c} B^L \\ B^+ \end{array} \right) \quad (8)$$

обратимая матрица, для которой

$$T^{-1} = \left(\begin{array}{c} B^L \\ B^+ \end{array} \right)^{-1} = \left(B^{LT} | B \right), \quad (9)$$

т.е.

$$\left(B^{LT} | B \right) \left(\begin{array}{c} B^L \\ B^+ \end{array} \right) = B^{LT} B^L + B B^+ = I_n. \quad (10)$$

Преобразования подобия для матриц A и $A + BF$:

$$TAT^{-1} = \left(\begin{array}{c|c} B^L AB^{LT} & AB^L B \\ \hline B^+ AB^{LT} & B^+ AB \end{array} \right), \quad (11)$$

$$T(A + BF)T^{-1} = \left(\begin{array}{c|c} B^L AB^{LT} & B^L AB \\ \hline B^+ AB^{LT} + FB^{LT} & B^+ AB + FB \end{array} \right). \quad (12)$$

Приравняем правую часть выражения (12) к асимптотически устойчивой матрице (7) и проведем почленное сравнение этих матриц. В результате получим уравнение относительно матрицы F :

$$\left(\begin{array}{c|c} 0_{(n-r) \times (n-r)} & 0_{r \times r} \\ \hline X - B^+ AB^{LT} & Y - B^+ AB \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c|c} 0_{(n-r) \times (n-r)} & 0_{r \times r} \\ \hline FB^{LT} & FB \end{array} \right), \quad (13)$$

или

$$\left(X - B^+ AB^{LT} \middle| Y - B^+ AB\right) = F \left(B^{LT} \middle| B\right). \quad (14)$$

Используя свойство (9) перейдем от (14) к равенству

$$\left(X - B^+ AB^{LT} \middle| Y - B^+ AB\right) \begin{pmatrix} B^L \\ B^+ \end{pmatrix} = F, \quad (15)$$

и далее получаем

$$\begin{aligned} F &= XB^L - B^+ AB^{LT} B^L + YB^+ - B^+ ABB^+, \\ F &= XB^L + YB^+ - B^+ A(B^{LT} B^L + BB^+). \end{aligned} \quad (16)$$

С учетом (10) переходим к формуле (6).

Следовательно, в силу асимптотической устойчивости матрицы (7) асимптотически устойчива правая матрица выражения (12) при $F = XB^L + YB^+ - B^+ A$.

Доказательство закончено.

Теорема 2. Пусть для системы (1) выполняется матричное неравенство Ляпунова (5). Пусть также выполняется условие

$$(XB^L + YB^+ - B^+ A)C^R = 0_{r \times (n-m)}, \quad (17)$$

тогда асимптотически устойчива любая матрица $A + BKC$, где

$$K = (XB^L + YB^+ - B^+ A)C^+, \quad (18)$$

где C^+ – псевдообратная матрица.

Преобразования подобия для матриц $A + BKC$.

$$T(A + BKC)T^{-1} = \left(\frac{B^L AB^{LT}}{B^+ AB^{LT} + KCB^{LT}} \middle| \frac{B^L AB}{B^+ AB + KCB} \right). \quad (19)$$

Приравняем правую часть выражения (19) к матрице (7) и проведем поблочное сравнение этих матриц. В результате получим уравнение относительно матрицы K

$$\left(\frac{0_{(n-r) \times (n-r)}}{X - B^+ AB^{LT}} \middle| \frac{0_{r \times r}}{Y - B^+ AB} \right) = \left(\frac{0_{(n-r) \times (n-r)}}{KCB^{LT}} \middle| \frac{0_{r \times r}}{KCB} \right), \quad (20)$$

или в другом виде

$$\left(X - B^+ AB^{LT} \middle| Y - B^+ AB\right) = KC \left(B^{LT} \middle| B\right) \quad (21)$$

Используя свойство (9) перейдем от (21) к уравнению

$$\left(X - B^+ AB^{LT} \middle| Y - B^+ AB\right) \begin{pmatrix} B^L \\ B^+ \end{pmatrix} = KC. \quad (22)$$

Линейное уравнение (22) разрешимо относительно неизвестной матрицы K тогда и только тогда, когда выполняется условие решения правостороннего матричного уравнения [9]

$$\left(X - B^+ AB^{LT} \middle| Y - B^+ AB \right) \begin{pmatrix} B^L \\ B^+ \end{pmatrix} C^R = 0_{r \times (n-m)}, \quad (23)$$

где C^R – матричный правый делитель нуля матрицы C , который удовлетворяет условию $CC^R = 0$.

Упростим выражение (22) с учетом (16).

$$XB^L + YB^+ - B^+ A = KC. \quad (24)$$

Следовательно, в силу асимптотической устойчивости матрицы (7) асимптотически устойчива правая матрица выражения (19) при $K = (XB^L + YB^+ - B^+ A)C^+$.

Доказательство закончено.

Синтез управления для многомерной системы на основе теорем 1 или 2 предполагает решение матричного неравенства Ляпунова (5), что вызывает трудности вычислительного характера с ростом размерности пространства состояний. Одним из способов преодоления этого является рандомизация [10].

В [8] предложено, в данном случае, использовать процедуру генерации матрицы вида

$$A_r = \left(\begin{array}{c|c} \frac{B^L AB^{LT}}{X} & \frac{B^L AB}{Y} \end{array} \right), \quad (25)$$

где $X \in R^{r \times (n-r)}$, $Y \in R^{r \times r}$ таковы, что все элементы множества собственных значений лежат в левой полуплоскости.

$$eig(A_r) = \{ \lambda_i \in C : \det(\lambda I_n - A_r) = 0 \}$$

Объект управления. Сцинтилляционные монокристаллы (СМК) выращивают в промышленности методом Чохральского на установках типа «РОСТ», в которых для оценки диаметра растущего кристалла применяют метод измерения падения уровня расплава в результате быстрого дискретного подъема кристалла из расплава на малую величину [11, 12]. Известно, что качество СМК во многом определяется стабильностью скорости кристаллизации, о которой судят по стабильности диаметра выращиваемого монокристалла. Диаметр растущего кристалла управляют, изменяя тепловые условия выращивания. Современные требования к стабильности диаметра монокристалла очень высоки. Например, точность стабилизации диаметра сцинтилляционного монокристалла весом в 500 кг должна быть менее 1%.

Параметризация процесса выращивания как объекта управления (ОУ), проводилось на примере получения крупногабаритных активированных монокристаллов CsI(Tl) методом Чохральского [13]. Процесс выращивания рассматривался как двумерный ЛТИ-объект управления с двумя входными вели-

чинами – температура основного Td и дополнительного Tb нагревателей и двумя выходами – диаметр кристалла Ds и температура подпиточного расплава Tr . В пространстве состояний ОУ имеет следующие матрицы

$$A = \begin{bmatrix} x1 & x2 & x3 & x4 \\ x1 & 0 & -1.49 & 0 & 0 \\ x2 & 1 & -5.65 & 0 & 0 \\ x3 & 0 & 0 & 0 & -0.43 \\ x4 & 0 & 0 & 0.5 & -3.12 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} u1 & u2 \\ x1 & -0.52 & 2.14 \\ x2 & 0.27 & 5.57 \\ x3 & 0.29 & -0.39 \\ x4 & 1.69 & -0.83 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} x1 & x2 & x3 & x4 \\ y1 & 0 & 4 & 0 & 0 \\ y2 & 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix}.$$

Объект управления полностью управляем и наблюдаем.

Синтез регуляторов для управления процессом кристаллизации будем проводить в замкнутой системе на основе следующих требований к переходному процессу в канале управления $Td - Ds$:

- длительность переходного процесса не более 15 с,
- перерегулирование менее 5%,
- установившаяся ошибка менее 0.1%.

Результаты исследований: синтез регулятора по состоянию. Для синтеза стабилизирующего регулятора по состоянию воспользуемся теоремой 1. Соответственно, псевдообратная матрица B^+ , левый делитель нуля B^L , ортогональная матрица B^{LT} , будут:

$$B^+ = \begin{pmatrix} -0.4724 & 0.2458 & 0.1370 & 0.7983 \\ 0.0599 & 0.1553 & -0.0055 & 0.0118 \end{pmatrix},$$

$$B^L = \begin{pmatrix} 0.2571 & -0.0635 & 1 & 0 \\ 1.4405 & -0.4794 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$B^{LT} = \begin{pmatrix} 15.0731 & -1.9958 \\ 45.2961 & -8.0837 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Генерация матрицы (25) проводилась в ходе итерационного процесса рандомизации в среде MATLAB с использованием команды `randn`.

Оптимальной в смысле выполнения требований к переходному процессу в замкнутой системе, является матрица

$$A_r = \begin{pmatrix} -0.3096 & 0.5466 & -0.3489 & -0.2464 \\ 10.1454 & -2.1433 & -2.2391 & 2.3058 \\ 2.3409 & -0.5177 & -0.8653 & 0.5084 \\ -0.3939 & -0.0865 & -1.6278 & -0.0514 \end{pmatrix},$$

где матрицы

$$X = \begin{pmatrix} 2.3409 & -0.5177 \\ -0.3939 & -0.0865 \end{pmatrix}, Y = \begin{pmatrix} -0.8653 & 0.5084 \\ -1.6278 & -0.0514 \end{pmatrix}.$$

Собственные значения матрицы A_r лежат в левой полуплоскости. Регулятор F находился по выражению (6).

$$F = \begin{pmatrix} 0.0495 & -0.7927 & 1.8203 & 1.3387 \\ 0.4663 & 0.5111 & -0.9895 & -0.2272 \end{pmatrix}. \quad (26)$$

Собственные значения матриц замкнутой системы $A+BF$ лежат в левой полуплоскости, что свидетельствует об успешном решении задачи стабилизации. Запас устойчивости системы d_λ по корням ее характеристического полинома $\Delta(\lambda)$ определялся по выражению $d_\lambda = -\max \operatorname{Re} \lambda_i$, где $\lambda_i (i = \overline{1, n})$ – корни характеристического полинома степени n . Для замкнутой системы с регулятором по состоянию (26) $d_\lambda = 9.1821$.

Для канала управления «температура основного Td нагревателя – диаметр кристалла Ds » на рис. 1 приведена переходная характеристика замкнутой системы, на рис. 2 – функции дополнительной чувствительности T_z и чувствительности S_z .

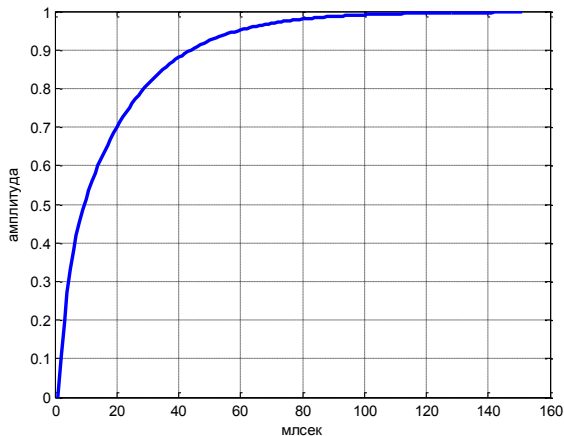


Рис. 1 – Переходная характеристика замкнутой системы с регулятором по состоянию

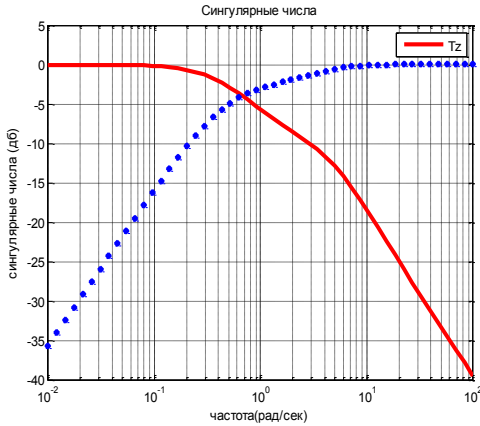


Рис. 2 – Функции T_z и S_z в системе с регулятором по состоянию

Анализ полученных результатов синтеза показывает, что требования к системе управления выращиванием монокристаллов в системе с синтезированным регулятором по состоянию выполняются.

Синтез регулятора по выходу. Для синтеза стабилизирующего регулятора по выходу воспользуемся теоремой 2. Псевдообратная матрица C^+ и правый делитель нуля C^R матрицы C , соответственно, будут:

$$C^+ = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0.25 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0.25 \end{pmatrix}, \quad C^R = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Для выполнения требований к переходному процессу в замкнутой системе генерацией матрицы (25) методом рандомизации найдены матрицы

$$X = \begin{pmatrix} -0.6462 & 9.0161 \\ -9.2371 & -0.9405 \end{pmatrix}, \quad Y = \begin{pmatrix} -1.6339 & -6.9758 \\ 7.8826 & -2.4483 \end{pmatrix}.$$

Так как условие (17) выполняется, то матрица регулятора находится по выражению (18)

$$K = \begin{pmatrix} -1.2893 & 2.5863 \\ 7.0265 & 2.4783 \end{pmatrix}.$$

Для канала управления $Td - Ds$ на рис. 3 приведена переходная характеристика замкнутой системы с регулятором по выходу, на рис. 4 – функции дополнительной чувствительности T_z и чувствительности S_z . Собственные значения матриц замкнутой системы $A + BKC$ лежат в левой полуплоскости. Запас устойчивости системы $d_\lambda = 153.9664$.

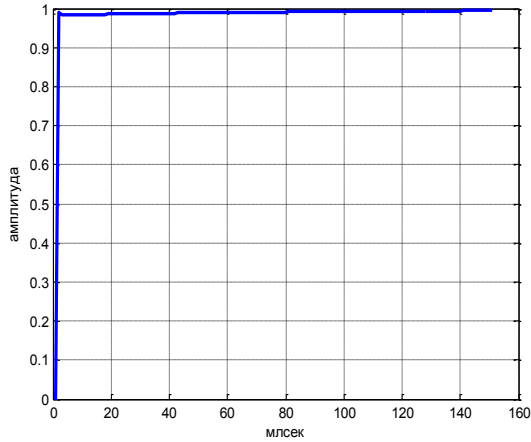


Рис. 3 – Переходная характеристика замкнутой системы с регулятором по выходу

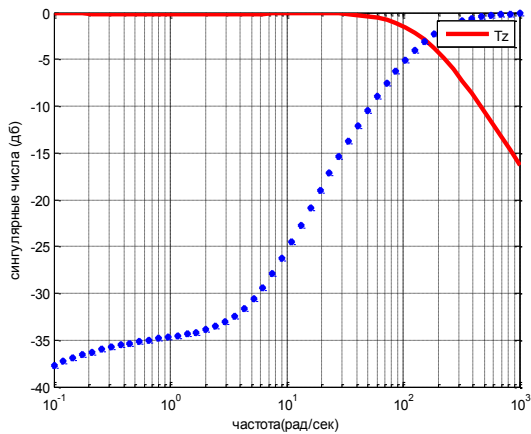


Рис. 4 – Функции T_z и S_z в системе с регулятором по выходу

Анализ полученных результатов показывает, что требования к системе управления выращиванием монокристаллов в системе с синтезированным регулятором по выходу выполняются, а по сравнению с регулятором по состоянию система отличается степенью подавления возмущений (см. рис. 2 и рис. 4).

Выводы. Для управления процессом выращивания монокристаллов сформулированы требования к системе управления и на основе двух доказанных теорем синтезированы регулятор по состоянию и регулятор по выходу. Полученные с этими регуляторами системы устойчивы, что свидетельствует об успешном решении задачи стабилизации. Системы управления с синтезированными регуляторами обеспечивают выполнение требований к

качеству систем управления выращиванием крупногабаритных СМК и различаются степенью подавления возмущений в низкочастотной области.

Список литературы: 1. Kailath T. Linear systems. Englewood cliffs / T. Kailath. – NJ : Prentice Hall, 1980. 2. Kalman R.E. Contributions to the theory of optimal control / R.E. Kalman // Bulletin de la Sociedad Matematica Mexicana. –1960. – № 5. – P. 102–119. 3. Wonham W.M. On pole-assignment in multi-input controllable systems / Wonham W.M. // IEEE Trans. Automat. Control. –1967. – V. 12, № 6. – P. 660–667. 4. Skelton R.E. An unified algebraic approach to linear control design / R.E. Skelton, T. Iwasaki, K. Grigoriadis. – London : Taylor&Francis Ltd., 1998. 5. Chilali M. H_∞ design with pole placement constraints: an LMI approach / M. Chilali, P. Gahinet // IEEE Trans. Automat. Control. –1996. – V. 41, № 3. – P. 358–367. 6. Scherer C. Multiobjective output-feedback control via LMI optimization / C. Scherer, P. Gahinet, M. Chilali // IEEE Trans. Automat. Control. –1997. – V. 42. – P. 896–911. 7. Мисриханов М. Ш. Алгебраические и матричные методы в теории линейных МИМО-систем / М. Ш. Мисриханов, В. Н. Рябченко // Вестник ИГЭУ. – Вып. 5. – 2005. – С. 196–240. 8. Мисриханов М. Ш. Новый метод стабилизации динамической системы / М. Ш. Мисриханов, В. Н. Рябченко // Вестник ИГЭУ. – Вып. IX. – М.: 2009. – С. 413–430. 9. Буков В. Н. Решение матричных уравнений методом канонизации / В. Н. Буков, В. Н. Рябченко, В. В. Косьянчук, Е. Ю. Зыбин // Вестник Киевского ун-та. Сер. Физ.-матем. Науки. – Вып. 1. – К.: Изд. Киевского нац. ун-та. – 2002. – С. 19–28. 10. Граничин О. Н. Рандомизированные алгоритмы оценивания и оптимизации при почти произвольных помехах / О. Н. Граничин, Б. Т. Поляк. – М.: Наука, 2003. – 200 с. 11. Суздаль В.С. Сцинтилляционные монокристаллы: автоматизированное выращивание. / [Суздаль В. С., Стадник П. Е., Герасимчук Л. И., Епифанов Ю. М.] // Сер. Состояние и перспективы развития функцион. матер. для науки и техники. – Харьков: ИСМА, 2009.– 260 с. 12. Рост кристаллов / [Горилецкий В. И., Гринев Б. В., Заславский Б. Г. и др.]. – Харьков: АКТА, 2002. – 535 с. 13. Суздаль В.С. Параметрическая идентификация VARMAX моделей процесса кристаллизации крупногабаритных монокристаллов / В. С. Суздаль, Ю. М. Епифанов, А. В. Соболев, И. И. Тавровский // Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління. – 2009. – №4(26). – С. 23–29.

Bibliography (transliterated): 1. Kailath T. Linear systems. Englewood cliffs / T. Kailath. – NJ : Prentice Hall, 1980. 2. Kalman R.E. Contributions to the theory of optimal control / R.E. Kalman // Bulletin de la Sociedad Matematica Mexicana. –1960. – № 5. – P. 102–119. 3. Wonham W.M. On pole-assignment in multi-input controllable systems / Wonham W.M. // IEEE Trans. Automat. Control. –1967. – V. 12, № 6. – P. 660–667. 4. Skelton R.E. An unified algebraic approach to linear control design / R.E. Skelton, T. Iwasaki, K. Grigoriadis. – London : Taylor&Francis Ltd., 1998. 5. Chilali M. H_∞ design with pole placement constraints: an LMI approach / M. Chilali, P. Gahinet // IEEE Trans. Automat. Control. –1996. – V. 41, № 3. – P. 358–367. 6. Scherer C. Multiobjective output-feedback control via LMI optimization / C. Scherer, P. Gahinet, M. Chilali // IEEE Trans. Automat. Control. –1997. – V. 42. – P. 896–911. 7. Misrihanov M. Sh. Algebraicheskie i matrichnye metody v teorii linejnyh MIMO-sistem / M. Sh. Misrihanov, V. N. Rjabchenko // Vestnik IGJeU. – Vyp. 5. – 2005. – С. 196–240. 8. Misrihanov M. Sh. Novyj metod stabilizacii dinamicheskoj sistemy / M. Sh. Misrihanov, V. N. Rjabchenko // Vestnik IGJeU. – Vyp. IX. – М.: 2009. – С. 413–430. 9. Bukov V. N. Reshenie matrichnyh uravnenij metodom kanonizacii / V. N. Bukov, V. N. Rjabchenko, V. V. Kos'janjuchuk, E. Ju. Zybin // Vestnik Kievskogo un-ta. Ser. Fiz.-matem. Nauki. – Vyp. 1. – К.: Izd. Kievskogo nac. un-ta. – 2002. – S. 19–28. 10. Granichin O. N. Randomizirovannye algoritmy ocenivaniya i optimizacii pri pochti proizvol'nyh pomehah / O. N. Granichin, B. T. Poljak. – М.: Nauka, 2003. – 200 s. 11. Cuzdal' V.S.. Scintilljacionnye monokristally: avtomatizirovannoe vyrashhivanie. / [Cuzdal' V. S., Stadnik P. E., Gerasimchuk L. I., Epifanov Ju. M.] // Ser. Sostojanie i perspektivy razvitiya funkcion. mater. dlja nauki i tehniki. – Har'kov: ISMA, 2009.– 260 s. 12. Rost kristallov / [Gorileckij V. I., Grinev B. V., Zaslavskij B. G. i dr.]. – Har'kov: AKTA, 2002. – 535 s. 13. Suzdal' V.S. Parametricheskaja identifikacija VARMAX modelej processa kristallizacii krupnogabaritnyh monokristallov / V. S. Suzdal', Ju. M. Epifanov, A. V. Sobolev, I. I. Tavrovskij // Novi tehnologii. Naukovij visnik Kremenchuc'kogo universitetu ekonomiki, informacijnih tehnologij i upravlinnja. – 2009. – №4(26). – S. 23–29.

Поступила (received) 04.02.2014

П. А. КАЧАНОВ, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»,
В. И. ГАЛИЦА, инж. НИЧ НТУ «ХПИ»,
В. М. АДАШЕВСКИЙ, канд. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»,
А. С. ГОРЛОВ, канд. пед. наук, доц. НТУ «ХПИ»,

АДАПТАЦИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ПРОЦЕССОВ К ТРЕНИРОВКАМ КОПЬЕМЕТАТЕЛЕЙ В ПОДГОТОВИТЕЛЬНОМ ПЕРИОДЕ ПО- СРЕДСТВОМ ИНТЕРАКТИВНОГО ТРЕНАЖЕРА

В статье освещены пути развития технических средств экспресс-диагностики функциональных кондиций легкоатлетов-копьеметателей и на основе проведенных теоретических исследований описаны варианты технической реализации экспресс-диагностики на примере интерактивного тренажера, позволяющего измерять начальную скорость вылета спортивного снаряда – аналога копья при использовании троса в помещении и, благодаря полученной информации, рассчитать результаты каждой из попыток, а также уровней их интенсивности в % от максимума.

Ключевые слова: Биомеханика, диагностическая система, интерактивный тренажер, динамическая модель, кинематическая модель, симулятор.

Одной из важнейших задач подготовки спортсменов является объективизация управления состоянием спортсмена в ходе его тренировочной и соревновательной деятельности. В спорте широко используют приборы и комплексы, позволяющие получать и обрабатывать информацию, характеризующую различные параметры специфической деятельности спортсмена в ходе выполнения им упражнений. Это в свою очередь позволяет расширять границы комплексного контроля в системе спортивной подготовки. Однако в современном мире развития измерительной и вычислительной техники, а также коммуникационных систем удивительным выглядит тот факт, что специалисты спорта крайне медленно внедряют современные технические решения, могущие открыть глаза наставникам как при отборе, так и при подготовке атлетов. Именно по этой причине на постсоветском пространстве процент атлетов, перешедших из юношеского во взрослый спорт на порядок ниже, чем в развитых странах мира.

Цель научных исследований – комплексное научно-техническое решение проблемы характеристики биомеханических параметров движений атлетов непосредственно в процессе выполнения ими спортивных упражнений с помощью оригинальных технических средств, позволяющих определять и закреплять эффективные и рациональные двигательные навыки с требуемой интенсивностью и с наименьшими физическими затратами.

Для достижения цели исследований были поставлены и решены такие задачи:

-проведены сравнительные экспериментальные исследования

© П. А. Качанов, В. И. Галица, В. М. Адашевский, А. С. Горлов 2014

результатов дальности метания копья ведущими атлетами Украины и зависимости этих результатов от начальных параметров вылета,

- проведен анализ на степень соответствия теоретических расчетов и кинематических измерений начальных параметров вылета копья в соответствии с результатами протокола соревнований для спортсменов высокого квалификационного уровня на основе методик с использованием камеры скоростной видеосъемки и программ векторной графики для последующего видеоанализа,

- экспериментально определены значения погрешностей измерений в рамках данной методики,

- выбраны наиболее информативные характеристики начальной фазы процесса метания, максимально влияющие на результат,

- разработана функциональная схема интерактивного тренажера, алгоритмы его функционирования в виде измерения физических параметров вылета копья, обработки полученной информации в соответствии с полученными закономерностями и оперативного представления конечных данных атлету для корректировки последующих спортивных движений во время тренировочного занятия.

Предметом исследований были выбраны параметры вылета копья и их взаимосвязь с конечным результатом попытки в соревнованиях, проведен поиск и анализ физических параметров, результаты измерения которых наиболее полно отражают взаимосвязь с конечным результатом при метании копья, а также поиск и анализ способов измерения и алгоритмов преобразования полученной информации в эргономически приемлемый для пользователя вид.

Для выполнения измерений кинематических параметров спортивных движений атлетов использовалась видеокамера с высокой скоростью видеосъемки, а в плоскости кадра обязательно присутствовал предмет с известными размерами в качестве репера. Благодаря сравнению проекций репера и спортивного снаряда появляется возможность определения расстояний, которые проходит снаряд в межкадровые промежутки времени. [3]

Для кинематического анализа используется программа векторной графики CorelDraw. Особенностью этой программы является возможность одновременного размещения на рабочем поле, но в разных слоях, изображений движений атлета и графических заметок – комментариев о расстояниях и углах в интересующих исследователя точках.

Основная идея метода заключается в том, что при наличии в кадре в плоскости съемки объекта с известными размерами становится возможным достаточно точное измерение расстояний между точками кинематической схемы движения атлета. При этом погрешность будет определяться исключительно угловыми искажениями при съемке и размещением репера в кадре. Чем точнее будет измерен репер, чем меньше будут угловые погрешности и чем ближе к измеряемому объекту размещен репер, тем будет выше достоверность измерений. Так, для копьеметателей в качестве репера можно ис-

пользовать их спортивный снаряд. Для женщин длина копья составляет 220см, для мужчин – 260см. Данные реперы находятся в плоскости рабочего кадра и присутствуют в кадре всегда (рис.1). Однако для большей достоверности целесообразно лично измерить данные реперы (копьё), чтобы исключить ненужные погрешности.[3]

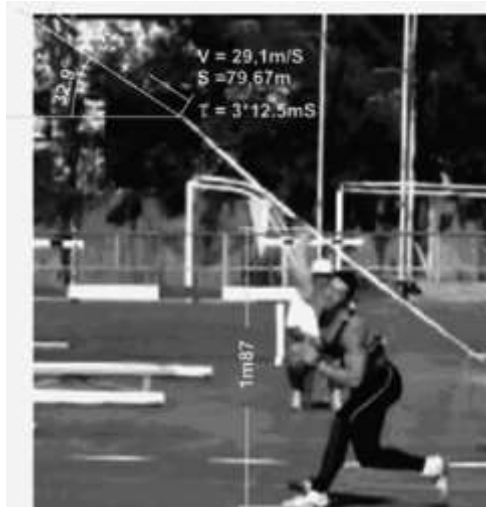


Рис.1. -Фрагмент финальной фазы броска А.Пятницы

В результате поиска и анализа физических параметров в финальной фазе разбега при метании копья атлетом, было определено, что наиболее полно отражают взаимосвязь с конечным результатом такие показатели, как высота выпуска копья, угол вылета копья и угол атаки относительно набегающего потока воздуха, скорость вылета копья [2].

Ниже приведены результаты кинематических исследований финальной фазы метания копья победителем Чемпионата Украины 2012г. А. Пятницы. Также прилагается расчетный график параметров полета копья, выполненный на базе программного комплекса КИДИМ по данным кинематических измерений [9].

По результатам проведенных измерений и расчетных данных следует, что в финальной фазе выполнения броска наибольшее влияние на результат попытки оказывает скорость вылета снаряда. Более того, стремление атлета поднять угол вылета копья при пропорциональном снижении скорости в конечном счете приводит к снижению результата (рис.2).



Рис.2.-Результаты данных измерения кинематических параметров вылета копья атлета в 1-й попытке.

На основе данных измерения параметров вылета копья атлета в 1-й попытке был построен график (рис. 3):

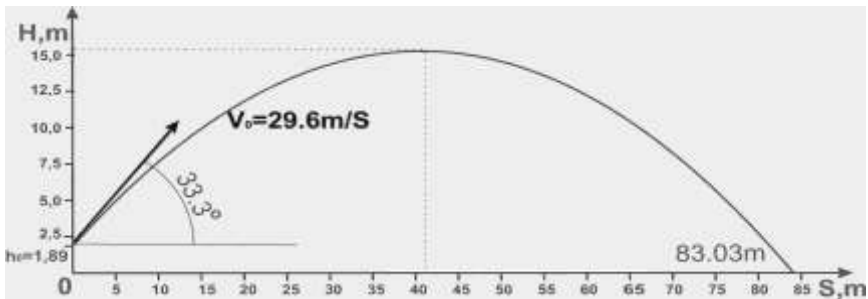


Рис.3. – График параметров полета копья.

Отдельного внимания заслуживают технические возможности исследования кинематических параметров спортсменов программы компьютерной графики. Ниже приведены примеры технических решений получения информации о пространственно-временных параметрах отдельных звеньев тела спортсмена в привязке к временным интервалам покадровой съемки (рис.4, 5, 6):

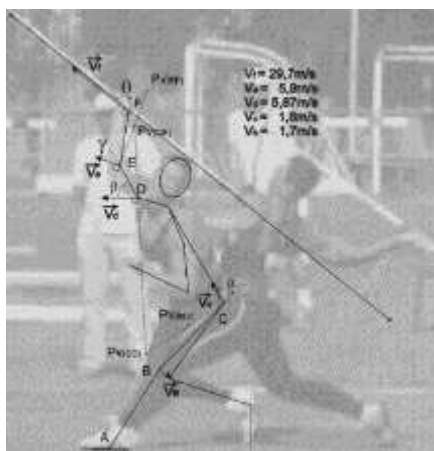


Рис.4 - Кинематическая модель распределения векторов скорости в отдельных звеньях тела копьеметателя в финальной фазе разгона.

Рисунки 5 и 6 позволяют сравнить параметры двух вариантов кинематических моделей траектории движения в отдельных звеньях тела разных копьеметателей в финальной фазе разгона.

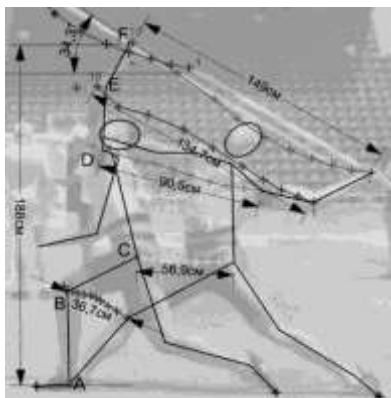


Рис.5 –Участник Чемпионата Украины по легкой атлетике

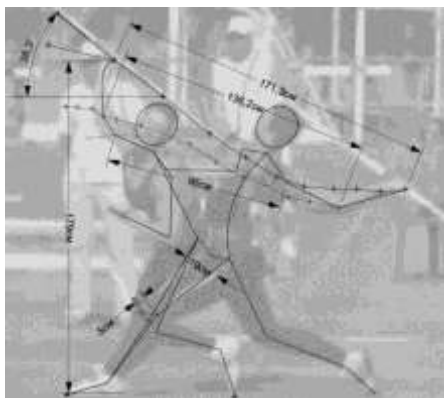


Рис.6 –Победитель Чемпионата Украины по легкой атлетике

Проведенные кинематические исследования открывают перспективу развития методики, позволяющей как атлету, так и его тренеру оперативно получать информацию не только о параметрах вылета спортивного снаряда, но и иметь возможность подробно проанализировать работу всех звеньев тела атлета в фазе выполнения метания, а также сравнить технику выполне-

ния броска у различных атлетов. Камеры ускоренной видеосъемки открывают новые возможности увидеть нюансы выполнения броска, что до этого момента, как правило, не использовалось.

Проведен поиск и анализ способов измерения и алгоритмов преобразования полученной информации в эргономически приемлемый для пользователя вид. Было выбрано два варианта наиболее реальных, с точки зрения технической реализации, способа измерения начальной скорости вылета снаряда – аналога копья: 1 - измерение частоты акустической реакции при скольжении снаряда по тросу с постоянным шагом навивки, 2 - измерение Доплеровского смещения частоты ультразвукового излучателя, закрепленного на кисти спортсмена при метании.

Принцип работы измерительной системы строится на измерении частоты акустической реакции при движении спортивного снаряда вдоль поверхности троса при имитации метания копья (см. рис.7). Поверхность троса имеет заводскую навивку с фиксированным шагом, которая выступает в роли источника акустических колебаний при скольжении опорных втулок трубки во время метания.



Рис.7 – Проведение экспериментов при работе с симулятором копья на тросе.

В связи с этим частота этих колебаний будет прямо пропорциональна скорости движения снаряда, а скорость будет вычисляться как

$$V = f \cdot n$$

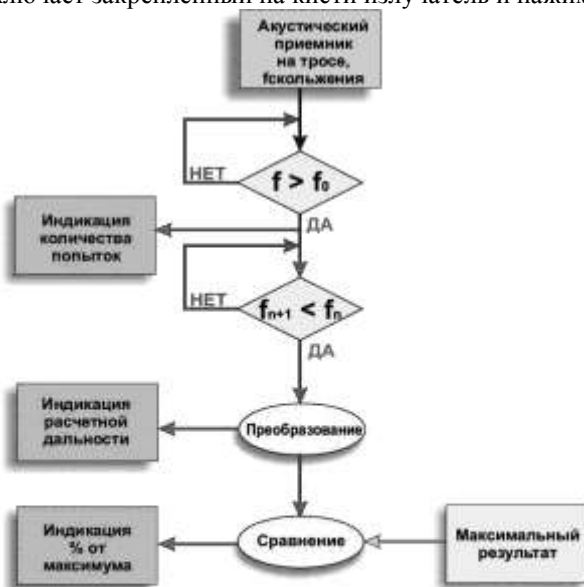
где n – заводской шаг навивки троса, который в данном случае равен 6,6мм, f – значение частоты в Гц, V – скорость снаряда в м/с. Начиная с некоторого уровня частоты начинается непрерывный процесс измерения вплоть до момента снижения частоты. Система фиксирует максимальное значение

частоты и производит дальнейшие вычисления согласно представленному алгоритму (см. рис.8).

Так, при измеренной максимальной частоте при отпускании симулятора копья на уровне 4470Гц по формуле получаем величину начальной скорости вылета копья $V_0 = 4470 \cdot 0,0066 = 29,5 \text{ м/с}$ что при сравнении с базой данных будет соответствовать результату около 84м.

Процесс измерения Доплеровского смещения частоты основан на приеме частоты от ультразвукового излучателя, закрепленного на кисти спортсмена, при метании (см. рис.9). Приемник размещается перед спортсменом или сзади него на удалении 2-4 метра от линии метаний на штативе таким образом, чтобы находиться в зоне облучения ультразвукового излучателя в период выполнения броска.

Заблаговременно перед началом измерений испытуемый задает через клавиатуру значение максимального результата для вычисления уровня интенсивности, включает закрепленный на кисти излучатель и нажимает

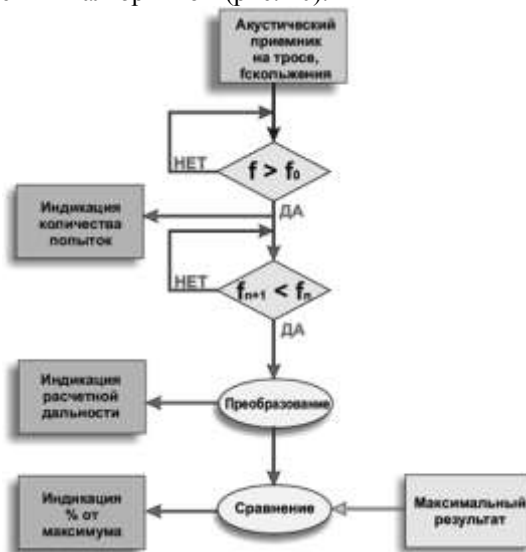


где f - текущее значение частоты акустической несущей, возникающей при скольжении снаряда по поверхности троса, f_0 - пороговое значение зоны нечувствительности, f_{n+1} - максимальное измеренное значение частоты, f_n - значение измеренной частоты, определяющее момент выпуска снаряда из руки атлета.

Рис.8. -Алгоритм функционирования системы измерения скорости вылета симулятора копья при его метании на тросе.



Рис.9. – Акустический приемник, расположенный на корпусе блока индикации измерительной системы кнопку калибровки. В течение 3х секунд производится измерение несущей частоты излучателя при нулевой скорости снаряда, после чего приступает к измерениям. Светящийся светодиод на передней панели приемника свидетельствует о наличии несущей частоты. Измерения начинаются при превышении пороговой скорости снаряда и далее выполняются вычисления в соответствии с приведенным алгоритмом (рис. 10).



где $f_0=40\text{кГц}$ – частота УЗ-излучателя на кисти метателя, f – текущее принимаемое значение частоты с учетом Доплеровского смещения при метании, $f_{\text{пор.}}$ – пороговое значение частоты, при превышении которого начинаются измерения.

Рис.10. – Алгоритм функционирования системы измерения скорости вылета снаряда, в основе которого лежит принцип измерения Доплеровского смещения частоты.



Рис.11. - Ультразвуковой излучатель, размещается на внешней стороне кисти метателя.

Оба выбранных принципа измерения начальной скорости в процессе исследования выявили как явные преимущества, так и недостатки.

Принцип измерения на тросе бесспорно прост и оригинален. Он относится к прямым методам измерения. Главное его преимущество – это отсутствие каких-либо устройств, требующих установки на спортсмене. Достаточно лишь закрепить на нерабочей стороне троса акустический приемник и расположить индикационный блок. Однако наличие трущихся при скольжении поверхностей с механическими приспособлениями, функция которых усиление акустической реакции («трещётка»), со временем в силу высокой степени износа существенно снижает эффективность данной реакции. А шумленность спортивной арены затрудняет выделение полезного сигнала, что приводит к низкой надежности такой системы и требует регулярного обслуживания. К тому же данная измерительная система является стационарной и не позволяет ее использование за пределами помещения, где она может быть установлена.

Принцип измерения Доплеровского смещения частоты является более универсальным. И, хотя главным недостатком является наличие УЗ-излучателя на рабочей кисти спортсмена, данный принцип имеет и существенные преимущества. Во-первых, такая система полностью автономна. Ее можно использовать как на симуляторе копья с тросом, так и с обычным копьем как в помещении при метании в сетку, так и на стадионе, что существенно облегчает калибровку. Во-вторых, система помехоустойчива. Несущая частота принимается в диапазоне 39-41кГц. А всем известно, что в данном акустическом диапазоне источники помех крайне редки, а на стадионах и в спортивных залах и вовсе отсутствуют. Да и наличие компактного излучателя на внешней поверхности кисти атлета весом 2-3% от общего веса ко-

пья в тренировочном периоде является не настолько существенным недостатком, чтобы отказаться от его применения.

В результате вышеизложенного было принято решение создать систему измерения скорости вылета снаряда на основе измерения Доплеровского смещения частоты излучателя, который будет устанавливаться на внешней стороне кисти спортсмена. Таким образом метатели получают возможность иметь информацию о скорости вылета снаряда как в процессе тренировок на тресе с использованием симулятора копья, так и в тренировках по метанию реального копья.

Научная новизна исследований. 1. Выполнен статистический анализ соответствия проведенных теоретических исследований результатов дальностей полёта копья в зависимости от параметров его вылета и практических исследований в виде скоростной видеосъемки и последующего видеоанализа с помощью программ векторной графики.

2. Впервые найдены физические явления, результаты измерения которых наиболее полно отражают взаимосвязь с данными параметрами вылета копья и протокольными результатами попыток в соревнованиях.

3. Найдены и разработаны способы измерения и преобразования полученной информации в эргономически приемлемый для пользователя вид.

Практическое значение исследований. Результаты экспериментальных исследований, в последующем внедренных в виде интерактивного тренажера, могут быть использованы для отработки координационных моделей и коррекции физических нагрузок. Это необходимо для планомерного подвода спортивной формы атлета и достижения максимального результата как спортсменов высокого уровня, так и при подготовке спортсменов-новичков с целью их адаптации к изменяющимся физическим нагрузкам в соответствии с тренерским заданием. Был проведен эксперимент, в результате которого получены видеозаписи попыток одного из сильнейших копьеметателей мира Александра Пятницы, ставшего в последующем серебряным призером Олимпиады в Лондоне. В результате расчётов с помощью математической модели компьютерной программы «КИДИМ» [9] были получены графические зависимости результатов для пяти попыток при изменениях высоты выпуска, угла вылета и начальной скорости выпуска копья, переменных значениях сил сопротивления воздуха и подъёмной силы среды испытываемого спортсмена А.Пятницы.

Теоретические и экспериментальные исследования выявили, что наиболее весомо на конечный результат попытки влияет в целом не высота выпуска и угол вылета копья, а начальная скорость его выпуска. Более того, именно скорость выпуска копья определяет физическую кондицию атлета [3].

Для определения скорости вылета копья, а также управления финальными действиями спортсменов создан оригинальный комплексный тренажёр, изображённый на Рис.7, 9 и 10.

Представленный тренажёр предполагает выполнение тренировочных метаний симулятора копья на тросе, изменяемое положение которого определяет угол и высоту его выпуска.

Выводы: Описанные в работе исследования подтвердили возможность комплексного научно-технического решения проблемы характеристики биомеханических параметров движений атлетов непосредственно в процессе выполнения ими спортивных упражнений с помощью технических средств, позволяющих определять и закреплять эффективные и рациональные двигательные навыки с требуемой интенсивностью и с наименьшими физическими затратами. Проведенные эксперименты и исследования параметров вылета копья подтвердили высокую степень корреляции между измеренными кинематическими параметрами движений атлета в финальной фазе метания (скорость вылета копья) и результатом попытки. Были выявлены физические принципы, которые наиболее полно отражают такую взаимосвязь с конечным результатом при метании копья. Найден способ измерения и преобразования полученных данных в эргономически приемлемый для пользователя вид.

Создание и дальнейшее использование таких тренажеров в индустрии спорта поможет значительно улучшить технику движений спортсменов в финальных фазах метания копья, а следовательно и повысить спортивный результат.

Проведенные кинематические исследования открывают перспективу развития методики, позволяющей как атлету, так и его тренеру оперативно получать информацию не только о параметрах вылета спортивного снаряда, но и иметь возможность подробно проанализировать работу всех звеньев тела атлета в фазе выполнения метания, а также сравнить технику выполнения броска у различных атлетов. Камеры ускоренной видеосъемки открывают новые возможности увидеть нюансы выполнения броска, чего до этого момента как правило не использовалось.

Список литературы: 1. Аванесов В.У. Применение специального кистевого отягощения в процессе выполнения бросковой работы легкоатлетами-метателями / Аванесов В.У., Ефремова В.И. // Моделирование спортивной деятельности в искусственно созданной среде (стенды, тренажеры, имитаторы) : (материалы конф.) . - М.: 1999. - С. 4-5. 2. Адашевский В.М. Теоретические основы механики биосистем: Учебное пособие/ В. М. Адашевский. - Харьков НТУ "ХПИ", 2001. - с.258. 3. Галица В.И., Горлов А.С., Скрипниченко И.Н., Качанов П.А., Любиев А.И. Интерактивная система экспресс-диагностики в подготовке спортсменов - копьеметателей. – ДонНУ, 2012. 4. Захаровська Тетяна, Горбенко Василь. Факторна структура кінематичних показників техніки металників спису на етапі початкової підготовки // Педагогіка, психологія та медико-біологічні проблеми фізичного виховання і спорту. - Харків, 2008. - №4, - С. 5. Козлова Н.И. Формирование двигательной структуры финального усилия в метании копья на этапе начальной спортивной подготовки: дис. ... канд. пед. наук: 13.00.04. / Н.И.Козлова. - Минск, 1994. - 172 с. 6. Кофтун А.И. Тренажерная подготовка в тренировке копьеметателей / Кофтун А.И., Бойко Ю.И. // Научно-технический прогресс и физическая культура на Дальнем Востоке : Сборник научных трудов. - Хабаровск, 1988. - С. 54-55.7. Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С. Динамика полета беспилотных летательных аппаратов. – ГНТИ Оборонгиз, Москва, 1962. -34 с. 8. Попов Г.И., Ермолаев Б.В., Аракелов А.Л. Координационные перестройки в технике метания копья: модельные и

экспериментальные оценки. - Теория и методика физической культуры, 1993. - №1. - С.7-10. **9.** Свидетельство о регистрации авторского права на произведение. № 16273. Украина. Программный комплекс для расчетов кинематики, кинестатики и динамики дискретных моделей машин и механизмов (КДИМ) : компьютерная программа / Ю. М. Андреев. - Дата регистрации 12.04.2006.**10.** Совершенствование техники движения в метаниях с использованием технических средств и локальных отгощений / Попов Г.И., Ханин И.В., Логинов А.А., Иванов А.Н. // Моделирование спортивной деятельности в искусственно созданной среде (стенды, тренажеры, имитаторы) : (материалы конф.). - М.: 1999. - С. 85-87.**11.** Campos J., Brizuela G., Ramon V. Three-dimensional kinematic analysis of elite javelin throwers at the 1999 IAAF World Championships in Athletics <http://www.iaaf-rdc.ru/ru/docs/publication/64.html>.

Bibliography (transliterated): **1.** Avanesov V.U. Primenenie special'nogo kistevogo otjagoshhenija v processe vypolnenija broskovoj raboty legkoatletami-metateljami / Avanesov V.U., Efreмова V.I. // Modelirovanie sportivnoj dejatel'nosti v iskusstvenno sozdannoj srede (stendy, trenazhery, imitatory) : (materialy konf.). - M.: 1999. - S. 4-5. **2.** Adashevskij V.M. Teoreticheskie osnovy mehaniki biosistem: Uchebnoe posobie/ V. M. Adashevskij. - Har'kov NTU "HPI", 2001. - s.258 **3.** Galica V.I., Gorlov A.S., Skripnichenko I.N., Kachanov P.A., Ljubiev A.I. Interaktivnaja sistema jekspress-dijagnostiki v podgotovke sportsmenov - kop'emetatelej. - DonNU, 2012. **4.** Zaharov'ska Tetjana, Gorbенko Vasil'. Faktorna struktura kinematičnih pokaznikov tehniki metal'nikov spisu na etapi pochatkovoij pidgotovki // Pedagogika, psihologija ta mediko-biologični problemifizičnogovihovannja i sportu. - Harkiv, 2008. - №4, - S. **5.** Kozlova N.I. Formirovanie dvigatel'noj struktury final'nogo usilija v metanii kop'ja na jetape nachal'noj sportivnoj podgotovki: dis. ... kand. ped. nauk: 13.00.04. / N.I.Kozlova. - Minsk, 1994. - 172 s. **6.** Koftun A.I. Trenazhernaja podgotovka v trenirovke kop'emetatelej / Koftun A.I., Bojko Ju.I. // Nauchno-tehniceskij progress i fiziceskaja kul'tura na Dal'nem Vostoke : Sbornik nauchnyh trudov. - Habarovsk, 1988. - S. 54-55.7. Lebedev A.A., Chernobrovkin L.S. Dinamika poleta bespilotnyh letatel'nyh apparatov. - GNTI Oborongiz, Moskva, 1962. -34 s. **8.** Popov G.I., Ermolaev B.V., Arakelov A.L. Koordinacionnye perestrojki v tehnike metanija kop'ja: model'nye i jekspierimental'nye ocenki. - Teorija i metodika fiziceskoj kul'tury, 1993. - №1. - S.7-10. **9.** Svidetel'stvo o registracii avtorskogo prava na proizvedenie. № 16273. Ukraina. Programmnij kompleks dlja rasčetov kinematiki, kinetostatiki i dinamiki diskretnykh modelej mashin i mehanizmov (KIDIM) : komp'juternaja programma / Ju. M. Andreev. - Data registracii 12.04.2006.**10.** Sovershenstvovanie tehniki dvizhenija v metanijah s ispol'zovaniem tehničeskix sredstv i lokal'nyh otjagoshhenij / Popov G.I., Hanin I.V., Loginov A.A., Ivanov A.N. // Modelirovanie sportivnoj dejatel'nosti v iskusstvenno sozdannoj srede (stendy, trenazhery, imitatory) : (materialy konf.). - M.: 1999. - S. 85-87.**11.** Campos J., Brizuela G., Ramon V. Three-dimensional kinematic analysis of elite javelin throwers at the 1999 IAAF World Championships in Athletics <http://www.iaaf-rdc.ru/ru/docs/publication/64.html>.

Поступила (received) 11.03.2014

П. А. КАЧАНОВ, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»,
В. М. АДАШЕВСКИЙ, канд. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»,
В. И. ГАЛИЦА, инж. НИЧ НТУ «ХПИ»,
А. С. ГОРЛОВ, канд. пед. наук, доц. НТУ «ХПИ»,

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В МЕТАНИИ КОПЬЯ

В статье проведен анализ биомеханических характеристик спортсмена – копьеметателя, которые в наибольшей степени влияют на результат, а также параметры действий, используемые в физико-математическом моделировании биомеханических систем в метании копья.

Ключевые слова: Биомеханика, диагностическая система, интерактивный тренажер, динамическая модель, кинематическая модель, симулятор.

Актуальность темы: Главной проблемой современных исследований в спорте являются биомеханические действия, которые способен реализовать спортсмен для повышения результативности [1]. Эта проблема может быть реализована только с помощью комплексных экспериментально-теоретических исследований, позволяющих определить, а затем выполнить действия с эффективными и рациональными биомеханическими параметрами за наименьшее время и с наименьшими физическими и материальными затратами.

Такое комплексное решение позволит кардинально улучшить существующие методы подготовки спортсменов, откорректировать двигательные действия в различных фазах и существенно повысить результативность [2].

Спортивный результат в метании копья - дальность полета - определяется в основном биомеханическими характеристиками, которые способен реализовать спортсмен, а именно: абсолютной начальной скоростью вылета, углом вылета, углом атаки, высотой выпуска копья [6,7].

Абсолютная скорость копья в момент вылета является основной биомеханической характеристикой при метании и оказывает наибольшее влияние на конечный результат попытки. Эта скорость должна быть сообщена рабочему звену тела (кисти), которая находится в контакте с копьем. Она является результирующей скоростью переносного движения тела при разбеге и относительного движения кисти.

Высота выпуска копья приближённо увеличивает или уменьшает дальность полёта снаряда соответственно на величину ее увеличения или уменьшения.

Угол вылета выбирается как наиболее рациональный в пределах 35- 39 градусов к горизонту с учётом угла атаки и силы сопротивления воздуха. Теоретически максимальный результат возможен, когда угол вылета равен

45°. Однако в силу антропометрических особенностей метателей обеспечить такой угол при других максимально эффективных параметрах вылета снаряда невозможно. Поэтому каждый атлет подчас интуитивно подбирает параметры своего финального движения вплоть до момента выпуска снаряда.

Теоретические исследования. Расчётная схема для определения параметров вылета копья (рис.1).

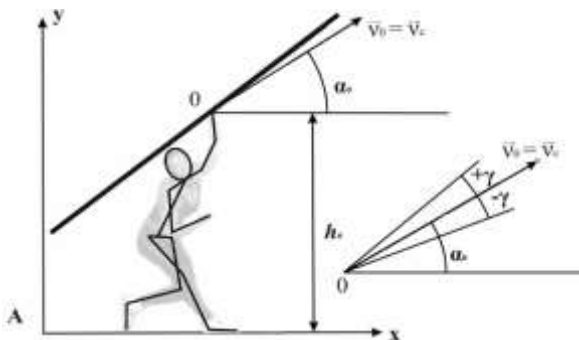


Рис. 1. – Расчетная схема для определения параметров вылета копья.

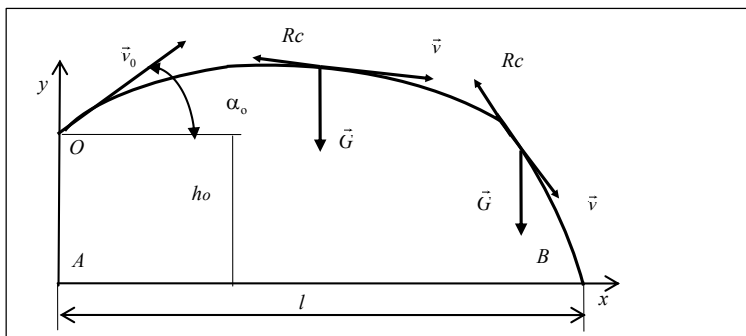


Рис.2. – Расчетная схема для определения дальности полёта от параметров вылета копья.

Здесь $V_0 = V_c$ – абсолютная начальная скорость вылета копья (Рис.2)

V_0 - начальная скорость вылета центра масс,

V_{0x} - проекция скорости вылета центра масс на ось Ox ,

V_{0y} - проекция скорости вылета центра масс на ось Oy ,

В проекциях на оси декартовой абсолютной системы координат:

$$v_{Ox} = v_0 \cos \alpha; \quad v_{Oy} = v_0 \sin \alpha \tag{1}$$

Выражение абсолютной начальной скорости вылета

$$v_0 = \sqrt{v_{0x}^2 + v_{0y}^2} \quad (2)$$

h_{c0} - высота центра масс копья в начальное время вылета,

$\alpha_0 = \alpha$ - угол вылета центра масс копья во время броска,

G - сила тяжести,

h_c - текущая высота центра масс копья,

R_c - сила сопротивления воздушной среды,

M_c - момент сил сопротивления воздушной среды,

где $M_c = (F_c)a$,

Для решения поставленной задачи сила аэродинамического сопротивления R_c для тел, движущихся в воздушной среде плотностью ρ , равна

$$R_c = 0.5 \cdot c_r \cdot \rho S V^2 \quad (3); \quad R_c = kV^2 \quad (4).$$

F_c – равнодействующая распределённых сил сопротивления воздушной среды $F_c = fV_{ep}^2 = f\omega^2(a/2)^2$ или

$$M_c = n\omega^2 = n\dot{\zeta} \quad (5)$$

При подсчёте этих сил безразмерные коэффициенты лобового сопротивления C_r определяют экспериментально в зависимости от формы тела и его ориентации в среде, которые можно получить из справочного материала динамики полёта тел [7].

Величина S (мидель) определяется значением проекции площади поперечного сечения тела на плоскость, перпендикулярную оси движения, V - абсолютная скорость тела. Известно, что плотность воздуха - $\rho \approx 1.3 \text{ кг/м}^3$. Копье будем рассматривать, как тело, которое в полете совершает плоскопараллельное движение. Угол поворота тела в сагиттальной плоскости соответственно изменяет величину S .

Так как копье в фазе полёта движется в одной из плоскостей - сагиттальной плоскости, составим уравнения динамики плоскопараллельного движения в проекциях на оси координат.

$$m \ddot{x} = P_x^e - R_c \cos \alpha; \quad m \ddot{y} = P_y^e - R_c \sin \alpha; \quad J_z \ddot{\zeta} = M_c \quad (6)$$

Здесь m – масса тела, \ddot{x}, \ddot{y} - соответствуют проекциям ускорения центра масс, P_x^e, P_y^e – проекции равнодействующей внешних сил, действующих на тело, J_z – момент инерции относительно центральной фронтальной оси,

$\ddot{\zeta}$ – соответствует угловому ускорению при повороте тела вокруг фронтальной оси,

M_z^e - суммарный момент внешних сил сопротивления среды относительно фронтальной оси.

При движении в плоскостях Ay , систему уравнений можно записать так:

$$m \ddot{x} = -c_{cy} J_z \ddot{\alpha} \quad (8)$$

$$m \ddot{y} = -v^2 \sin \alpha; J_z \ddot{\alpha} = \dots \quad (9)$$

$$\cos \alpha = \frac{\dot{x}}{v}, \quad \sin \alpha = \frac{\dot{y}}{v}, \quad v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad (10)$$

α – угол между текущими проекциями скорости центра масс копья и вектором его скорости.

Решение этой задачи потребует в дальнейшем интегрирования дифференциальных уравнений полёта с учётом переменных во времени коэффициентов аэродинамического сопротивления полёта снаряда.

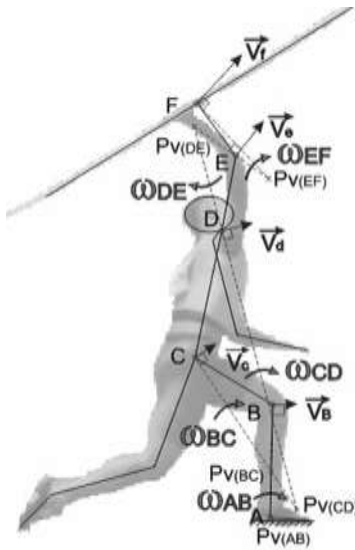


Рис.3–Кинематическая модель звеньев тела копьеметателя с мгновенными центрами скоростей.

Общепринято, что основой эффективной попытки копьеметателя является фаза выполнения броска при рациональном положении его тела.

Рассмотрим кинематическую модель звеньев тела копьеметателя финальной фазы разбега в момент выпуска копья(Рис.3). Скорость вылета копья определяется как сумма векторов скоростей звеньев тела атлета, участвующих

щих в процессе метания, а именно коленного, тазо-бедренного, плечевого, локтевого суставов и кисти в точке контакта с копьем.

Значение вектора скорости в коленном суставе относительно неподвижной точки опоры - пятки определяется в виде:

$$V_b = V_a + V_{ab} = V_a + \omega_{ab} \cdot AB \quad (11)$$

при $V_a = 0$ - точка опоры неподвижна

$$\omega_{ab} = \frac{V_b}{AB} \quad (12)$$

где V_b - вектор скорости коленного сустава опорной ноги атлета, ω_{ab} - угловая скорость вращения голени опорной ноги атлета относительно точки опоры, AB - расстояние от коленного сустава до точки опоры.

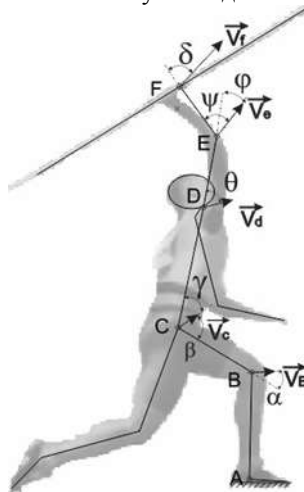


Рис.4— Кинематическая модель звеньев тела копьеметателя с проекциями скоростей.

Для последующих определений параметров движения звеньев и характерных точек тела атлета, участвующих в процессе метания, удобно использовать понятие мгновенного центра скоростей для каждого звена тела, а именно той точки, где в данный момент времени скорость равна нулю.

Так, угловая скорость вращения бедра относительно мгновенного центра скоростей точек:

$$\omega_{bc} = \frac{V_b}{P_{V(bc)}B} \quad (14)$$

где $P_{V(BC)}$ мгновенный центр скоростей звена СВ.

$$V_c = \omega_{bc} \cdot P_{V(bc)} C \quad (15)$$

где $P_{V(bc)} C$ - расстояние от точки С до мгновенного центра скоростей точек.

Аналогично определяются угловые скорости плеча и предплечья и скорости плечевого (точка D) и локтевого (точка E) суставов, а также скорость кисти (точка F):

$$\omega_{cd} = \frac{V_c}{P_{V(cd)} C}, \quad (16)$$

$$V_d = \omega_{cd} \cdot P_{V(cd)} D, \quad (17)$$

$$\omega_{de} = \frac{V_d}{P_{V(de)} D}, \quad (18)$$

$$V_e = \omega_{de} \cdot P_{V(de)} E, \quad (19)$$

$$\omega_{ef} = \frac{V_e}{P_{V(ef)} E} \quad (20)$$

$$V_f = \omega_{ef} \cdot P_{V(ef)} F. \quad (21)$$

В результате натурального эксперимента получены направления векторов скоростей всех характерных точек, а для некоторых точек их значения. Поэтому становится возможным определить положения мгновенных центров скоростей для каждой звена, а, следовательно, угловые скорости звеньев и значения скоростей всех характерных точек.

Существует и другой метод вычисления скоростей характерных точек звеньев тела копьеметателя, удобный для анализа и определения рационального взаимного расположения звеньев его тела с использованием теоремы о проекциях скоростей двух точек звена на прямую их соединяющую (Рис.4):

$$V_b \cdot \cos \alpha = V_c \cdot \cos \beta, \quad (22)$$

$$V_c = \frac{V_b \cdot \cos \alpha}{\cos \beta} \quad (23)$$

где α – угол между вектором скорости в т. В и звеном ВС, β - угол между вектором скорости в т. С и звеном ВС.

И так для каждого звена:

$$V_c \cdot \cos \gamma = V_d \cdot \cos \theta, \quad (24)$$

$$V_d = \frac{V_c \cdot \cos \gamma}{\cos \theta}, \quad (25)$$

$$V_b \cdot \cos \theta = V_e \cdot \cos \varphi, \quad (26)$$

$$V_e = \frac{V_d \cdot \cos \theta}{\cos \varphi}, \quad (27)$$

$$V_e \cdot \cos \psi = V_f \cdot \cos \delta, \quad (28)$$

$$V_f = \frac{V_e \cdot \cos \psi}{\cos \delta}, \quad (29)$$

где δ , γ , θ , φ и ψ соответствующие углы между звеньями CD, DE, EF и векторами скоростей крайних точек этих звеньев C, D, E, F.

Результирующая скорость кисти метателя вычисляется через скорость коленного сустава в виде:

$$V_f = V_b \frac{\cos \alpha \cdot \cos \gamma \cdot \cos \psi}{\cos \beta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \delta} \quad (30)$$

Выводы. Таким образом, используя аналитические выражения для определения дальности полета копья в зависимости от взаимосвязанных кинематических параметров звеньев тела метателя, скорости выпуска копья, угла и высоты выпуска, с помощью полученных математических моделей становится возможным определить, откорректировать биомеханические параметры, а соответственно улучшить спортивный результат с учетом конкретных физических данных и возможностей спортсменов.

Список литературы: 1. Аванесов В.У. Применение специального кистевого отягощения в процессе выполнения бросковой работы легкоатлетами-метателями / Аванесов В.У., Ефремова В.И. // Моделирование спортивной деятельности в искусственно созданной среде (стенды, тренажеры, имитаторы) : (материалы конф.). - М.: 1999. - С. 4-5. 2. Адашевский В.М. Теоретические основы механики биосистем: Учебное пособие/ В. М. Адашевский. - Харьков НТУ "ХПИ", 2001. - 258 с. 3. Александров А.В. Биомеханическая модель тела человека для описания многосуставных движений в трехмерном пространстве / А.В. Александров, А.А. Фролов // Биомеханика-2006 : 8 Всерос. конф. по биомеханике, Н. Новгород, 22-26 мая 2006 г. : тез. докл. / Рос. акад. наук [и др.]. - Н. Новгород, 2006. - С. 73. 4. Бернштейн Н.А. О построении движений. М.: Медгиз, 1947. - 254 с. 5. Захаровська Тетяна, Горбенко Василь. Факторна структура кінематичних показників техніки металевих списів на етапі початкової підготовки // Педагогіка, психологія та медико-біологічні проблеми фізичного виховання і спорту. - Харків, 2008. - №4, - С. 6. Козлова Н.И. Формирование двигательной структуры финального усилия в метании копья на этапе начальной спортивной подготовки: дис. ... канд. пед. наук: 13.00.04. / Н.И. Козлова. - Минск, 1994. - 172 с. 7. Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С. Динамика полета беспилотных летательных аппаратов. - ГНТИ Оборонгиз, Москва, 1962. - 34 с. 8. Попов Г.И., Ермолаев Б.В., Аракелов А.Л. Координационные перестройки в технике метания копья: модельные и экспериментальные оценки. - Теория и методика физической культуры, 1993. - №1. - С.7-10. 9. Совершенствование техники движения в метаниях с использованием технических средств и локальных отягощений / Попов Г.И., Ханин И.В., Логинов А.А., Иванов А.Н. // Моделирование спортивной деятельности в искус-

ственно созданной среде (стенды, тренажеры, имитаторы) : (материалы конф.). - М.: 1999. - С. 85-87. **10.** Campos J., Brizuela G., Ramon V. Three-dimensional kinematic analysis of elite javelin throwers at the 1999 IAAF World Championships in Athletics <http://www.iaaf-rdc.ru/ru/docs/publication/64.html>. **11.** PrusikKa. [Methods of kinezometria in solving the problem of physical culture] Metodakinezometrii w rozwiązywaniuwybranychproblemówkulturyfizycznej. / Prusik. Ka.,Görner K. - In: *Súčasnosť a perspektivy*télovýchovnéhoprocesunaškolách. BanskáBystrica: PF UMB KTV, 2006 - S. 246 - 252.

Bibliography (transliterated): **1.** Avanesov V.U. Primenenie special'nogo kistevogo otjagoshhenija v processe vypolnenija broskovoj raboty legkoatletami-metateljami / Avanesov V.U., Efreмова V.I. // Modelirovanie sportivnoj dejatel'nosti v iskusstvenno sozdannoj srede (stendy, trenazhery, imitatory) : (materialy konf.). - M.: 1999. - S. 4-5. **2.** Adashevskij V.M. Teoreticheskie osnovy mehaniki biosistem: Uchebnoe posobie/ V. M. Adashevskij. - Har'kov NTU "HPI", 2001. - 258 s. **3.** Aleksandrov A.V. Biomechanicheskaja model' tela cheloveka dlja opisanija mnogostavnyh dvizhenij v trehmernom prostanstve / A.V. Aleksandrov, A.A. Frolov // *Biomehanika-2006* : 8 Vseros. konf. po biomehanike, N. Novgorod, 22-26 maja 2006 g. : tez.dokl. / Ros.akad. nauk [i dr.]. - N. Novgorod, 2006. - S. 73. **4.** Bernshtejn N.A. O postroenii dvizhenij. M.: Medgiz, 1947. - 254 s. **5.** Zaharovs'kaTetjana, Gorbenko Vasil'. Faktorna struktura kinematichnikpokaznikovtehniki metal'nikivspisu na etapipochatkovoipidgotovki // *Pedagogika, psihologija ta mediko-biologichni*problemifizichnogovihovannja i sportu. - Harkiv, 2008. - №4, - S. **6.** Kozlova N.I. Formirovanie dvigatel'noj struktury final'nogo usilija v metanii kop'ja na jetape nachal'noj sportivnoj podgotovki: dis. ... kand. ped. nauk: 13.00.04. / N.I.Kozlova. - Minsk, 1994. - 172 s. **7.** Lebedev A.A., Chernobrovkin L.S. Dinamika poleta bespilotnyh letatel'nyh apparatov. - GNTI Oborongiz, Moskva, 1962. -34 s. **8.** Popov G.I., Ermolaev B.V., Arakelov A.L. Koordinacionnye perestrojki v tehnike metanija kop'ja: model'nye i jeksperimental'nye ocenki. - Teorija i metodika fizicheskoj kultury, 1993. - №1. - S.7-10. **9.** Sovershenst-vovanie tehniki dvizhenija v metanijah s ispol'zovaniem tehniceskikh sredstv i lokal'nyh otjagoshhenij / Popov G.I., Hanin I.V., Loginov A.A., Ivanov A.N. // Modelirovanie sportivnoj dejatel'nosti v iskusstvenno sozdannoj srede (stendy, trenazhery, imitatory) : (materialy konf.). - M.: 1999. - S. 85-87. **10.** Campos J., Brizuela G., Ramon V. Three-dimensional kinematic analysis of elite javelin throwers at the 1999 IAAF World Championships in Athletics <http://www.iaaf-rdc.ru/ru/docs/publication/64.html>. **11.** PrusikKa. [Methods of kinezometria in solving the problem of physical culture] Metodakinezometrii w rozwiązywaniuwybranychproblemówkulturyfizycznej. / Prusik. Ka.,Görner K. - In: *Súčasnosť a perspektivy*télovýchovnéhoprocesunaškolách. BanskáBystrica: PF UMB KTV, 2006 - S. 246 - 252.

Поступила (received) 11.03.2014

В.А. КРЫЛОВА, ст. преподаватель каф. АУТС, НТУ «ХПИ»

РЕАЛИЗАЦИЯ АДАПТИВНОГО УСТРОЙСТВА КОДИРОВАНИЯ/ДЕКОДИРОВАНИЯ НА ПЛИС

Предлагается разработка устройства для адаптивного помехоустойчивого кодирования/декодирования для систем передачи информации с оценкой качества информационного состояния канала связи.

Ключевые слова: адаптивная система, канал передачи данных, ПЛИС-технологии, канал связи, статистика ошибок.

Введение. Современные системы управления сложными объектами имеют распределенную модульную архитектуру, в которой функции управления выполняются автономными блоками, связь между которыми осуществляется с помощью каналов обмена данными, реализующих стандартные протоколы. Разрабатываемая система кодирования/декодирования должна быть динамической, т.к. в процессе моделирования меняются параметры системы, а также должна быть обеспечена возможность отслеживания производительности системы в условиях реальной работы. Аппаратная реализация системы должна быть осуществлена с использованием технологии ПЛИС SoC (System on Chip) – система на кристалле, основным преимуществом которой является универсальность, а также высокая производительность обмена данными, но при этом возможность изменения параметров системы. Основные изменения выполняются в программе микроконтроллера.

Цель статьи – разработка устройства адаптивного кодирования/декодирования с переменными параметрами для систем связи, тем самым увеличивая выигрыш за счет кодирования и скорость передачи.

Материалы исследований. Общая схема адаптивного кодирования для систем передачи информации представлена на рисунке 1, где возможно раздельное применение информационной и обратной связи в контурах оперативного и адаптивного управления. Объект управления представлен в виде совокупности блоков: входного накопителя (Вх. НК), кодера (К), модулятора (М), переключателей каналов (ПК) и группы каналов связи (КС), а также демодулятора (ДМ), декодера (ДК), выходного накопителя (Вых. НК). Блок идентификации состояний обеспечивает оценивание параметров или структуры системы по совокупности сигналов X_1, X_2, X_3 . Для определенного состояния блоком оперативного управления выбирается стратегия, в соответствии с которой перестраивается режим работы, структура и параметры - кодера, модулятора, переключателя каналов, а также декодера и

демодулятора, как в канале передачи информации, так и в канале обратной связи с помощью соответствующих управляющих сигналов U_1, \dots, U_3 . На контур оперативного управления возлагается задача регулирования параметров системы в рамках текущего состояния. Такая структура системы передачи информации согласуется с концепцией относительно медленного изменения состояния канала. В пределах одного квазистационарного состояния осуществляется оперативное управление. Если же состояние канала изменяется, то контур адаптивного управления производит изменение соответствующих параметров системы. Канал обратной связи используется для передачи сигналов как оперативного, так и адаптивного управления.

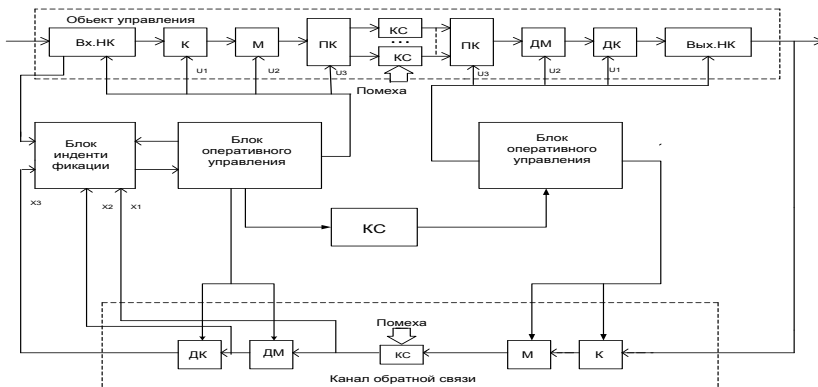
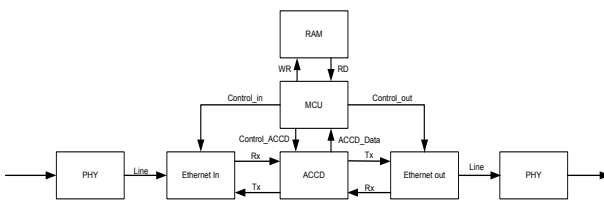


Рис. 1 – Схема адаптивного кодирования

Для реализации адаптивного кодера/декодера, который представляет собой программно-аппаратно зависимое устройство, можно создать эффективное по быстродействию устройство на ПЛИС технологии (программируемые вентильные матрицы). Однако недостатками данной системы являются: трудоемкость создания, недостаточная гибкость устройства, сложность реализации сетевых адаптивных методов кодирования при только аппаратной реализации устройства, т.к. сложно задавать и менять параметры необходимые для расчета. Разрабатываемая система кодирования/декодирования должна быть динамической, т.к. в процессе моделирования меняются параметры системы, а также должна быть обеспечена возможность отслеживания производительности системы в условиях реальной работы.

Таким образом, проектирование устройства кодирования/декодирования на вентильных матрицах не целесообразно, т.к. достаточно сложно реализовать сетевой протокол для систем передачи данных с переменными параметрами. Возникает необходимость реализации сетевого устройства адаптивного кодирования/декодирования с возможностью программного и аппаратного изменения в процессе эксплуатации устройства для достижения высокой эффективности. Программно-аппаратная реализация устройства должна быть

осуществлена с использованием технологии ПЛИС SoC (System on Chip) – система на кристалле, основным преимуществом которой является универсальность, а также высокая производительность обмена данными, но при этом возможность изменения параметров системы в процессе эксплуатации с помощью программ, написанных на языке высокого уровня. Универсальность такого решения заключается в возможности использования системы на кристалле в различных устройствах с минимальными изменениями схемотехники SoC. Основные изменения выполняются в программе микроконтроллера. Также существует решение с установкой программного обеспечения в виде операционной системы на FPGA с технологией SoC, а это позволяет использовать программное обеспечение, которое разрабатывается на языках высокого уровня. ПЛИС-технология предоставляет гибкость для создания систем на кристалле (SoC – system on chip), состоящих из различных IP-ядер (Intellectual Property Core). IP-блок – готовые блоки для проектирования микросхем (например, построения систем-на-кристалле). Внедрение IP-ядер, таких как блок памяти, блоки цифровой обработки, встроенные процессорные ядра с периферией, скоростные каналы ввода/вывода позволяет создавать внутри кристалла инфраструктуру IP-ядер, что является мощным инструментом для создания SoC. В качестве средства проектирования такой системы может быть использована САПР Quartus II фирмы Altera, она обеспечивает существенные преимущества в производительности и включает целенаправленную поддержку ПЛИС с технологией систем на кристалле SoC FPGA. Также Quartus II включает расширенную интеграцию системы Qsys и средства поддержки разработки блоков цифровой обработки сигналов (ЦОС) DSP Builder, и также широкий набор завершенных IP-ядер. Проектирование адаптивного устройства осуществлялось при помощи специализированного программного обеспечения Altera Quartus II 9.2. FPGA Cyclone (рисунок 2).



Рису 2 – Устройство адаптивного кодирования

Работа устройства осуществляется следующим образом. При включении данного устройства в сеть процессор MCU собирает данные о состоянии канала связи для оценки информационного состояния канала, а также оценки статистических характеристик потоков ошибок на выходе канала связи. Далее на основании этой оценки выбираются параметры гнездовых свёрточных кодов оптимальных к статистике ошибок, а именно принимается решение о значении длины кодового ограничения, строятся порождающие полиномы

для свёрточного кодера и задается значение глубины решетки декодирования для декодера. По шине ACCD_Data передаются данные о сети, которые обрабатываются MCU и записываются в RAM через шину WR. После построения порождающих полиномов и задания значения длины кодового ограничения для кодера, а также задания значения глубины решетки декодирования, блок ACCD начинает свою работу. Сигналы Control_in, Control_out служат для того чтобы блокировать пакеты данных, которые не входят в последовательность символов для оценки статистических характеристик канала связи. Входящие пакеты поступают на блок ACCD по шине Rx, подвергаются кодированию или декодированию в соответствии с установленными параметрами свёрточного кодера и пересылаются блоком Ethernet out. Значения параметров кодера хранятся в RAM, и по шине RD осуществляется считывание данных из RAM.

Выводы. Реализовано адаптивное устройство кодирования/декодирования с переменными параметрами на FPGA фирмы Altera, с использованием встроенных IPcore блоков для построения систем на кристалле. В качестве средства разработки использована среда автоматизированного проектирования Quartus II..

Список литературы: 1. Живица Н.И. Теоретические основы передачи данных/ Н.И.Живица, А.Г. Пушко., В.А. Лукин – К.: КВВИДКУС, 1991. – 479 с.. 2. Кларк Дж. Мл, Кейн Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи. Пер. С англ. – М.: Радио и связь, 1987.г. 392 с.

3. Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7: Самоучитель / Дьяконов В.П. –М.: ДМК-Пресс, 2008. -784 с.

4. Черных И.В. Simulink: Среда создания инженерных приложений /Черных И.В. Под общ. ред. к.т.н. Потёмкина –М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003 г., 496 с

Spisok literatury: 1. Zhivica N.I. Teoreticheskie osnovy peredachi dannyh/ N.I.Zhivica, A.G. Pushko., V.A. Lukin – K.: KVVIDKUS, 1991. – 479 s.. 2. Klark Dzh. Ml, Kejn Dzh. Kodirovanie s ispravleniem oshibok v sistemah cifrovoj svyazi. Per. S angl. – M.: Radio i svjaz', 1987.g. 392 s. 3. D'jakonov V.P. Simulink 5/6/7: Samouchitel' / D'jakonov V.P. –M.: DMK-Press, 2008. -784 s.

4. Chernyh I.V. Simulink: Sreda sozdanija inzhenernyh prilozhenij /Chernyh I.V. Pod obshh. red. k.t.n. Potjomkina –M.: DIALOG-MIFI, 2003 g., 496 s

Поступила (received)05.03.2014

А.М. КУДИН, д-р техн. наук, старш. научн. сотр., ИСМА НАН Украины, Харьков;

Ю.А. БОРОДЕНКО, канд. техн. наук, старш. науч. сотр., ИСМА НАН Украины, Харьков;

В.В. БЕЛОГУБ, ведущий инж., ИСМА НАН Украины, Харьков;

А.В. ДИДЕНКО, инж., ИСМА НАН Украины, Харьков.

СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЦИНТИЛЛЯТОРОВ И ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ «СЦИНТИЛЛЯТОР – PIN ФОТОДИОД»

Представлены результаты разработки и изготовления спектрометрического стенда для тестирования сцинтилляционных сборок, выполненных на основе системы «сцинтиллятор CsI:Tl – PIN фотодиод». Показано, что изготовленные сборки и разработанный спектрометр удовлетворяют жестким требованиям для приборов, предназначенных для исследования солнечной радиации в космических условиях.

Ключевые слова: сцинтиллятор, PIN фотодиод, детектор, спектрометрия, энергетическое разрешение.

Введение. Измерение спектрометрических характеристик детекторов, предназначенных для космических исследований, остается важнейшей проблемой. Для системы сцинтиллятор – PIN фотодиод (СЦ – ФД) малощумящих измерительных спектрометрических стендов на мировом рынке нет.

Анализ публикаций, цели и задачи. Результаты разработки и изготовления сцинтилляционных детекторов нового поколения на основе системы СЦ–ФД, представлены в [1,2]. Это повлекло за собой необходимость создания для этих сцинтилляционных детекторов высокочувствительных измерительных стендов, по причине их отсутствия на мировом рынке.

Целью настоящей работы является повышение чувствительности тестирования сцинтилляционных детекторов нового поколения. Для достижения поставленной цели необходимо для системы на основе «сцинтиллятор CsI:Tl – PIN фотодиод», создать специальный малощумящий (500 электронов в полосе 10 кГц) спектрометрический стенд для исследования характеристик детекторов.

Материалы исследований. Стенд состоит из измерительной камеры, спектрометра и персонального компьютера (см. рис. 1). Измерительная камера, экранирована от низкочастотных и высокочастотных электромагнитных полей, света и защищена от вибраций. Камера состоит из двух отсеков. В первом отсеке размещается испытуемый сцинтиллятор или

детектор, а во втором расположен зарядочувствительный предусилитель и формирователь импульсов полугауссовской формы. В нижней части первого отсека расположен разъем для фотодиода к которому подключают PIN фотодиоды с различными размерами фоточувствительной площадки.

Спектрометр содержит масштабирующий усилитель, пиковый детектор и блок связи компьютером. Сигнал от предусилителя поступает на 4096-канальный спектрометр, в котором предусмотрена возможность управления параметрами усилителя-формирователя для выбора оптимальной формы импульса.



Рис. 1 – Внешний вид спектрометрического стенда для измерения сцинтилляционных характеристик детекторов на основе системы сцинтиллятор – PIN ФД.
1 – измерительная камера; 2 – спектрометр; 3 – монитор ПЭВМ.

Управление спектрометрическим стендом и обработка результатов измерения осуществляется при помощи персонального компьютера (см. рис. 2).

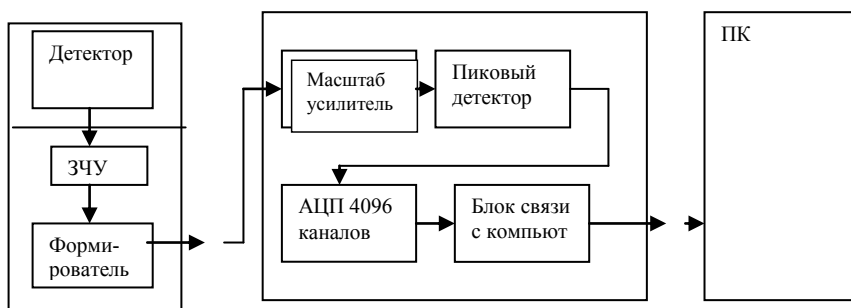


Рис. 2 – Блок-схема спектрометрического стенда

Программное обеспечение для управления спектрометрическим стендом, позволяет сравнивать спектры, вычитать шум, фон, определять энергетическое разрешение и технический световыход. На рис. 3 приведен интерфейс программы спектрометрического стенда.

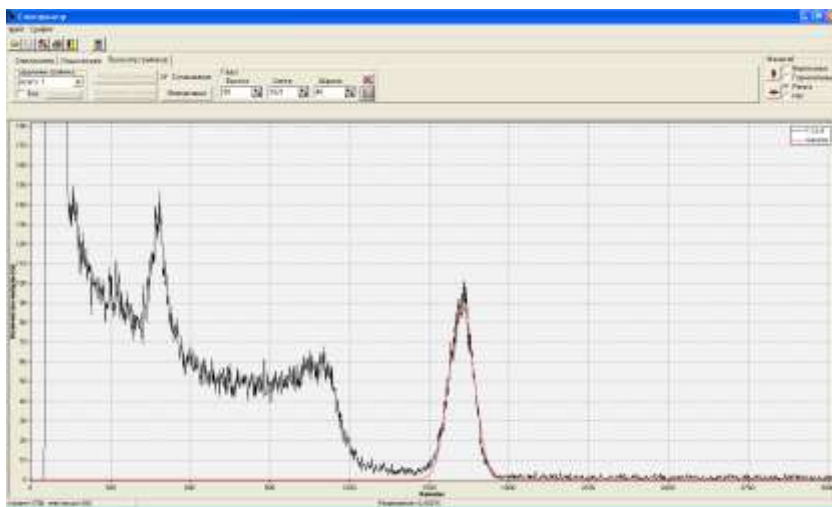


Рис.3 – Интерфейс программы спектрометрического стенда

Результаты исследований. Методика измерения сцинтилляционных характеристик на разработанном спектрометрическом стенде (см. рис. 4) следующая.

Крышку корпуса (1) отделяют от основы корпуса (2), к которой она крепится при помощи накидной гайки (3). Фотодиоды с требуемыми размерами фотоприемной площадки (10×10 или 5×5мм) устанавливают в разъем для фотодиода (4). При помощи вазелинового масла устанавливают сцинтиллятор на фотоприемную площадку PIN фотодиода. На торец сцинтиллятора кладут изотоп требуемого излучения из набора гамма-источников образцовых спектрометрических (ОСГИ) (ГОСТ 8.315-78) (5) на расстоянии 1÷12 см (в зависимости от типа изотопа) от края сцинтиллятора. Затем крышку корпуса (1) закрепляют на основе корпуса (2) при помощи накидной гайки (3) и включают питание. На экране монитора устанавливают требуемые параметры измерений сцинтилляционных характеристик.

Программное обеспечение позволяет выводить результаты измерений на экран монитора. При необходимости результаты измерений можно распечатать. На рис. 5 приведены амплитудные спектры детектора, полученные на спектрометрическом стенде.

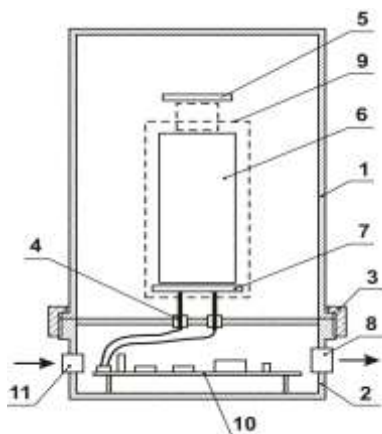


Рис. 4 – Схематическое изображение измерительной камеры:
 1 – крышка корпуса; 2 – основание; 3 – накидная гайка; 4 – разъем для фотодиода; 5 – изотоп; 6 – сцинтилятор; 7 – PIN ФД; 8 – выходной разъем; 9 – детектор СЦ-PIN ФД;
 10 – электронная плата предусилителя; 11 – разъем для питания камеры.

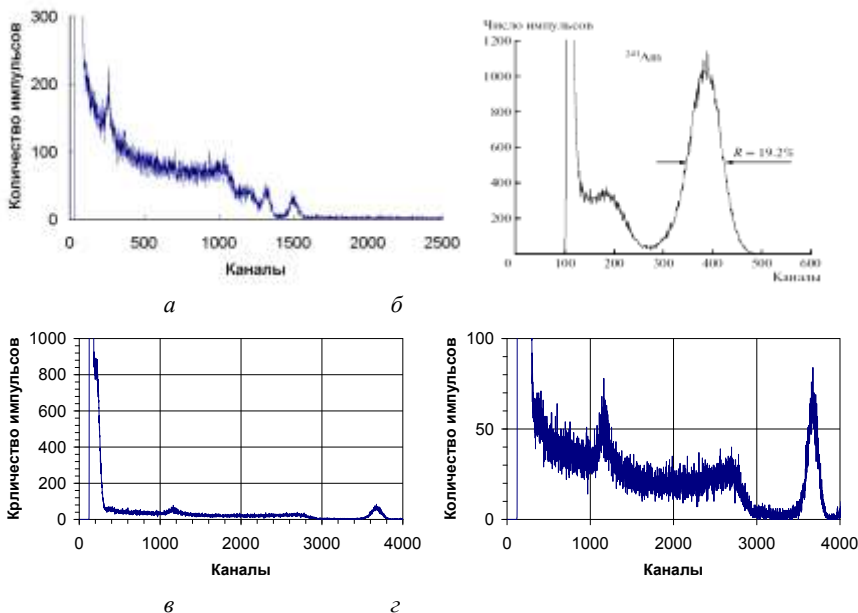


Рис. 5 – Амплитудные спектры детектора CsJ(Tl)+PINФД, полученные на спектрометрическом стенде при регистрации γ -квантов с энергией: а – 59,6 КэВ от источника ^{241}Am ; б – 1,33 МэВ от источника ^{60}Co ; в – 662 КэВ от источника ^{137}Cs и г – его фрагмента.

Важным звеном для получения хороших результатов (500 электронов в полосе 10 кГц) является зарядочувствительный усилитель. В стенде использован специально разработанный малошумящий усилитель с отобранным по шуму полевым транзистором типа КПЗ41А. Для уменьшения шума в усилителе исключен резистор обратной связи, а емкость конденсатора обратной связи менее 0,08пФ. Частота единичного усиления порядка 800 МГц позволяет работать с р-і-п диодами емкостью до 50 пФ со временем формирования от 1 мкс. Масштабирующий усилитель имеет четыре фиксированных коэффициента усиления – 1, 2, 4, 10. Пиковый детектор может обработать сигналы с передним фронтом от 1 мкс до 100 мкс.

Выводы. Таким образом, разработанный спектрометрический стенд для измерения сцинтилляционных характеристик сцинтилляторов и детекторов на основе системы СЦ–ФД стал важным звеном при создании спектрометрических высокочувствительных детекторов нового поколения и позволяет получать и анализировать амплитудные спектры от гамма -изотопов на уровне сегодняшних технических требований.

Список литературы: 1. В.П. Семиноженко, В.Д. Рыжиков, В.М. Свищ, Приборы радиационного контроля нового поколения на основе сцинтилляционных монокристаллов, Функциональные материалы для науки и техники, Харьков, Институт монокристаллов. - 2001. - С. 527-556. 2. Кудин А.М., Бороденко Ю.А., Гринев Б.В., Дибенко А.В., Дудник А.В., Заславский Б.Г., Valtonen E., Eronen T., Peltonen J., Lehti J., Kettunen H., Virtanen A., Huovelin J. Сцинтилляционные сборки «CsI:TI – фотодиод» для регистрации гамма-квантов и протонов // ПТЭ. – 2010. - № 1. - С. 45-51.

Bibliography (transliterated): 1. V.P. Seminozhenko, V.D. Ryzhikov, V.M. Svishh, Pribory radiacionnogo kontrolja novogo pokolenija na osnove scintilljacionnyh monokristallov, Funkcional'nye materialy dlja nauki i tehniky, Har'kov, Institut monokristallov. - 2001. - S. 527-556. 2. Kudin A.M., Borozenko Ju.A., Grinev B.V., Dibenko A.V., Dudnik A.V., Zaslavskij B.G., Valtonen E., Eronen T., Peltonen J., Lehti J., Kettunen H., Virtanen A., Huovelin J. Scintilljacionnye sborki «CsI:TI – fotodiod» dlja registracii gamma-kvantov i protonov // PTJe. – 2010. - № 1. - S. 45-51.

Поступила (received) 14.02.2014

С.Ю. ЛЕОНОВ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

ПРИМЕНЕНИЕ K -ЗНАЧНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ИСЧИСЛЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ В ПРОВОДНИКАХ С ПОТЕРЯМИ

Рассматривается использование K -значного дифференциального исчисления для анализа распространения сигналов по линиям связи с учетом потерь в линиях. Результаты такого моделирования позволяют более точно исследовать работоспособность быстродействующих вычислительных устройств. Моделирование проведено в системе на основе K -значного дифференциального исчисления.

Ключевые слова: K -значное дифференциальное исчисление, распространение сигналов, линии связи, моделирование, работоспособность быстродействующих вычислительных устройств.

Постановка задачи и анализ литературы. В настоящее время при проектировании вычислительных устройств повышенного быстродействия на элементах с высокой степенью интеграции большое внимание необходимо уделять исследованию распространения сигналов по соединительным проводникам. Это связано с тем, что в таких устройствах время распространения сигналов от элемента к элементу соизмеримо со временем задержки в активных элементах. При применении для проектирования существующих систем двоичного моделирования, таких как OrCAD [1] или PCAD [2], такой анализ выполнить не представляется возможным, поскольку в данном случае речь идет об изменениях в амплитуде сигналов в соединительных цепях значительно меньших, чем амплитуда логического сигнала. Применение же для этих целей аналогового моделирования в системах типа MicroCAP [3] неприемлемо из-за больших временных затрат.

В этом плане наиболее подходящим для исследования правильности работы проектируемых вычислительных устройств с учетом распространения сигналов в проводниках является моделирование на основе K -значного дифференциального исчисления [4, 5]. При таком моделировании описание устройств выполняется с помощью K -значных дифференциальных уравнений с ограничениями. Решение этих уравнений совместно с K -значными дифференциальными уравнениями, описывающими логику работы составляющих устройство элементов, позволит более точно исследовать работоспособность таких проектируемых устройств и оценить возможные сбои.

Цель работы – разработать метод моделирования распространения сигналов в длинных линиях на основе K -значного дифференциального исчисления.

© С.Ю. Леонов, 2014

Основная часть. При исследовании процессов в линиях связи между отдельными блоками, находящимися на разных платах или в разных устройствах, можно применять гиперболическое уравнение в частных производных, которое в общем виде записывается следующим образом:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где u – неизвестная переменная; t и x – независимые переменные (t – время, x – расстояние от начала линии); a^2 – постоянный коэффициент, учитывающий распределенную емкость C_0 и индуктивность L_0 линии, $a = 1/L_0 C_0$.

Известно [6, 7], что один из методов решения уравнения (1) основан на сведении его к разностному гиперболическому уравнению

$$u_{i,j+1} = 2(1-\lambda^2)u_{i,j} + \lambda^2(u_{i+1,j} + u_{i-1,j}) - u_{i,j-1}, \quad (2)$$

где $i = 0, 1, 2, \dots, n$; $j = 0, 1, 2, \dots$, $\lambda = a \frac{\tau}{h}$; h, τ – величины шагов

дискретизации соответственно по независимым переменным x и t ; $h = \frac{L}{n}$; L

– длина линии (проводника); $u_{i,j} = u(ih, j\tau)$.

Искомая функция $u(x, t)$ должна удовлетворять начальным условиям $u(0, t) = \mu(t)$.

Таким образом, решение исходного дифференциального уравнения в частных производных сводится к решению разностной задачи. При переходе к K -значной разностной схеме при $\lambda = 1$ получим соотношение

$$U_{i,i+1}^K = U_{i+1,j}^K \langle + \rangle_K U_{i-1,j}^K \langle - \rangle_K U_{i,j-1}^K;$$

$$i = 0, 1, \dots, n; j = 0, 1, \dots,$$

где $U_{i,j}^K = U^K(x_i, t_j)$ – неизвестная переменная в точке (x_i, t_j) , представленная в K -значном виде; $\langle + \rangle_K, \langle - \rangle_K$ – операции сложения и вычитания по модулю K .

В качестве примера рассмотрим передачу сигнала по линии, соединяющей два устройства, одно из которых может выступать в качестве передатчика, а второе – в качестве приемника [8].

На рис. 1 показан возможный вариант связи передатчика и приемника, на примере которого можно продемонстрировать распространение сигналов по линии связи.



Рис. 1. – Вариант связи передатчика и приемника

В системе, показанной на рис. 1, данные передаются из устройства 1 в устройство 2 через модемы 1 и 2. Модем 1 формирует сигналы для передачи в линию, а модем 2 преобразовывает принимаемые сигналы. На рисунке показана односторонняя передача данных, но предполагая, что схема симметрична, все процессы могут протекать и в обратном направлении.

Если на выходе передатчика имеется импульсный сигнал, то на конце линии (т.е. на входе приемника) сигнал может быть искажен за счет потерь в линии. В зависимости от величины потерь в линии, затухание сигнала может быть быстрее или медленнее. На рис. 2 показано распространение фронта сигнала по линии связи без потерь (при $C_0 = 2,5 \cdot 10^{-12}$, $L_0 = 1 \cdot 10^{-6}$, $\tau = 1 \cdot 10^{-9}$, $h = 13 \cdot 10^{-2}$) при моделировании распространения сигнала в системе моделирования на основе K -значного дифференциального исчисления при использовании значности входного алфавита $K = 7$.

В случае потерь линия связи описывается непрерывным дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial^2 U(x,t)}{\partial t^2} = a \frac{\partial^2 U(x,t)}{\partial x^2} - b \frac{\partial U(x,t)}{\partial t} - cU(x,t),$$

где $a = \frac{1}{L_0 C_0}$; $b = \frac{g_0}{C_0} + \frac{r_0}{L_0}$; r_0, g_0 – распределенное сопротивление и проводимость линии; $c = \frac{r_0 g_0}{L_0 C_0}$.

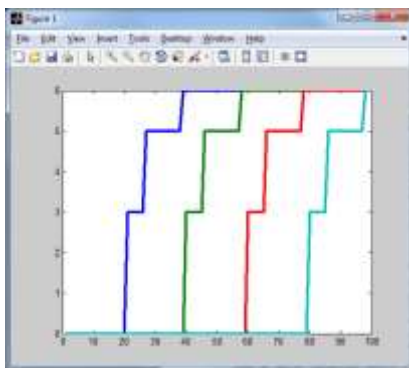


Рис. 2. – Распространение сигнала по линии связи без потерь

Заменяя непрерывные производные разностными соотношениями получим следующее уравнение

$$U_{i,j+1} = \frac{a\tau^2}{h^2(1+2b\tau)}(U_{i+1,j} + U_{i-1,j}) + \frac{2b\tau - 1}{1+2b\tau}U_{i,j-1} + \left(\frac{2-c\tau^2}{1+2b\tau} - \frac{2a\tau^2}{h^2(1+2b\tau)}\right)U_{i,j}$$

После перехода к K -значному разностному уравнению линия с потерями может быть промоделирована в системе моделирования на основе K -значного дифференциального исчисления. На рис. 3 показано моделирование распространения фронта K -значного сигнала по линии связи между источником и приемником с потерями при использовании $K = 7$.

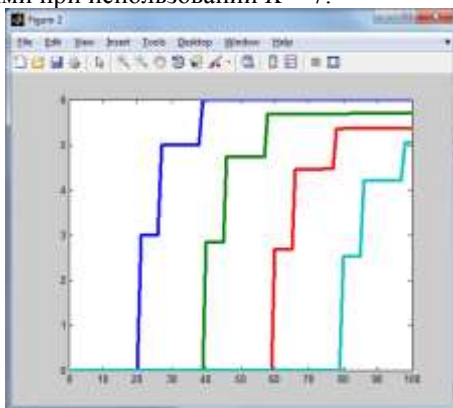


Рис. 3. – Распространение сигнала по линии связи с потерями

С увеличением потерь в линии связи амплитуда передаваемых сигналов уменьшается.

Несмотря на то, что уменьшение амплитуды не достигает порогового уровня и само по себе не приведет к сбоям в функционировании устройств приемной стороны, но при увеличении длины линии в сочетании с другими неблагоприятными факторами, такая передача сигналов может привести к искажениям принимаемой информации. Это, в свою очередь, может привести к сбоям при функционировании устройств, подключенных к приемному модулю.

Выводы. Разработанный метод моделирования длинной линии на основе K -значного дифференциального исчисления позволяет моделировать распространение сигналов по длине проводника с учетом потерь. Это достигается за счет того, что распространение сигнала описывается K -значными дифференциальными уравнениями с потерями, в которых присутствует коэффициент, позволяющий учитывать эти потери. А само представление сигнала в K -значном виде позволяет проанализировать незначительные амплитуды изменения сигнала, что очень важно при исследовании распространения сигнала по проводнику с потерями.

Список литературы: 1. Болотовский Ю.Б. OrCAD. Моделирование. "Поваренная" книга / Ю.Б. Болотовский, Г.И. Таназлы. – М.: Солон-Пресс, 2005. – 200 с. 2. Уваров А.С. P-CAD. Проектирование и конструирование электронных устройств / А.С. Уваров. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2004. – 760 с. 3. Разевиг В.Д. Шемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7 / В.Д. Разевиг. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2003. – 368 с. 4. Дмитриенко В.Д. K -значное дифференциальное исчисление и моделирование цифровых устройств // В.Д. Дмитриенко, С.Ю. Леонов. – Харьков: Транспорт Украины, 1999. – 223 с. 5. Dmitrienko V.D. Research digital devices by means of modeling system on the basis of K-Value differential calculus / V.D. Dmitrienko, S.Yu. Leonov, T.V. Gladkikh // Radioelectronics & Informatics. – № 1. – 2008. – P. 63 – 69. 6. Годунов С.К. Разностные схемы (введение в теорию) // С.К. Годунов, В.С. Рябенский. – М.: Наука, 1977. – 440 с. 7. Демидович Б.П. Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения // Б.П. Демидович, И.А. Марон, Э.Э. Шувалова. – М.: Наука, 1967. – 368 с. 8. Сухман С.М. Синхронизация в телекоммуникационных системах. Анализ инженерных решений / С.М. Сухман, А.В. Бернов, Б.В. Шевкопляс. – М.: Эко-Трендз, 2003. – 272 с.

Bibliography (transliterated): 1. Bolotovskij Ju.B. OrCAD. Modelirovanie. "Povarennaja" kniga / Ju.B. Bolotovskij, G.I. Tanazly. – M.: Solon-Press, 2005. – 200 s. 2. Uvarov A.S. P-CAD. Proektirovanie i konstruirovanie jelektronnyh ustrojstv / A.S. Uvarov. – M.: Gorjachaja Linija – Telekom, 2004. – 760 s. 3. Razevig V.D. Shemotehničeskoe modelirovanie s pomoshh'ju Micro-Cap 7 / V.D. Razevig. – M.: Gorjachaja Linija – Telekom, 2003. – 368 s. 4. Dmitrienko V.D. K znachnoe differencial'noe isčislenie i modelirovanie cifrovych ustrojstv // V.D. Dmitrienko, S.Ju. Leonov. – Har'kov: Transport Ukrainy, 1999. – 223 s. 5. Dmitrienko V.D. Research digital devices by means of modeling system on the basis of K-Value differential calculus / V.D. Dmitrienko, S.Yu. Leonov, T.V. Gladkikh // Radioelectronics & Informatics. – № 1. – 2008. – P. 63 – 69. 6. Godunov S.K. Raznostnye shemy (vvedenie v teoriju) // S.K. Godunov, V.S. Rjaben'kij. – M.: Nauka, 1977. – 440 s. 7. Demidovich B.P. Čislennye metody analiza. Približenie funkcij, differencial'nye i integral'nye uravnenija // B.P. Demidovich, I.A. Maron, Je.Š. Shuvalova. – M.: Nauka, 1967. – 368 s. 8. Suhman S.M. Sinhronizacija v telekommunikacionnyh sistemah. Analiz inženernyh reshenij / S.M. Suhman, A.V. Bernov, B.V. Shevkoptyas. – M.: Jeko-Trendz, 2003. – 272 s.

Поступила (received) 05.03.2014

Т.Г. МАЩЕНКО, канд. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»
Р.И. АКОЕВ, студент НТУ «ХПИ»

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ РАСХОДА ДВИЖУЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ

В статье приведен анализ методов и средств измерений расхода жидких и газообразных сред. В ходе анализа существующих методов и технических средств обоснован выбор наиболее перспективного и точного метода контроля расхода движущихся жидкостей.

Ключевые слова: расход, давление, система, расходомеры, методы анализа, измерения.

Постановка проблемы. Важное значение в интенсификации производства и повышении качества выпускаемой продукции играет автоматизация контрольных операций и, в особенности, системы автоматизированного управления технологическими процессами. Стремительное развитие электроники и вычислительной техники оказалось предпосылкой для широкой автоматизации самых разнообразных процессов в промышленности, однако реализация этой предпосылки в значительной мере определяется возможностями устройств для получения информации о регистрируемом параметре или процессе.

В системах управления производственными процессами и контроля качества выпускаемой продукции одним из основных регулируемых параметров является контроль расхода жидкостей, газов и сыпучих веществ непосредственно в ходе технологического процесса. Ни одна отрасль промышленности не обходится без расходомеров. Это расходомеры нефти и природного газа, расходомеры воды и пара для отопления жилищ и промышленных предприятий, расходомеры молока и муки для расфасовки в пакеты и бутылки. Это, наконец, расходомеры-счетчики питьевой и горячей воды, без которой немислим сегодня ни один дом.

В условиях резкого повышения спроса на энергоресурсы и их стоимости каждый хочет знать о своем расходе ресурсов от первичных производителей до конечных потребителей. При этом точность измерения ресурсов, будь то мука или бензин, приобретает первостепенное значение[1].

Значения измеряемых расходов могут лежать в диапазоне от тысячных долей кубометров до нескольких тысяч кубических метров в час. В то же время расходомерные вещества могут сильно отличаться по своим физико-химическим свойствам. Это может быть нефть, нейтральные жидкости, электролиты, жидкие металлы, газы и т.д. Все это в сочетании с разнообразными условиями применения и различными требованиями к точности надежности и

стоимости определяет значительное число типов и конструкций средств автоматического измерения расхода, а также потребность в разработке более новых, более современных расходомеров.

Цель статьи. Оценить достоинства и недостатки современных методов измерения расхода жидкостей и газов, а также обосновать выбор наиболее перспективного и точного метода для контроля расхода движущихся жидкостей.

Основной раздел. Расходомер, как видно из названия — устройство, предназначенное для измерения расхода какого-либо вещества — как правило, жидкости или газа. Если имеется канал диаметром d и по нему со средней скоростью $v_{\text{ср}}$ перемещается жидкость или газ, то расходом является величина:

$$Av_{\text{ср}} = \int v dA, \quad (1.1)$$

где $A=\pi d^2/4$ — площадь поперечного сечения канала.

Следует сразу отметить, что вещества, расход которых необходимо измерить, могут быть сжимаемыми (газ) или несжимаемыми (жидкость), и методики измерения расхода в обоих случаях имеют свои особенности.

Независимо от типа используемого устройства определения расхода вещества является довольно сложной комплексной задачей, при решении которой приходится учитывать множество факторов, таких как:

- физические характеристики исследуемой среды.
- физические характеристики окружающей среды.
- форма канала и свойства материала, из которого он изготовлен.

К каждому датчику, как правило, прилагается набор документов, описывающих технические параметры прибора, его ограничения и рекомендации по эксплуатации.

Среди довольно большого разнообразия расходомеров по принципу действия можно выделить следующие основные группы:

- турбинные и шариковые расходомеры;
- вихревые расходомеры;
- ультразвуковые расходомеры;
- электромагнитные расходомеры;
- микро расходомеры;
- кориолисовские расходомеры;
- расходомеры с мишенями;
- детекторы изменения скорости потока.

Рассмотрим основные виды расходомеров. Одними из первых появились **турбинные расходомеры**. Еще в Древнем Египте заметили, что скорость водяного колеса прямо пропорциональна скорости движения воды в Ниле.

Винт Архимеда, использовавшийся в Месопотамии, также показал, что скорость вращения турбины пропорциональна скорости потока воды, протекающей через поливочный трубопровод. Для увеличения скорости вращения жерновов на мельницах приоткрывали шлюзовую заслонку, в результате чего увеличивались объем и скорость падающей на лопасти водяного двигателя воды, что приводило к увеличению числа оборотов приводного вала. Но лишь спустя тысячелетия появились первые крыльчатые и турбинные приборы, позволяющие измерять как скорость ветра на море (анемометры), так и скорость движения жидкостей и газов в трубопроводах [2].

Преимуществами крыльчатых и турбинных расходомеров являются их сравнительная простота, отсутствие электронных устройств в конструкции расходомеров, менее жесткие требования к наличию прямых участков измерительных трубопроводов. Однако крыльчатым, турбинным и шариковым расходомерам присущи следующие серьезные недостатки:

- вероятность засорения опорных подшипников осей турбин, что требует особой конструкции этих подшипников (невозможно выполнить для всех сред);
- вероятность отложения загрязнений на лопастях турбин (крыльчатках), особенно при работе в загрязненных средах природного газа и в насыщенной известью воде;
- сильная зависимость показаний величины расходов газов от величины избыточного давления в измерительном трубопроводе, что требует установки перед такими счетчиками систем поддержания постоянного давления;
- необходимость применения электронных вычислителей-корректоров в средах с переменной температурой, плотностью и давлением, что сильно удорожает систему;
- трудность съема показаний с механического счетчика при интеграции приборов в систему АСУ ТП.

В связи с данными обстоятельствами крыльчатые, турбинные и шариковые расходомеры все реже используются для систем учета и технологических измерений в промышленности и энергетике. Единственной областью применения, где с ними на сегодня еще не могут конкурировать другие расходомеры, является учет холодной и горячей воды в жилищно-бытовом секторе [2].

Принцип действия **расходомеров переменного перепада давления** основывается на том, что при протекании потока через сужающее устройство скорость его повышается по сравнению со скоростью до сужения, а статическое давление падает. По измеренным температуре и избыточному давлению определяется плотность среды. Зная диаметр трубопровода, плотность среды и перепад давления, можно определить мгновенную скорость потока, которая через известную площадь поперечного сечения трубопровода пересчитывается в объемный расход. Для реализации этого метода используются стандартные сужающие устройства – диафрагмы, сопла и трубы Вентури. Величина расхода определяется в соответствии с выражением

$$G = \beta \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \sqrt{\Delta P}, \quad (1.2)$$

где β – коэффициент пропорциональности;

D – внутренний диаметр трубопровода;

ΔP – величина перепада давления.

Как и для многих других расходомеров, применение этого метода требует выполнения комплекса определенных условий:

- фазовое состояние потока не должно изменяться при прохождении сужающего устройства (к примеру, пар после прохождении диафрагмы не должен конденсироваться, вода вскипать);

- поток до и после сужения должен быть ламинарным, что требует значительных длин прямых участков до и после сужающих устройств, особенно после местных сопротивлений (насосы, клапаны);

- загрязнение среды не должно превышать предельных значений.

Принцип действия электромагнитных расходомеров базируется на законе электромагнитной индукции Фарадея. В соответствии с ним в электропроводящей жидкости, пересекающей магнитное поле, индуцируется электродвижущая сила, пропорциональная скорости движения жидкости. Конструктивно электромагнитные расходомеры выпускаются двух типов: для заполненных и частично заполненных трубопроводов. И в том, и в другом случае электропроводящая среда протекает в круглом трубопроводе, в котором создается магнитное поле с силовыми линиями, перпендикулярными направлению потока. В полностью заполненных трубопроводах индуцированное в рабочей среде напряжение снимается одной парой диаметрально установленных электродов. В частично заполненных трубопроводах индуцированное в рабочей среде напряжение снимается несколькими парами электродов, установленных на хордах, поэтому при опускании уровня жидкости всегда оказываются задействованными несколько пар электродов [3].

Достоинствами электромагнитных расходомеров являются:

- идентичность показаний величины расхода в полностью заполненных трубопроводах как для турбулентного, так и для ламинарного потоков;

- независимость показаний от вязкости и плотности среды;

- возможность реализации метода для очень больших диаметров трубопроводов и отсутствие при этом дополнительного динамического сопротивления;

- работоспособность при высоких давлениях среды – вплоть до 100 МПа.

К недостаткам следует отнести:

- невозможность использования расходомеров для непроводящих жидкостей (углеводороды, аммиак, кислоты и др.);

-наличие дополнительной погрешности от величины электропроводности жидкости, что вообще невозможно учесть в практике измерений, так как электропроводность среды (например, сетевой воды) может изменяться в течение года в десятки раз;

- возможность отложения магнетита на стенках измерительного трубопровода расходомера и значительное увеличение погрешности при наличии окислов железа в воде;

- необходимость резки трубопровода, приварки фланцев и установки измерительного трубопровода, что часто невыполнимо.

Одними из наиболее распространенных приборов измерения расхода и количества жидкостей, и газов являются расходомеры и счетчики **с ультразвуковыми первичными преобразователями**. Ультразвуковые расходомеры (УЗР) имеют ряд важных преимуществ:

-позволяют измерять расход с высокой точностью в широком динамическом диапазоне;

-не создают потери напора за счет отсутствия элементов прибора в измерительном канале;

-не влияют на гидродинамику потока;

-обладают повышенной надежностью за счет отсутствия подвижных элементов;

-обеспечивают возможность измерения расхода нефтепродуктов, агрессивных, неэлектропроводных, непрозрачных и неоднородных жидкостей (суспензий, пульп), в том числе многокомпонентных сред;

-низкое энергопотребление;

-предоставляют возможность имитационной поверки без демонтажа первичного преобразователя;

-предоставляют возможность монтажа без остановки технологического процесса (для накладных приборов);

-сохраняют технико-эксплуатационные характеристики во времени.

Кроме того, УЗР обладают высоким быстродействием и стабильностью метрологических характеристик (за исключением трубопроводов с малыми диаметрами), а линейная зависимость исходного сигнала от расхода и электронный выход определяют удобство применения этих расходомеров в системах автоматического управления и регулирования [4-6]. Как показывает уже имеющийся опыт, наиболее информативными являются измерение расхода жидких и газообразных сред на основе пьезоэлектрических преобразователей. Метод измерения ультразвуковыми расходомерами основывается на соотношении скоростей распространения акустических колебаний в неподвижной среде и самой среды. Многообразии параметров, которые зависят от скорости измеряемой среды, и предопределило большое количество способов измерения задержки прохождения сигнала от излучателя к приемнику и обратно. С дальнейшим развитием расходомеров данного типа преимущество предоставляется тем приборам, метрологические характеристики которых не

зависят от условий эксплуатации — температуры, давления, концентрации примесей, и т.п. [7].

В настоящее время известны три метода измерения расхода вещества с помощью ультразвука. Метод, основанный на разности времен распространения ультразвуковых волн, направленных за потоком и против него. Ультразвуковые колебания перемещаются подвижной средой. Поверхностью отражения для импульса зондирования является естественная внутренняя поверхность трубопровода или специальный экран непосредственно в измеряемой среде. При этом средняя скорость измеренной среды может определяться на основании эффекта сноса ультразвукового колебания подвижной средой и изменения времени прохождения луча как векторная разность скоростей ультразвуковых колебаний по направлению движения измерительной среды и против нее.

Измерительные схемы основаны на измерении разности времен, сдвига фаз, разности частот прохождения ультразвуковых сигналов, обусловленных скоростью потока

$$\Delta\tau = \frac{2LQB}{c^2 - (\sin\beta QB)^2}, \quad (1.3)$$

где Q — расход;

$B(Re, \rho, \mu, t, P, \varepsilon, D)$ — функция, зависящая от параметров измеряемой среды и параметров трубопровода;

L — путь ультразвукового луча;

Re — число Рейнольдса измеряемой среды;

ρ — плотность измеряемой среды;

μ — вязкость измеряемой среды;

t — температура измеряемой среды;

P — давление измеряемой среды;

ε — шероховатость трубопровода;

D — диаметр трубопровода;

c — скорость ультразвука в измеряемой среде;

β — угол ввода ультразвукового луча относительно вертикали.

Второй метод, основанный на геометрическом сносе ультразвуковой волны (с лучом перпендикулярным к потоку), обусловленном движением потока вещества. Ультразвуковые волны излучаются в измеряемую среду по нормали к направлению движения потока. Два приемных пьезоэлемента устанавливаются рядом таким образом, что при неподвижном измеряемом потоке интенсивности колебаний, принятых каждым пьезоэлементом, равны. При движении измеряемого потока ультразвуковые волны распространяются в направлении потока, при этом интенсивность ультразвуковых колебаний на приемных пьезоэлементах разная. Измеренная разность сигналов на приемных пьезоэлементах является мерой расхода потока вещества. Метод приме-

ним для измерения в трубопроводах больших диаметров и при больших скоростях потоков. По своей сути данный метод отличается от описанного выше тем, что измеряется не время, а геометрический снос луча.

Третий метод, основанный на доплеровском сдвиге частоты ультразвукового сигнала, отраженного от частиц измеряемого потока. Передающий пьезоэлемент излучает гармонический ультразвуковой сигнал в измеряемую среду. Приемный пьезоэлемент воспринимает отраженный от неоднородностей потока, имеющий доплеровский сдвиг частот, сигнал. Мерой расхода является доплеровская разность частот излучаемого и отраженного сигналов:

$$\Delta f_{\text{д}} = \frac{f_1 (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) QV}{C} \quad (1.4)$$

где f_1 — исходная частота ультразвуковых колебаний;

α_1 — угол между вектором скорости частицы отражателя и направлением исходного луча;

α_2 — угол между вектором скорости частицы отражателя и направлением отраженного луча;

C — скорость ультразвука.

Для высокоточных измерений расхода целесообразно применять метод, основанный на разности времен распространения ультразвуковых волн, направленных по потоку и против него. Вследствие небольшой чувствительности, крутизны градуировочной характеристики невозможно получить высокую точность измерений методом геометрического сноса ультразвуковой волны. Доплеровский метод наиболее широко применяется для измерения локальных скоростей, а в области измерения расхода имеет ограниченные возможности.

Вывод: Такое обилие и разнообразие конструкций и схем УЗР вызвано постоянным совершенствованием ультразвукового метода, как наиболее перспективного метода измерения расхода и количества вещества. Те или иные конструкции специально создавались для определенных условий. Так, например, накладные УЗР просто незаменимы в случаях, когда необходимо проводить учет энергоносителя без остановки технологического процесса. А многоканальные УЗР характеризуются высокой точностью измерения, но при этом имеют большую стоимость.

Список литературы: 1. *Гуртовцев А.Л.* Комплексная автоматизация учета и контроля электроэнергии, и энергоносителей на промышленных предприятиях и их хозяйственных объектах // Промышленная энергетика. — 2002. — № 8. — С. 7-14. 2. *Дмитрий Тросников, Владимир Жук.* Расходомеры: принципы работы и опыт эксплуатации // Энергетика и ТЭК. — 2008. — №4(61). 3. *Дмитрий Тросников, Владимир Жук.* Расходомеры: принципы работы и опыт эксплуатации // Энергетика и ТЭК. — 2008. — №5(62). 4. *Кремлевский П.П.* Расходомеры и счетчики количества: Справочник. — Л.: Машиностроение, 1989. — 701с. *Лобачев П.В., Шевелев Ф.А.* Измерение расхода жидкостей и газов в системах водоснабжения и канализации. — М.: Стройиздат, 1985. —

424 **6.** Киясбейли А.Ш., Измайлов А.М., Гуревич В.М. Частотно-временные ультразвуковые расходомеры и счетчики. — М.: Машиностроение, 1984. — 128 с. **7.** Коробко И.В., Гришанова И.А., Писарец А.В., Кузьменко П.К. Использование приборов коммерческого учёта на Украине // Энергосбережение (Москва). — 2005. — № 3 — С. 36-40.

Bibliography (transliterated): **1.** Gurtovcev A.L. Kompleksnaja avtomatizacija ucheta i kontrolja jelektrojenergii, i jenergonositelej na promyshlennyh predpriyatijah i ih hozjajstvennyh ob#ektah // Promyshlennaja jenergetika. — 2002. — № 8. — S. 7-14. **2.** Dmitrij Trosnikov, Vladimir Zhuk. Rashodomery: principy raboty i opyt jekspluatacii // Jenergetika i Tjek. — 2008. — №4(61). **3.** Dmitrij Trosnikov, Vladimir Zhuk. Rashodomery: principy raboty i opyt jekspluatacii // Jenergetika i Tjek. — 2008. — №5(62). **4.** Kremlevskij P.P. Rashodomery i schetchiki kolichestva: Spravochnik. — L.: Mashinostroenie, 1989. — 701 **5.** Lobachev P.V., Shevelev F.A. Izmerenie rashoda zhidkostej i gazov v sistemah vodosnabzhenija i kanalizacii. — M.: Strojizdat, 1985. — 424 **6.** Kijasbejli A.Sh., Izmajlov A.M., Gurevich V.M. Chastotno-vremennye ul'trazvukovye rashodomery i schetchiki. — M.: Mashinostroenie, 1984. — 128 s. **7.** Korobko I.V., Grishanova I.A., Pisarec A.V., Kuz'menko P.K. Ispol'zovanie priborov kommercheskogo uchjota na Ukraine // Jenergosberezhenie (Moscow). — 2005. — № 3 — p. 36-40.

Поступила (received) 24.05.2013

Т. Г. МАЩЕНКО, к.т.н., проф. НТУ «ХПИ»;
Т. А. ТОНОЯН, магистр НТУ «ХПИ»

СНЯТИЕ И ОБРАБОТКА БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ГОЛОВНОГО МОЗГА

В статье рассмотрены результаты разработки прибора для анализа деятельности центральной нервной системы (ЦНС), с помощью которого можно исследовать биопотенциалы головного мозга, проводить диагностику, прогнозировать этапы лечения центральной нервной системы.

Ключевые слова: головной мозг, электроэнцефалограф, датчик, биоэлектрическая активность, фильтр низких частот, фильтр высоких частот.

Введение. Электроэнцефалография (ЭЭГ) – метод записи электрической активности различных отделов головного мозга, которая преобразуется в соответствующую кривую, называемую электроэнцефалограммой (ЭЭГ). Прибор, с помощью которого выполняется электроэнцефалография, называется энцефалографом. Электроэнцефалограмма с помощью ряда характеристик отражает состояние головного мозга человека и уровень его сознания. В головном мозге человека процессы имеют электрохимическую природу, исходя из этого, на поверхности головы человека возникают потенциалы от 1мкВ до 2мкВ, при частотном диапазоне до 70Гц.

Такую активность можно зафиксировать простым прикладыванием пластинок из неполяризующихся материалов, при этом ЭЭГ не наносит никакого вреда человеческому организму. На выходе устройства получают графическое изображение колебаний биоэлектрических потенциалов мозга.

Цель работы. оценка информативных параметров электроэнцефалограммы и анализ методов их обработки.

Анализ литературы. В работах [1, 2] рассмотрены электрохимические процессы, происходящие в головном мозге, в [3, 4] описываются фильтры для подавления помех, возникающих при работе электроэнцефалографа, в [2] проанализированы характеристики существующих электроэнцефалографов.

Из зарубежных ЭЭГ устройств наиболее распространены электроэнцефалографы фирм *Nihon Kohden*, *ORION*. На отечественном рынке лидируют электроэнцефалографы фирм *Nihon Kohden*, МБН, *NeuroCom*, *TREDEX* («DX-системы»). На основании обзора и анализа технических характеристик уже разработанных ЭЭГ устройств можно сделать вывод, что они имеют высокие технические параметры, но дорого стоят, что подтверждает актуальность разработки.

Реализация. На сегодняшний день наука и медицина широко изучили различные принципы функционирования организма человека. Однако, многие процессы требуют большего внимания и изучения. К таким процессам относится механизм функционирования ЦНС. Но, все же, достигнутые на сегодня результаты исследований в этой области позволяют диагностировать на ранних стадиях такие заболевания, как эпилепсия, воспалительные процессы ЦНС, черепно-мозговые травмы и др.

По форме кривой, т. е. по морфологии волнового процесса, электроэнцефалограмма состоит из двух типов волн: из волн, представляющих графическое изображение колебаний, наблюдаемых в отсутствие специальных воздействий, т. е. из спонтанных колебаний и из волн, возникающих под воздействием афферентных стимулов — токов действия. Прослеживая сложную динамику биоэлектрических реакций мозга, делаются попытки проникнуть в законы специфически человеческой психической деятельности.

Присоединение этих точек к измерительному прибору называется отведением. Отведение потенциалов производится с помощью специальных контактных устройств — электродов, которые либо прикладываются к поверхности тканей, покрывающих мозг, либо контактируют непосредственно с поверхностью мозга, либо, наконец, вводятся в его глубинные отделы. При отведении через ткани необходимо всегда учитывать, во-первых, их сопротивление, которое уменьшает реальную амплитуду биопотенциалов, и, во-вторых, возможную собственную их электрическую активность (особенно мышечные потенциалы, а также кожно-гальванический рефлекс), которая может суммироваться с электрической активностью мозга.

Так как при оценке ЭЭГ учитываются формы колебаний, их амплитуда, частота и временные соотношения, то регистрирующая аппаратура должна обеспечить максимально верное изображение исследуемых сигналов в виде удобочитаемой кривой с возможностью определения указанных параметров. Поскольку величина разности потенциалов, генерируемых мозгом, является очень малой и нижняя их граница, доступная измерению в настоящее время, определяется единицами микровольт, то, чтобы записать эти колебания, их необходимо усилить. Для этого используются электронные усилители, в частности усилители напряжений.

Рассмотрим функциональную схему анализатора:

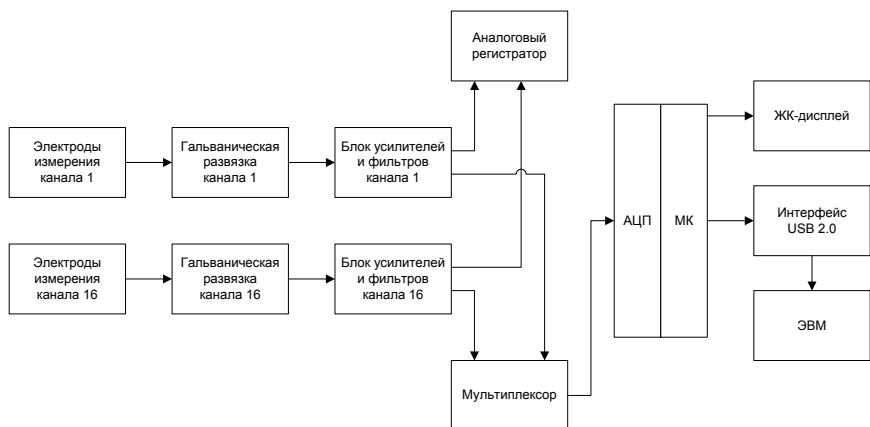


Рис. 1 – Функциональная схема анализатора

Прибор содержит 16 электродов, необходимых для полного описания нервной активности. Электроды крепятся на голове пациента. Каждый электрод снимает потенциалы на определенном участке. Далее ставим гальваническую развязку для защиты человека от опасных напряжений, а так же для исключения возникновения паразитных токов в силовых цепях и цепях управления. Сигнал с электродов проходит через усилитель, фильтры и мультиплексор на АЦП микроконтроллера.

АЦП, встроенный в микроконтроллер, разбивает сигнал на цифровые отсчеты. Эти отсчеты заносятся в память вместе с информацией о пациенте, введенной с клавиатуры. МК управляет работой энцефалографа в целом.

Передача информации с МК на ЭВМ и с ЭВМ на МК происходит с помощью последовательного интерфейса USB, который аппаратно встроен в микроконтроллер. Интерфейс USB 2.0 содержит интегрированный приемопередатчик, соответствующий спецификации шины USB 2.0 full-speed, буфер FIFO объемом 328 Байт, а так же поддерживает организацию четырех каналов передачи данных.

Аппарат снабжен ЖК-дисплеем, на который выводится буквенно – цифровая информация. ЖК-дисплей поддерживает русские шрифты.

После блока усилителей и фильтров ставят аналоговый регистратор, который предназначен для регистрации сигналов на бумажный носитель.

Во время снятия биопотенциалов на аппарат действуют различного рода помехи, для их устранения используются фильтры высоких и низких частот. Низкочастотные помехи, содержащиеся в полезном сигнале, устраняем с помощью ФНЧ, используем ФНЧ Баттерворта 2-го порядка, который имеет максимально плоскую АЧХ, умеренную фазовую нелинейность, приемлемую переходную характеристику и достаточно крутой спад АЧХ вне полосы пропускания. Сигнал, снимаемый с пациента, содержит высокочастотные помехи. Для их устранения ставим ФВЧ (фильтр высоких частот). В качестве ФВЧ

используем ФВЧ Баттерворта 2-го порядка. Фильтр Баттерворта характеризуется высокой скоростью затухания и эффективно подавляет частоты, большие частоты среза.

Расчет ФНЧ Баттерворта.

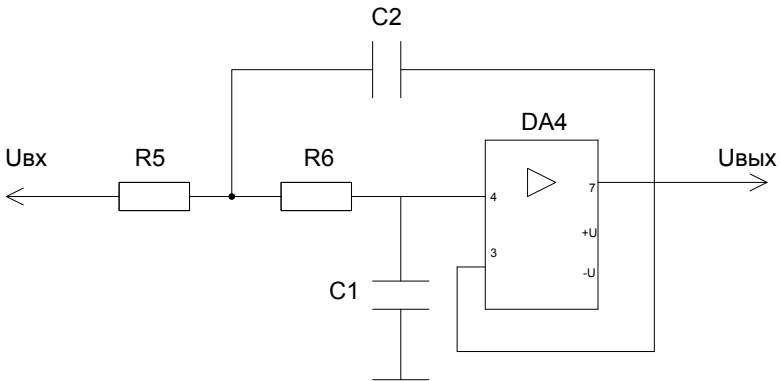


Рис.2 –ФНЧ 2-го порядка Баттерворта

В качестве фильтра используем фильтр второго порядка Баттерворта без обратной связи - коэффициент усиления равен 1. Частота среза $F_{cp}=100$ Гц;

Значения сопротивлений получаются из передаточной функции НЧ фильтра:

$$R5 = R6 = \frac{a \cdot C_2 \pm \sqrt{a^2 \cdot C_2 - 4b \cdot C_1 \cdot C_2}}{4\pi \cdot F_{\text{н0}} \cdot \tilde{N}_1 \cdot \tilde{N}_2} \quad (1)$$

где a, b –коэффициенты полинома; C_1, C_2 - номиналы емкостей; F_{cp} – частота среза; $a=1,4142$; $b=1,0000$ (табличное значение), чтобы сопротивления резисторов были действительными должно выполняться условие:

$$\frac{C_2}{C_1} \geq \frac{4b}{a^2}; \quad \frac{C_2}{C_1} \geq \frac{4}{2} \geq 2; \quad C_2 \geq 2C_1 \quad (2)$$

Возьмем согласно ряду номинальных значений конденсаторов:

$C_1=1 \cdot 10^{-6}$ Ф, $C_2=2,2 \cdot 10^{-6}$ Ф, тогда:

$$R5 = R6 = \frac{1,4142 \cdot 2,2 \cdot 10^{-6} \pm \sqrt{2,2 \cdot 2,2 \cdot 10^{-12} - 4 \cdot 10^{-12} \cdot 2,2}}{4\pi \cdot 35 \cdot 100 \cdot 10^{-12} \cdot 2,2} = 786,1$$

$R_5=R_6=787$ Ом.

Расчет ФВЧ Баттерворта.

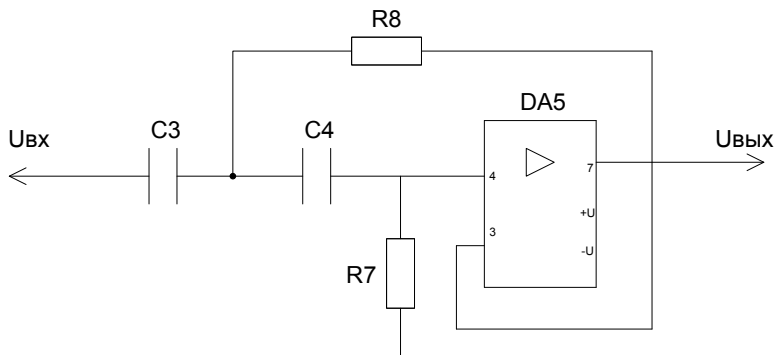


Рис.3– ФВЧ 2-го порядка Баттерворта

В качестве фильтра используем фильтр 2-го порядка Баттерворта. Коэффициент усиления равен 1. $F_{\text{ср}} = 1$ Гц.

Пусть $C_3 = C_4 = C = 10^{-6}$ Ф.

Тогда:

$$R_7 = \frac{1}{\pi \cdot F_{\text{ср}} \cdot \tilde{N} \cdot a}, \quad R_8 = \frac{a}{4\pi \cdot F_{\text{ср}} \cdot \tilde{N} \cdot b} \quad (3)$$

где a, b – коэффициенты полинома; C_3, C_4 – номиналы емкостей; $F_{\text{ср}}$ – частота среза; $a = 1,4142$; $b = 1,0000$ (табличное значение)

$$R_7 = \frac{1}{3,14 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 1,4142} \cong 225000 \text{ Ом}, \quad R_7 = 225 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

$$R_8 = \frac{1,4142}{4 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 1} \cong 112500 \text{ Ом}, \quad R_8 = 112,5 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Микроконтроллер предназначен для того, чтобы обрабатывать полученную информацию и передавать ее на компьютер. USB-устройство служит связующим звеном между микроконтроллером и компьютером.

Программное обеспечение для электроэнцефалографов насчитывает широкий выбор методов, алгоритмов и способов представления результатов обработки ЭЭГ. Среди методов обработки электроэнцефалографических сигналов можно выделить такие: корреляционных, спектральный анализ, когерентный. Использование таких методов позволяет количественно оценить взаимосвязь между различными участками головного мозга. Кроме того, врач, при обследовании пациента, сможет получить подробную и точную информацию о состоянии ЦНС в виде диаграмм, таблиц, графиков. Такое обследование ускоряет принятие решение врачей о диагнозе и назначении лечения.

Выводы. Благодаря внедрению технологий, процесс медицинского обследования становится автоматизированным и более упрощенным. Использование ЭВМ для исследования электрических сигналов головного мозга дает возможность для дальнейшего развития и усовершенствования разработок в данной области.

Список литературы: 1. Сахаров В.Л., Андреевко А.С. – Методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов: учебн. пособие / Сахаров В.Л., Андреевко А.С. – Таганрог: Изд-во «Антон», 2000. – 45 с. 2. Иванов Л.Б. Прикладная компьютерная электроэнцефалография: учебн. пособие / Иванов Л.Б. – Москва: АЗОТ «Антидор», 2000. – 352 с. 3. Зеленин А.Н., Костромичский А.И., Бондарь Д.В. – Активные фильтры на операционных усилителях: учебн. пособие / Зеленин А.Н., Костромичский А.И. – Х.: Телетех, 2001. изд. второе, исправ. и доп. – 150 с.: ил. 4. Ивашко А.В. - Методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов: учебн. пособие / Ивашко А.В. - Харьков: НТУ "ХПИ" - 2005 - 240с.

Bibliography (transliterated): 1. Saharov V.L., Andreenko A.S. – Metody i algoritmy cifrovoj obrabotki signalov: uchebn. posobie / Saharov V.L., Andreenko A.S. – Taganrog: Izd-vo «Anton», 2000. – 45 s. 2. Ivanov L.B. Prikladnaja komp'juternaja jelektroencefalografija: uchebn. posobie / Ivanov L.B. – Moskva: AZOT «Antidor», 2000. – 352 s. 3. Zelenin A.N., Kostromickij A.I., Bondar' D.V. – Aktivnye fil'try na operacionnyh usiliteljah: uchebn. posobie / Zelenin A.N., Kostromickij A.I. – H.: Teleteh, 2001. izd. vtoroe, isprav. i dop. – 150 s.: il. 4. Ivashko A.V. - Metody i algoritmy cifrovoj obrabotki signalov: uchebn. posobie / Ivashko A.V. - Har'kov: NTU "HPI" -2005 - 240s.

Поступила (received) 22.02.2014

Т.Б. НИКИТИНА, д-р. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;
М.О. ТАТАРЧЕНКО, асп. НТУ «ХПИ»;
В.В. ХОМЕНКО, асп. НТУ «ХПИ»

СИНТЕЗ РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВУХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Разработана математическая модель двухмассовой электромеханической системы с учетом неопределенности объекта управления и обоснован вектор цели робастного управления. Выполнено исследование динамических характеристик робастного управления двухмассовой электромеханической системой. Показано, что синтезированная система робастного управления имеет низкую чувствительность к изменению параметров модели объекта управления.

Ключевые слова: двухмассовая электромеханическая система, робастное управление, математическая модель, неопределенности параметров.

Введение. Для эффективного повышения точности регулирования скорости вращения электромеханических систем с упругими элементами в трансмиссии между приводным двигателем и рабочим органом широко используется управление по вектору состояния. Методы синтеза систем управления, основанные на минимизации квадратичного критерия, называются задачами H^2 -оптимизации. Однако, квадратичный критерий чувствителен к наличию неучтенных помех и возмущений как со стороны внешних сигналов, так и параметрических возмущений самих объектов. Поэтому в последнее десятилетие получили развитие методы минимизации H^∞ -нормы, которая служит эффективным показателем реакции системы на различного типа воздействия при наличии неопределенностей в описании объекта управления.

Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами. Рассмотрим построение робастной системы управления для работы во всем диапазоне изменения параметров объекта управления. При таком подходе в вектор цели робастного управления необходимо включить переменные состояния системы, характеризующие чувствительность системы к изменению параметров объекта управления, а в вектор внешних воздействий включить сами изменения параметров объекта управления. Для синтеза робастного управления необходима математическая модель объекта управления в виде уравнения состояния, в которой в вектор внешних воздействий включены неопределенности параметров модели исходного объекта управления, а в вектор цели робастного управления включены переменные состояния объекта управления, характеризующие реакцию объекта управления на вариацию параметров модели исходного объекта управления.

© Т.Б. Никитина, М.О. Татарченко, В.В. Хоменко, 2014

Анализ последних достижений и публикаций по данной проблеме. К настоящему времени теория робастного управления динамическими системами представляет собой законченную теорию и доведена до программной реализации, в частности, в Robust control toolbox пакета MATLAB [1]. Задача синтеза робастного управления заключается в минимизации чувствительности системы к параметрическим возмущениям [2-6]. В частности для линейной системы управления в замкнутой форме по вектору состояния системы, восстанавливаемому с помощью робастного наблюдателя, находится из условия минимизации нормы вектора цели по управлению и максимизации этой же нормы вектора цели по норме вектора внешних воздействий [7-10]. В работах [11-16] разработаны математические модели многомассовых электромеханических систем. Однако, в этих работах не разработана математическая модель двухмассовой электромеханической системы с учетом неопределенности объекта управления а также отсутствует методика синтеза робастного управления такой системы с учетом неопределенности объекта управления.

Цель статьи. Целью данной статьи повышение точности управления и уменьшение чувствительности к изменению параметров объекта управления двухмассовой электромеханической системой на основе робастных методов. Задачей статьи является разработка математической модели, синтез и исследование динамических характеристик робастного управления двухмассовой электромеханической системы с учетом неопределенности объекта управления.

Изложение материала исследования, полученных научных результатов. Наиболее простой моделью электромеханических систем с упругими элементами является модель в виде двух массовой электромеханической системы. В этом случае вся трансмиссия передачи момента от приводного двигателя к рабочему механизму представляется в виде двух сосредоточенных масс с моментами инерции двигателя J_d и рабочего механизма J_m , связанных упругим валом с жесткостью C . Приводной двигатель с моментом инерции J_d развивает момент двигателя M_d , а на рабочий механизм с моментом инерции J_m действует момент сопротивления M_c . Такой модели двухмассовой электромеханической системы соответствует система следующих уравнений:

$$\begin{aligned}
 J_m \frac{d\omega_m}{dt} &= M_y + \beta(\omega_d - \omega_m) - M_c, \\
 \frac{dM_y}{dt} &= C(\omega_d - \omega_m), \\
 J_d \frac{d\omega_d}{dt} &= M_d - M_y - \beta(\omega_d - \omega_m).
 \end{aligned}$$

В этих уравнениях: ω_m, ω_o – скорость вращения рабочего механизма и двигателя; J_m, J_o – моменты инерции рабочего механизма и двигателя; M_y – момент упругости; C, β – жесткость и коэффициент внутреннего вязкого трения упругого вала на скручивание.

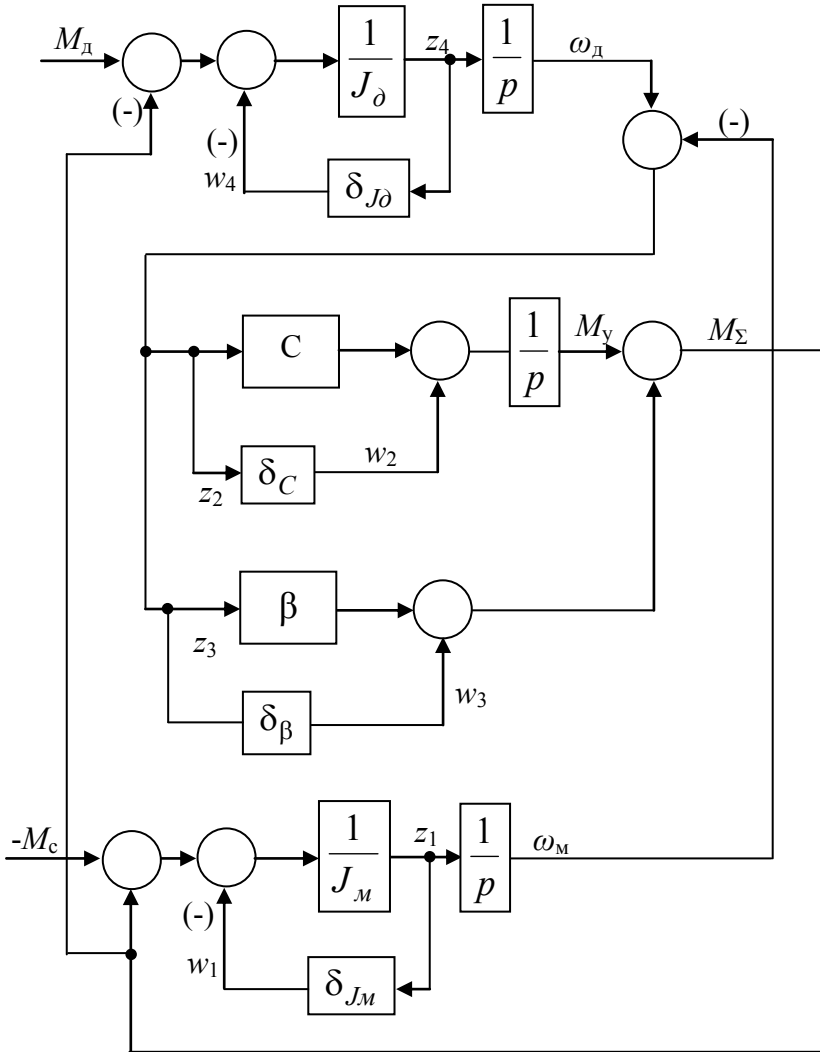


Рис. 1 – Схема двухмассовой электромеханической системы с учетом неопределенностей объекта управления

Введем вектор состояния этой системы, компонентами которого являются скорость вращения механизма ω_m , момент упругости M_y и скорость вращения двигателя ω_o в следующем виде:

$$\vec{x} = [\omega_m, M_y, \omega_o]^T.$$

Введем вектор управления $\vec{u}(t)$, компонентами которого являются момент двигателя M_o и момент сопротивления M_c в следующем виде:

$$\vec{u}(t) = [M_o, M_c]^T.$$

Тогда в уравнении состояния

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = A\vec{x}(t) + B\vec{u}(t),$$

матрицы состояния и управления согласно [2] равны

$$A = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -\frac{\beta}{J_m} & \frac{1}{J_m} & \frac{\beta}{J_m} \\ \hline -C & & C \\ \hline \frac{\beta}{J_o} & -\frac{1}{J_o} & -\frac{\beta}{J_o} \\ \hline \end{array}, \quad B = \begin{array}{|c|c|} \hline & -\frac{1}{J_m} \\ \hline & \\ \hline \frac{1}{J_o} & \\ \hline \end{array}$$

Рассмотрим теперь математическую модель двухмассовой электромеханической системы с учетом неопределенностей задания ее параметров. В процессе работы системы момент инерции рабочего механизма J_m , как правило, изменяется в определенных, часто в достаточно широких, пределах. В ряде механизмов достаточно сильно изменяется и жесткость упругого вала C , связывающего валы рабочего механизма и приводного двигателя [17-20]. В частности, это имеет место при использовании люфтовывбирающих пружин.

Момент инерции приводного двигателя в процессе эксплуатации обычно либо не изменяется вообще, либо изменяется в незначительных пределах. Однако в случае, когда в двухмассовой системе соединение с рабочим механизмом осуществляется с помощью рычагов, приведенный момент инерции двигателя, включающего рычаги также изменяется в широких пределах [21-26]. Поэтому будем рассматривать также и изменяющийся приведенный момент инерции двигателя.

Представим фактические значения моментов инерции приводного двигателя \bar{J}_o , рабочего механизма \bar{J}_m и жесткости упругой передачи от вала двигателя к валу рабочего органа \bar{C} в виде суммы номинальных значений параметров J_o , J_m , C и изменения этих значений параметров δ_{J_o} , δ_{J_m} , δ_C в следующем виде:

$$\begin{aligned}\bar{J}_o &= J_o + \delta_{J_o}, \\ \bar{J}_M &= J_M + \delta_{J_M}, \\ \bar{C} &= C + \delta_C.\end{aligned}$$

Запишем уравнение состояния, вектор цели $\bar{z}(t)$ и вектор измеряемого выхода $\bar{y}(t)$ в стандартной форме, принятой в H^∞ теории робастного управления

$$\begin{aligned}\frac{d\bar{x}}{dt} &= A\bar{x}(t) + B_1\bar{w}(t) + B_2\bar{u}(t), \\ \bar{z}(t) &= C_1\bar{x}(t) + D_{11}\bar{w}(t) + D_{12}\bar{u}(t), \\ \bar{y}(t) &= C_2\bar{x}(t) + D_{21}\bar{w}(t) + D_{22}\bar{u}(t).\end{aligned}$$

где $\bar{w}(t)$ – вектор внешних возмущений. Введем, согласно рис. 1, векторы возмущений $\bar{w}(t)$ и цели $\bar{z}(t)$ в следующем виде

$$\begin{aligned}\bar{w} &= [w_1, w_2, w_3, w_4]^T, \\ \bar{z} &= [z_1, z_2, z_3, z_4]^T.\end{aligned}$$

Тогда, согласно рис. 1, $\bar{w} = \Delta \bar{z}$, где матрица параметрических возмущений Δ имеет диагональный вид

$$\Delta = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \delta_{J_M} & & & \\ \hline & \delta_C & & \\ \hline & & \delta_\beta & \\ \hline & & & \delta_{J_o} \\ \hline \end{array}.$$

Задача синтеза робастного управления заключается в минимизации чувствительности системы к параметрическим возмущениям [26-29]. При синтезе робастного управления будем считать вектор $\bar{w}(t)$ – вектор внешних возмущений независимым, а задачей синтеза робастного управления является минимизация нормы вектора цели $\bar{z}(t)$. При таком подходе с помощью робастного управления фактически минимизируется чувствительность системы к параметрическим возмущениям.

Тогда соответствующие матрицы в стандартном описании системы примут следующий вид:

$$A = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -\frac{\beta}{J_M} & \frac{1}{J_M} & \frac{\beta}{J_M} \\ \hline -C & & C \\ \hline \frac{\beta}{J_o} & -\frac{1}{J_o} & -\frac{\beta}{J_o} \\ \hline \end{array}, \quad B_1 = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline -\frac{1}{J_M} & & \frac{1}{J_M} & \\ \hline & 1 & & \\ \hline & & -\frac{1}{J_o} & -\frac{1}{J_o} \\ \hline \end{array}, \quad B_2 = \begin{array}{|c|c|} \hline & -\frac{1}{J_M} \\ \hline \frac{1}{J_o} & \\ \hline \end{array},$$

$$\begin{aligned}
D_{11} &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{J_M} & & \frac{1}{J_M} & \\ & & & \\ & & & \\ & & -\frac{1}{J_o} & -\frac{1}{J_o} \end{bmatrix}, \quad D_{12} = \begin{bmatrix} & -\frac{1}{J_M} & & \\ & & & \\ & & & \\ \frac{1}{J_o} & & & \end{bmatrix}, \quad C_1 = \begin{bmatrix} -\frac{\beta}{J_M} & \frac{1}{J_M} & \frac{\beta}{J_M} \\ -1 & & 1 \\ -1 & & 1 \\ \frac{\beta}{J_o} & -\frac{1}{J_o} & -\frac{\beta}{J_o} \end{bmatrix}, \\
C_2 &= \begin{bmatrix} & & & 1 \end{bmatrix}, \quad D_{21} = \begin{bmatrix} & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \end{bmatrix}, \quad D_{22} = \begin{bmatrix} & \\ & \end{bmatrix}.
\end{aligned}$$

Представим контур прямого управления моментом двигателя M_o в виде аperiodического звена первого порядка в виде следующего уравнения состояния

$$\frac{dM_o}{dt} = -\frac{1}{T_o} M_o + \frac{K_o}{T_o} M_{\text{ж}}.$$

Для реализации астатизма по управлению, включим в модель объекта управления интегратор с переменной состояния I , на вход которого подадим ошибку системы между заданным значением скорости вращения и скорости вращения рабочего органа.

$$\frac{dI}{dt} = \omega_3 - \omega_o.$$

Минимизация нормы вектора цели $\vec{z}(t)$ в таком виде приводит к бесконечным управлениям, так как вектор цели не содержат управления и переменных состояния, которые необходимо ограничивать. Потому введем в вектор контролируемых переменных Z управление – задание по моменту двигателя M_3 , ошибку регулирования $\varepsilon = \omega_3 - \omega_o$, а также выходную переменную интегратора I , так, что вектор Z примет следующий вид

$$Z = [Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, \varepsilon, I, M_3]^T.$$

В вектор внешних воздействий $\vec{w}(t)$ введем также заданное значение скорости ω_3 , момент сопротивления M_c , а также помеху измерения скорости f_ω и фиктивную помеху измерения выхода интегратора f_z , так что вектор внешних воздействий w примет следующий вид

$$w = [w_1, w_2, w_3, w_4, \omega_3, M_c, f_\omega, f_z]^T.$$

Тогда соответствующие матрицы в стандартном описании системы примут следующий вид:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{\beta}{J_M} & \frac{1}{J_M} & \frac{\beta}{J_M} & & \\ -C & & C & & \\ \frac{\beta}{J_\partial} & -\frac{1}{J_\partial} & -\frac{\beta}{J_\partial} & \frac{1}{J_\partial} & \\ & & & -\frac{1}{T_\partial} & \\ & & & & -1 & & \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{J_M} & & \frac{1}{J_M} & & & -\frac{1}{J_M} & & \\ & 1 & & & & & & \\ & & & -\frac{1}{J_\partial} & & & & \\ & & & & & & & 1 & \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} \\ \\ \\ \frac{K_d}{T_d} \\ \\ \end{bmatrix}, \quad C_1 = \begin{bmatrix} -\frac{\beta}{J_M} & \frac{1}{J_M} & \frac{\beta}{J_M} & & \\ -1 & & 1 & & \\ -1 & & 1 & & \\ \frac{\beta}{J_\partial} & -\frac{1}{J_\partial} & -\frac{\beta}{J_\partial} & & \\ -1 & & & & \\ & & & & 1 & \end{bmatrix}, \quad C_2 = \begin{bmatrix} & & 1 & & \end{bmatrix}$$

$$D_{11} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{J_M} & & \frac{1}{J_M} & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & -\frac{1}{J_\partial} & & & & \\ & & & & 1 & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \end{bmatrix}, \quad D_{12} = \begin{bmatrix} \\ \\ \\ \\ \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$D_{21} = \begin{bmatrix} & & & & & 1 & & \end{bmatrix}, \quad D_{22} = \begin{bmatrix} \end{bmatrix}$$

Заметим, что для получения приемлемых показателей качества в вектор цели необходимо также вводить моменты упругости и скорости вращения двигателя и рабочего механизма.

Результаты моделирования на ЭВМ. В качестве примера приведем переходные процессы робастной системы управления двухмассовой электромеханической системой. В рассматриваемой системе наиболее сильно изменяется момент инерции рабочего механизма и при этом система должна обеспечивать заданные показатели. При моделировании учтено наличие нелинейностей в объекте управления.

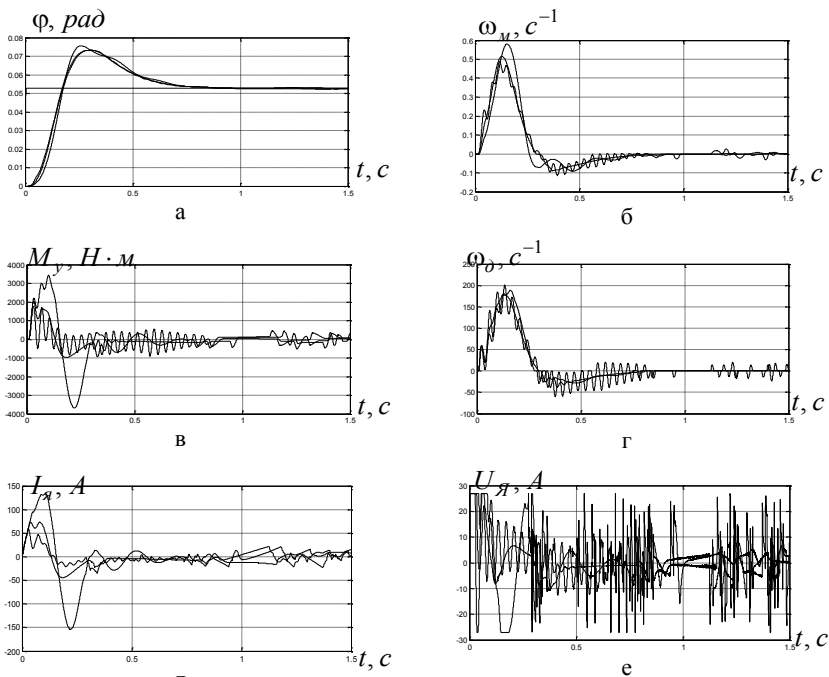


Рис. 2.– Переходные процессы при отработке малых углов

На рис. 2 показаны переходные процессы: а– угла поворота рабочего механизма $\varphi(t)$; б– скорости вращения поворота рабочего механизма $\omega_M(t)$; в –момента упругости $M_y(t)$; г –скорости двигателя $\omega_\theta(t)$; д –тока двигателя $I_\text{я}(t)$; е– напряжения на якорной цепи двигателя $U_\text{я}(t)$ при отработке малых углов. Как видно из рисунка, синтезированная система робастного управления достаточно хорошо парирует изменение величины момента инерции рабочего механизма в широких пределах, и следовательно, имеет низкую чувствительность к изменению параметров модели объекта управления.

Выводы из проведенного исследования, перспективы этого направления. В статье разработана математическая модель двухмассовой электро-механической системы с учетом неопределенности объекта управления. Для синтеза робастного управления двухмассовой электромеханической системы обоснован выбор вектора цели робастного управления, включающий вектор неопределенностей параметров объекта управления, ошибку регулирования, переменные состояния объекта управления и само управление. Выполнено исследование динамических характеристик робастного управления двухмас-

совой электромеханической системы с учетом неопределенности объекта управления. В результате проведенных исследований динамических характеристик синтезированных систем робастного управления показано, что эти системы имеет существенно меньшую чувствительность к изменению параметров моделей объектов управления и внешних воздействий по сравнению с аналогичными системами оптимального управления. В частности, применение оптимальных систем управления, синтезированных для одного – центрального объекта управления, привело к потере устойчивости системы при изменении момента инерции рабочего механизма в заданных пределах. Применение робастных регуляторов позволило сохранить устойчивость системы с одним робастным центральным регулятором во всем диапазоне изменения момента инерции рабочего механизма при выполнении требований, предъявляемых к системе.

Список литературы: 1. *Gu D.-W.* Robust Control Design with MATLAB / *D.-W. Gu, P.Hr. Petkov, M.M. Konstantinov.* – Springer, 2005. – 389 p. 2. *Hoyle D.* An H_∞ approach to two-degree-of-freedom design / *D. Hoyle, R. Hyde, D.J.N. Limebeer* // In Proceedings of the 30 th IEEE Conference on Decision and Control. – 1991. – Pp. 1581-1585. 3. *Limebeer D.J.N.* On the design of robust two degree of freedom controllers / *D.J.N. Limebeer, E.M. Kasenally, J.D. Perkins* // Automatica – 1993. – №29. – Pp. 157 – 163. 4. *Diamond P.* Anisotropy – based performance analysis of linear discrete time invariant control systems / *P. Diamond, I.G. Vladimirov, A.P. Kurdjukov, A.V. Semyonov* // Int. J. Control. – 2001. – V. 74. – Pp. 28 – 42. 5. *Vladimirov I.G.* State-space solution to anisotropy-based stochastic H_∞ – optimization problem / *I.G. Vladimirov, A.R. Kurdjukov, A.V. Semyonov* // Proc. 13th IFAC World Congress. – San-Francisco (USA). – 1996. – Pp. 427 – 432. 6. *Semyonov A.V.* Stochastic approach to H_∞ –optimization / *A.V. Semyonov, I.G. Vladimirov, A.P. Kurdjukov* // Proc. 33rd IEEE Conf. on Decision and Control. – Florida (USA). – 1994. – Pp. 2249 – 2250. 7. *Geromel C.* Convex approach to the mixed H_2 / H_∞ control problem for discrete time uncertain systems / *C. Geromel, P.L.D. Peres, S.R. Souza* // SIAM J. Control and Optimiation. – 1995. – V. 33. – Pp. 1816 – 1833. 8. *Green M.* Linear robust control / *M. Green, D.J.N. Limebeer.* – Englewood Cliffs. New Jersey: Prentice Hall, 1995. – 538 p. 9. *Gu D.-W.* State-space formulae for discrete – time H_∞ – optimization / *D.-W. Gu, M.C. Tsai, S.D. O'Young* // Int. J. Control. – 1989. – V. 49. – Pp. 1683 – 1723. 10. *Iglesias P.A.* State-space approach to discrete – time H_∞ – control / *P.A. Iglesias, K. Glover* // Int. J. Control. – 1991. – V. 54. – Pp. 1031 – 1073. 11. *Qu Z.* Robust Control of Nonlinear Uncertain Systems without Generalized Matching Conditions / *Z. Qu* // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1995. – Vol. 40. – Pp. 1453-1460. 12. *Safonov M.G.* H_∞ Control Synthesis for a Large Space Structure / *M.G. Safonov, R.Y. Chiang, H. Flashner* // AIAAJ. Guidance, Control and Dynamics. – 1991. - №3. – Pp. 513 – 520. 13. *Maolin Jin.* Robust Compliant Motion Control of Robot With Nonlinear Friction Using Time – delay Estimation / *Jin Maolin, Sang Hoon Kang, Pyung Hun Chang* // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – Vol. 55. – № 1. – P. 258-269. 14. *Pedersen M.* Control of Nonlinear Plants /Moller-Pedersen, Martin Pagh Petersen / *M. Pedersen* – Technical University of Denmark, 1995. – 1192 p. 15. *Khargonekar P.* H_∞ optimal control with state feedback / *P. Khargonekar, I. Petersen, M. Rotea* // IEEE Trans. Automat. Contr. – 1988. – Pp. 783 – 786. 16. *Lennartson A.K.* Christiansson. H_∞ Control for Periodic Mixed Continuous – Time and Discrete – Time Systems. Mathematical Theory of Networks and System. A. Beghi, L. Finesso, G. Picci editors. Proceedings of the MTNS – 98 Symposium held in Padova, Italy, july, 1998, II poligrafo. – P. 285 – 288. 17. *Lyubchyk L.M.* Robust disturbance decoupling in multivariable systems via the unknown-input observers / *L.M. Lyubchyk, P.C. Mueller* // Proceedings of 16 – th IFAC World Congress, Prague. – 2005. – 6 p. 18. *Coollins E.G.* A Delta Opera-

tor Approach to Discrete-Time H_∞ Control / *E.G. Coollins, J. Song* // International Journal of Control. – 1999. – Vol. 72. – №4. – Pp. 315-320. **19. Iglesias P.A.** State-space solution of the discrete – time minimum entropy control problem via separation / *P.A. Iglesias, D. Mustafa* // IEEE Trans. on Automat. Control. – 1993. – V. 38. – P. 1525 – 1530. **20. Kwakernaak H.** Linear optimal control systems / *H. Kwakernaak, R. Sivan*. – New York: Wiley, 1972. – 608 p. **21. Luenberger D.G.** Optimization by Vector Space Methods / *D.G. Luenberger*. – New York: Wiley, 1969. – 344 p. **22. Whittle P.** Risk Sensitive Optimal Control / *P. Whittle*. – New York: Wiley, 1990. – 256 p. **23. Xie L.** Robust H_∞ control for linear time-invariant systems with norm bounded uncertainty in the input matrix / *L. Xie, C.E. Souza* // Systems & Control Letters. – 1990. – V. 14. – Pp. 389 – 396. **23. Xie L.** Robust Hinf control for class of uncertain linear time invariant systems / *L. Xie, C.E. Souza* // IEEE Proc. Ser. D. – 1991. – V. 138. – №5. – Pp. 479 – 483. **24. Amato F., Mattei M., Pironti A.** Robust Stability of Linear, Discrete – Time Systems Subject to Time – Varying, Bounded Rate Parameters. Mathematical Theory of Networks and System. A. Beghi, L. Finesso, G. Picci editors. Proceedings of the MTNS – 98 Symposium held in Padova, – Italy: II poligrafo. – Pp. 29 – 32. **25. Beeler S.C.** Feedback Control Methodologies for Non-linear Systems / *S.C. Beeler, H.T. Tran, H.T. Banks* // IEEE Trans. Aut. Cont – 1984 – Vol. 29. – №4. – P. 317 – 331. **26. Petersen Ian R.** Robust Control Design Using H_∞ Methods / *Ian R. Petersen, Valery A. Ugrinovskii and Andrey V. Savkin*. – Springer-Verlag. London. – Berlin. – Heidelberg, 2000. – 451 p. **27. Zhou Kemin.** Robust and optimal control / *Kemin Zhou, John C. Doyle, Keith Glover*. – Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 2007 – 632 p. **28. Slotine J.-J.** Applied Nonlinear Control / *J.-J. Slotine, W. Li*. – Prentice Hall, 1991. – 461 p. **29. Van der Schaft A.J.** Nonlinear State Space H_∞ - control Theory, in Essay an control: Perspectives in the Theory and Applications / *A.J. Van der Schaft*. – Birkhauser, 1993.

Bibliography (transliterated): **1. Gu D.-W.** Robust Control Design with MATLAB / *D.-W. Gu, P.Hr. Petkov, M.M. Konstantinov*. – Springer, 2005. – 389 p. **2. Hoyle D.** An H_∞ approach to two-degree-of-freedom design / *D. Hoyle, R. Hyde, D.J.N. Limebeer* // In Proceedings of the 30 th IEEE Conference on Decision and Control. – 1991. – Pp. 1581-1585. **3. Limebeer D.J.N.** On the design of robust two degree of freedom controllers / *D.J.N. Limebeer, E.M. Kasenally, J.D. Perkins* // Automatica – 1993. – №29. – Pp. 157 – 163. **4. Diamond P.** Anisotropy – based performance analysis of linear discrete time invariant control systems / *P. Diamond, I.G. Vladimirov, A.P. Kurdjukov, A.V. Semyonov* // Int. J. Control. – 2001. – V. 74. – Pp. 28 – 42. **5. Vladimirov I.G.** State-space solution to anisotropy-based stochastic H_∞ – optimization problem / *I.G. Vladimirov, A.R. Kurdjukov, A.V. Semyonov* // Proc. 13th IFAC World Congress. – San-Francisco (USA). – 1996. – Pp. 427 – 432. **6. Semyonov A.V.** Stochastic approach to H_∞ -optimization / *A.V. Semyonov, I.G. Vladimirov, A.P. Kurdjukov* // Proc. 33rd IEEE Conf. on Decision and Control. – Florida (USA). – 1994. – Pp. 2249 – 2250. **7. Geromel C.** Convex approach to the mixed H_2 / H_∞ control problem for discrete time uncertain systems / *C. Geromel, P.L.D. Peres, S.R. Souza* // SIAM J. Control and Optimiation. – 1995. – V. 33. – Pp. 1816 – 1833. **8. Green M.** Linear robust control / *M. Green, D.J.N. Limebeer*. – Englewood Cliffs. New Jersey: Prentice Hall, 1995. – 538 p. **9. Gu D.-W.** State-space formulae for discrete – time H_∞ – optimization / *D.-W. Gu, M.C. Tsai, S.D. O'Young* // Int. J. Control. – 1989. – V. 49. – Pp. 1683 – 1723. **10. Iglesias P.A.** State-space approach to discrete – time H_∞ – control / *P.A. Iglesias, K. Glover* // Int. J. Control. – 1991. – V. 54. – Pp. 1031 – 1073. **11. Qu Z.** Robust Control of Nonlinear Uncertain Systems without Generalized Matching Conditions / *Z. Qu* // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1995. – Vol. 40. – Pp. 1453-1460. **12. Safonov M.G.** H_∞ Control Synthesis for a Large Space Structure / *M.G. Safonov, R.Y. Chiang, H. Flashner* // AIAAJ. Guidance, Control and Dynamics. – 1991. – №3. – Pp. 513 – 520. **13. Maolin Jin.** Robust Compliant Motion Control of Robot With Nonlinear Friction Using Time – delay Estimation / *Jin Maolin, Sang Hoon Kang, Pyung Hun Chang* // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – Vol. 55. – № 1. – P. 258-269. **14. Pedersen M.** Control of Nonlinear Plants / *Moller-Pedersen, Martin Pagh Petersen / M. Pedersen* – Technical University of Denmark, 1995. – 1192 p. **15. Khargonekar P.** H_∞ optimal control with state feedback / *P. Khargonekar, I. Petersen, M. Rotea* // IEEE Trans. Automat. Contr. – 1988. – Pp. 783 – 786. **16. Lennartson A.K.** Christiansson. H_∞ Control

for Periodic Mixed Continuous – Time and Discrete – Time Systems. Mathematical Theory of Networks and System. A. Beghi, L. Finesso, G. Picci editors. Proceedings of the MTNS – 98 Symposium held in Padova, Italy, July, 1998, II poligrafo. – P. 285 – 288. **17.** *Lyubchuk L.M.* Robust disturbance decoupling in multivariable systems via the unknown-input observers / *L.M. Lyubchuk, P.C. Mueller* // Proceedings of 16 – th IFAC World Congress, Prague. – 2005. – 6 p. **18.** *Coollins E.G.* A Delta Operator Approach to Discrete-Time H_∞ Control / *E.G. Coollins, J. Song* // International Journal of Control. – 1999. – Vol. 72. – №4. – Pp. 315-320. **19.** *Iglesias P.A.* State-space solution of the discrete – time minimum entropy control problem via separation / *P.A. Iglesias, D. Mustafa* // IEEE Trans. on Automat. Control. – 1993. – V. 38. – P. 1525 – 1530. **20.** *Kwakernaak H.* Linear optimal control systems / *H. Kwakernaak, R. Sivan*. – New York: Wiley, 1972. – 608 p. **21.** *Luenberger D.G.* Optimization by Vector Space Methods / *D.G. Luenberger*. – New York: Wiley, 1969. – 344 p. **22.** *Whittle P.* Risk Sensitive Optimal Control / *P. Whittle*. – New York: Wiley, 1990. – 256 p. **23.** *Xie L.* Robust H_∞ control for linear time-invariant systems with norm bounded uncertainty in the input matrix / *L. Xie, C.E. Souza* // Systems & Control Letters. – 1990. – V. 14. – Pp. 389 – 396. **23.** *Xie L.* Robust Hinf control for class of uncertain linear time invariant systems / *L. Xie, C.E. Souza* // IEEE Proc. Ser. D. – 1991. – V. 138. – №5. – Pp. 479 – 483. **24.** *Amato F., Mattei M., Pironti A.* Robust Stability of Linear, Discrete – Time Systems Subject to Time – Varying, Bounded Rate Parameters. Mathematical Theory of Networks and System. A. Beghi, L. Finesso, G. Picci editors. Proceedings of the MTNS – 98 Symposium held in Padova, – Italy: II poligrafo. – Pp. 29 – 32. **25.** *Beeler S.C.* Feedback Control Methodologies for Non-linear Systems / *S.C. Beeler, H.T. Tran, H.T. Banks* // IEEE Trans. Aut. Cont – 1984 – Vol. 29. – №4. – P. 317 – 331. **26.** *Petersen Ian R.* Robust Control Design Using H_∞ Methods / *Ian R. Petersen, Valery A. Ugrinovskii and Andrey V. Savkin*. – Springer-Verlag. London. – Berlin. – Heidelberg, 2000. – 451 p. **27.** *Zhou Kemin.* Robust and optimal control / *Kemin Zhou, John C. Doyle, Keith Glover*. – Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 2007 – 632 p. **28.** *Slotine J.-J.* Applied Nonlinear Control / *J.-J. Slotine, W. Li*. – Prentice Hall, 1991. – 461 p. **29.** *Van der Schaft A.J.* Nonlinear State Space H_∞ - control Theory, in Essay an control: Perspectives in the Theory and Applications / *A.J. Van der Schaft*. – Birhauser, 1993.

Почмуна (received) 25.02.14.

М.М. РЕЗИНКИНА, д.т.н., в.н.с. ДУ «ІТІМ НАН України», г. Харьков

О.Л. РЕЗИНКИН, д.т.н., зав. каф. НТУ «ХПИ»

Е.Е. СВЕТЛИЧНАЯ, аспирант НТУ «ХПИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОРИЕНТИРОВКЕ МОЛНИИ НА НАЗЕМНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Описана модель электрофизических процессов при движении лидерного канала молнии на последнем этапе его продвижения к земле с учетом возможности возникновения встречной искры от наземных объектов.

Ключевые слова: молния, лидерный канал, пробой, математическое моделирование.

Введение. Экспериментальные исследования процессов, связанных с продвижением лидерного канала молнии к земле и “выбором” места удара, представляют существенные трудности. Известны эксперименты по искусственному инициированию молний путем запуска в грозовое облако ракеты с заземленным токопроводящим тросом [1]. Однако параметры инициируемых в ходе данных экспериментов молний отличаются от естественных нисходящих молний [2, с. 150]. Подобные эксперименты не могут быть использованы для определения вероятного места удара, поскольку путь разряда молнии определяется локализацией троса, подсоединенного к ракете.

В настоящее время широкое распространение получило физическое и математическое моделирование процесса образования и развития канала молнии. Физическое моделирование, связанное с исследованием развития пробоя в длинных воздушных промежутках, наталкивается на ряд трудностей технического характера и не позволяет в полной мере отразить все процессы при продвижении молнии к наземным объектам. Поскольку электрофизические процессы при различной длине высоковольтной искры существенно отличаются, применение принципа масштабирования в данном случае не вполне корректно. Такая ситуация привела к появлению большого числа математических моделей, описывающих процессы удара молнии в наземные объекты [3,4]. Упрощенные модели - так называемый электрогеометрический метод и родственный ему Rolling Sphere Model - положены в основу нормирования зон защиты молниеотводов, например в США [5].

В то же время исследований, связанных с физическим и математическим моделированием восходящих разрядов от объектов на земле, по-прежнему недостаточно. Как показано в ряде публикаций [2,6,7], каналы разрядов, развивающихся от заземленных объектов в условиях грозовой обстановки, играют существенную роль при ориентировке лидерного канала молнии на наземные объекты. Так, во Франции действует нормативный документ [8],

предусматривающий испытания так называемых активных молниеотводов, принцип действия которых предположительно основан на генерировании встречных лидеров. Подобный стандарт введен и в Испании. Однако оговоренные в этих документах испытания не позволяют в полной мере учесть электрофизические процессы, сопровождающие возникновение и продвижение восходящих лидеров, и оценить отличия защитных свойств различных молниеотводов в условиях грозовой обстановки.

Данная статья посвящена описанию модели электрофизических процессов при продвижении лидерного канала молнии к земле с учетом возможности развития встречных искровых разрядов от наземных объектов.

Экспериментальные данные о лидерном канале молнии, используемые при определении вероятности поражения исследуемой зоны. Существующие нормативные документы [9, 10] предусматривают определение вероятности поражения объектов молнией. Однако подходы к оценке риска поражения молнией объекта, описанные, например в [10], являются упрощенными и не позволяют учитывать различие вероятности прорыва на объекты молний, лидеры которых несут к земле различные потенциалы.

Согласно существующим данным, около 90 % разрядов молний, развивающихся от облака к земле, имеют отрицательную полярность (см. например [11, с. 5]). Экспериментальные исследования показывают, что напряженность электрического поля (ЭП), необходимая для развития лидера отрицательной полярности, составляет около $E_{st-} \sim 10^6$ V/m, положительной - $E_{st+} \sim 0.5 \cdot 10^6$ V/m (см. например [6, с. 91]), условие начала электрического пробоя в воздухе при нормальных условиях – достижение напряженности ЭП $E_c \sim 3 \cdot 10^6$ V/m (см. например [12, с. 48]). Согласно [6, с. 139], из энергетических соображений, лидерный канал не может возникнуть, если превышение потенциала его головки над потенциалом внешнего ЭП в месте ее нахождения меньше, чем $U_c \sim 300 - 400$ kV.

На основе анализа экспериментов по пробую длинных воздушных промежутков авторами [13, с. 83] делается вывод, что как для отрицательных, так и для положительных лидеров высота, с которой происходит их ориентировка на заземленные объекты, примерно равна длине стримерной зоны, поскольку направление канала лидера обуславливается теми ветвями стримерной зоны, которые раньше соприкоснулись с заземленными участками. Используем тот же подход применительно к разряду молнии для построения алгоритма модели ориентировки ее лидерного канала на наземные объекты с учетом возможности развития от них встречного лидера. Будем полагать, что процесс ориентировки нисходящего лидерного канала молнии происходит, когда его стримерная зона касается одного из заземленных объектов или участка земли. При этом начинается так называемая сквозная фаза развития разряда. При касании стримерной зоны поверхности земли в этой зоне достигается напряженность ЭП E_{st-} [13, с. 74] и, поскольку выполняется условие $E_{st+} < E_{st-}$, становится возможным развитие встречных положительных лидеров. Таким образом, если условия возникновения разряда от заземленного

объекта выполнены, и напряженность ЭП в некоторой окрестности объекта превышает E_c , то от данного объекта будет развиваться встречный восходящий разряд по направлению к нисходящему лидеру молнии. Из аналитического решения распределения ЭП для проводящего шара в однородном поле известно, что на его поверхности напряженность увеличивается до 3-х раз. Поэтому, можно полагать, что при касании стримерной зоной отдельно расположенных стержневых объектов типа молниеотводов условия возникновения встречных лидеров будут заведомо достигаться.

Рассмотрим, в чем состоит отличие распространения лидерного канала молнии до наступления сквозной фазы и в сквозной фазе. Согласно экспериментальным данным, скорость лидера в сквозной фазе существенно возрастает: от $(2 - 5) \cdot 10^4$ м/с в момент соприкосновения стримерной зоны с заземленным участком до 10^6 м/с (см. например [7, с. 239]). Там же приведено соотношение, связывающее ток лидера i_L и его скорость v_L :

$$v_L = k_v \cdot i_L^{0.5},$$

где $k_v = 4 \cdot 10^4$ м/(с·А^{0.5}).

Одним из подтверждений взаимосвязи тока лидера и его скорости является наблюдаемое в экспериментах существенное замедление лидерного канала, скорость движения которого в сквозной фазе оставалась такой же, как в начальной – порядка 10^4 м/с, если в разрядную цепь подключалось сопротивление 10^6 Ом и более [7, с. 239].

В сквозной фазе наблюдается резкое (на порядок и более) увеличение тока в канале пробоя [12, с. 56]. Согласно [12, с. 101], в сквозной фазе в дополнение к току смещения:

$$i_{LC} = C_L \cdot \phi_L \cdot v_L, \quad (1)$$

где C_L , ϕ_L - погонная емкость и потенциал лидерной головки соответственно

возникает также ток переноса, вызванный поступлением стримерных головок, и ток проводимости по стримерам, пересекающим разрядный промежуток между каналом лидера и заземленной областью. В [12, с. 50] приводятся следующие экспериментальные данные: за 25 мкс развития лидерного канала в сквозной фазе было зафиксировано порядка $2.5 \cdot 10^5$ стримерных головок, средний заряд каждой из которых составлял порядка $6 \cdot 10^{-10}$ С, причем, скорость движения стримеров могла превышать 10^7 м/с, длина стримеров L_S примерно равна: $L_S \sim U_m/E_{cr}$ (где U_m - потенциал лидерного канала молнии). Следует учитывать, что ток проводимости стримеров пренебрежимо мал из-за их чрезвычайно высокого сопротивления [12, с. 102]: погонная проводимость стримера в холодном воздухе имеет порядок 10^{-10} С·см [13, с. 70].

Таким образом, можно полагать, что ток лидера в сквозной фазе определяется током переноса стримерных головок, а значит, прямо пропорционален скорости стримеров [12, с. 102]:

$$i_{TH} = C_L \cdot \phi_L \cdot v_S, \quad (2)$$

где C_L - эквивалентная погонная емкость лидера в сквозной фазе; v_2 - скорость стримеров.

Величина C_L может быть рассчитана по значению потенциала на головке канала лидера длиной L_L и радиусом r_L в предположении, что заряд равномерно распределен вдоль его оси (см. например [12, с. 155]):

$$C_L = (4\pi\epsilon_0\epsilon) / \ln(L_L / r_L) \quad (3)$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость газа, в котором происходит разряд; $\epsilon_0=0.885 \cdot 10^{-11}$ F/m.

По оценкам авторов [7, с. 102] радиус стримерной головки составляет порядка 1 mm (при длинах стримеров свыше 1 m [7, с. 171]), такое же значение согласно [7, с. 253] имеет “термический” радиус лидера; скорость стримера v_S равна $10^6 - 10^7$ m/s [7, с. 104] и не может быть меньше 10^5 m/s [7, с. 174]. Согласно [12, с. 49], r_L изменятся в процессе роста лидера от 0.1 mm до 2 mm. Тогда из (3) получим, что эквивалентная погонная емкость лидера в сквозной фазе практически равна погонной емкости лидера в начальной фазе и составляет порядка 10 – 30 pF/m.

Из экспериментальных исследований известно, что скорость стримера v_S примерно на порядок превышает скорость лидера (см. например [7, с. 267]). Из сопоставления (1) и (2) видно, что ток в сквозной фазе возрастает по сравнению с током в предыдущих фазах развития лидера примерно как отношение скорости стримера к скорости лидера, т.е. на порядок, что наблюдается в эксперименте [12, с. 103].

Статистическое моделирование “выбора” молнией места удара с учетом развития восходящих лидеров от заземленных объектов. Для того чтобы учесть статистический разброс величины тока молнии, а также зависящих от него уровней ее потенциала и высоты ориентировки на наземные объекты, необходимо провести серию расчетов, учтя все возможные места развития лидерного канала молнии.

Величина максимума тока возвратного удара главной стадии молнии I_m может быть измерена, и поэтому существуют систематизированные экспериментальные данные о распределении вероятностей появления молнии с определенной величиной разрядного тока (см. например [14]).

При моделировании процесса “выбора” лидерным каналом молнии места удара важным параметром является его потенциал U_m . Величина U_m пропорциональна I_m , причем согласно [6, с. 172, 185] между I_m и U_m существует связь: $U_m \approx k_U \cdot I_m \cdot Z$ ($k_U \sim 1.7$, $Z \sim 500$ Ohm). Тогда, полагая, что $l_S = U_m / E_{st}$, получим:

$$l_S \sim 0.8 \cdot I_m,$$

где I_m [kA]; l_S [m].

Подобно тому, как это было сделано в [4], для учета всех возможных вариантов удара молнии в исследуемую территорию (“область на земле”), разобьем ее площадь (S_G) квадратной сеткой с шагом Δ : в результате получим K_G ячеек площадью $S_{Gk} = S_G / K_G = \Delta^2$. Будем полагать, что вероятность поражения

ячейки обратно пропорциональна времени продвижения лидерного канала молнии до соответствующего ей узла. Поскольку молнии могут ударять в “область на земле” с большей площади, находящейся над ней (“область ударов”), для моделирования всех возможных мест старта нисходящих лидеров молнии увеличим S_G на M ячеек, получив в результате K_S ячеек и соответствующих им узлов ($K_S > K_G$). Будем полагать, что вероятность попадания молнии одинакова в пределах k -ой ячейки расчетной сетки и пропорциональна ее площади S_{Gk} .

В [13, с. 66] на основе анализа экспериментальных данных показано, что среднее квадратичное отклонение разброса пробивных напряжений для разрядных промежутков длиной 2 – 30 м мало зависит от их длины и близко к 6 – 7 %. Исходя из этих данных, примем, что разброс времен развития разряда составляет $\varepsilon_S = 7\% / 100\% = 0.07$. Будем полагать, что разряд молнии заданного потенциала U_i из j -ого узла “области ударов” может произойти только в те узлы “области на земле”, длительность продвижения к которым лидерного канала $t_{k,j}^i$ не превышает $(1 + \varepsilon_S)$ от минимального времени продвижения конструирующих лидеров во все ячейки “области на земле” в данном численном эксперименте. Поражение же всех остальных ячеек в данном численном эксперименте будем считать невозможным, и вероятность этого события для данных ячеек полагаем равной нулю. Использование описанной модели позволило рассчитать вероятности места пробоя при приложении к промежутку “высоковольтный стержень – два стержня на заземленной плоскости” импульсов положительной и отрицательной полярности. Данные моделирования и эксперимента [16] совпадают в пределах 5-25 %.

Заключение. Описана статистическая модель для определения вероятности удара молнии в объекты на земле с учетом их высоты и габаритов, а также возможности развития от них встречной искры. Данная модель основана на анализе имеющихся литературных данных о параметрах молний, а также электрофизических процессах при пробое длинных воздушных промежутков.

Список литературы: 1. *Rakov V.A.* // Int. J. of Plasma Environmental Science & Technology. 2010. Vol.4. No.1. P. 80-85. 2. *Cooray V.* Lightning Protection. London: The Institution of Engineering and Technology, 2010. 1036 p. 3. *Петров Н., Петрова Г.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 4. С. 134—137. 4. *Резицкина М.М.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. № 5. С. 1—7. 5. NFPA 780 Standard for the Installation of Lightning Protection Systems, 2004. 108 P. 6. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 319 с. 7. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Искровой разряд. М.: Изд-во МФТИ, 1997. 320 с. 8. French Standard: Protection of structures and open areas against lightning using ESE air terminals. French Standard NF C 17 102, 1995. 65 p. 9. РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. М.: Энергоатомиздат, 1989. 24 с. 10. IEC 62305-2. International standard “Protection against lightning – Part 2: Risk management”. Geneva: IEC, 2010. 84 p. 11. *Uman M.A.* The Art and Science of Lightning Protection. New York: Cambridge University Press, 2008. 240 p. 12. *Базелян Э.М., Ражанский И.М.* Искровой разряд в воздухе. Новосибирск: Наука, 1988. 165 с. 13. *Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И.* Физические и инженерные основы молниезащиты. Ленинград: Гидрометеиздат, 1978. 222 с. 14. IEC 62305-1. International standard “Protection against lightning – Part 1: General principles”. Geneva: IEC, 2010. 67 p. 15. *Cooray V.,*

Rakov V., Theethayi N. J. Electrostatics. 2007. N 65. P. 296–306. **16.** Акопян А.А. // Труды ВЭИ. 1940. Вып. 36. С. 94—159.

Bibliography (transliterated): **1.** Rakov V.A. // Int. J. of Plasma Environmental Science & Technology. 2010. Vol.4. No.1. R. 80-85. **2.** Cooray V. Lightning Protection. London: The Institution of Engineering and Technology, 2010. 1036 p. **3.** Petrov N., Petrova G. // ZhTF. 1999. T. 69. Vyp. **4.** S. 134—137. **4.** Rezinkina M.M. // ZhTF. 2008. T. 78. № 5. S. 1—7. **5.** NFPA 780 Standard for the Installation of Lightning Protection Systems, 2004. 108 p. **6.** Bazeljan Je.M., Rajzer Ju.P. Fizika molnii i molniezashhity. M.: Fizmatlit, 2001. 319 s. **7.** Bazeljan Je.M., Rajzer Ju.P. Iskrovoj razrjad. M.: Iz-dvo MFTI, 1997. 320 s. **8.** French Standard: Protection of structures and open areas against lightning using ESE air terminals. French Standard NF C 17 102, 1995. 65 p. **9.** RD 34.21.122-87. Instrukcija po ustrojstvu molniezashhity zdanij i sooruzhenij. M.: Jenergoatomizdat, 1989. 24 s. **10.** IEC 62305-2. International standard “Protection against lightning – Part 2: Risk management”. Geneva: IEC, 2010. 84 p. **11.** Uman M.A. The Art and Science of Lightning Protection. New York: Cambridge University Press, 2008. 240 p. **12.** Bazeljan Je.M., Razhanskij I.M. Iskrovoj razrjad v vozduhe. Novosibirsk: Nauka, 1988. 165 s. **13.** Bazeljan Je.M., Gorin B.N., Levitov V.I. Fizicheskie i inzhenernye osnovy molniezashhity. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978. 222 s. **14.** IEC 62305-1. International standard “Protection against lightning – Part 1: General principles”. Geneva: IEC, 2010. 67 p. **15.** Cooray V., Rakov V., Theethayi N. J. Electrostatics. 2007. N 65. R. 296–306. **16.** Akopjan A.A. // Trudy VJel. 1940. Vyp. 36. С. 94—159.

Поступила (received) 09.02.2014

С.А. СЕРИКОВ, д-р. техн. наук, доц. ХНАДУ;

А.Н. БОРИСЕНКО, д-р. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;

А.Б. БОГАЕВСКИЙ, д-р. техн. наук, проф. ХНАДУ;

Е.Г. ВОВК, магистр ХНАДУ.

МЕТОДИКА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ЧЕРЕЗ ПОРТ USB В МИКРО- КОНТРОЛЛЕРАХ НА БАЗЕ ЯДРА CORTEX M4 В СИСТЕМАХ ИЗМЕРЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

В статье анализируются аппаратные возможности передачи данных через порт USB современных микропроцессорных систем на базе ядра Cortex M4 и предлагается методика разработки измерительных систем с возможностью передачи данных к персональным или специализированным измерительным комплексам.

Ключевые слова: микропроцессор, транспортное машиностроение, микроконтроллер, CORTEX, передача данных.

Постановка проблемы: За последние десятилетия микропроцессорная техника набрала огромные темпы в своем развитии и распространении в системах управления. Для решения сложных задач, объемных вычислений применяются 32-х и 16-разрядные платформы в бортовых системах управления и измерения. Данные устройства характеризуются высоким быстродействием и наличием измерительной, исполнительной и коммуникационной периферии. За последние несколько лет микроконтроллеры на базе ядра Cortex M4 занимают лидирующие позиции в своем классе на рынке радиоэлектронной аппаратуры. Прежде всего, это связано с набором мощной измерительной и вычислительной аппаратуры в одном корпусе, а так же ценовой политики производителей микроконтроллеров на этом базе ядра Cortex M.

Для транспортного машиностроения данные микроконтроллеры позволяют при проектировании и разработке электронных систем управления использовать аппаратные возможности специализированных интегрированных интерфейсов передачи данных CAN2.0 и USB2.0. Выходные порты микроконтроллера толерантны напряжению питания 5В, что дает возможность подключать их без согласования уровней напряжения с логическими уровнями интерфейсов передачи данных транспортных систем и персональных компьютеров. Поэтому, при отладке и разработке универсального блока управления измерительной или управляющей системы огромную роль играют данные интерфейсы, поскольку они позволяют удешевить и повысить надежность, коммуникационность разрабатываемой системы. В связи с указанными преимуществами, актуальными являются вопросы разработки и применения методик управления передачи данных с использованием имеющихся программно-аппаратных интерфейсов.

Цель статьи – ознакомить с методикой передачи данных через интерфейс USB в микроконтроллерах на базе ядра Cortex M4.

Одними из самых распространенных микроконтроллеров на базе ядра Cortex M4 являются микроконтроллеры фирмы STMicroelectronics.

Семейство микроконтроллеров STM32F4 производства компании STMicroelectronics относится к цифровым сигнальным контроллерам и объединяет в себе достоинства классических микроконтроллеров с развитым набором периферии и вычислительную мощь специализированных процессоров. К основным характеристикам можно отнести: поддержку вычислений с плавающей точкой, увеличенный объем ОЗУ (до 192-256 Кб), объем встроенной FLASH памяти до 2 Мбайт, поддержку полнодуплексного интерфейса I²S, потребление менее 1 мкА в спящем режиме с включенным RTC (*Real Time Clock*), увеличенная частота работы АЦП, с ART (адаптивный ускоритель работы с FLASH памятью) частоту работы ядра до 180 МГц.

Микроконтроллеры могут содержать до 17 таймеров: два 16-битных таймера с расширенными функциями, два 32-битных таймера общего назначения, восемь 16-битных таймеров общего назначения, два 16-битных базовых таймера, два сторожевых таймера (независимый и оконного типа) и 24-битный системный таймер. Часть таймеров могут конфигурироваться на работу в мультирежимном формате, позволяющем строить системы из таймеров. Например, можно повысить разрядность счетчика до 48, сконфигурировав последовательно три таймера, или синхронно запускать сразу несколько таймеров.

Таймеры с приведенными функциями имеют широкие функциональные возможности, а именно: комплементарные выводы для управления трехфазных двигателей, поддержка режимов счета в прямом и обратном направлениях, генерация ШИМ, каналы захвата/сравнения сигнала, режим одиночного импульса, поддержка режима прямого доступа к памяти, дополнительные функции безопасности в случае сбоя, поддержка интерфейса энкодера и датчика Холла [1].

Микроконтроллер содержит три аналогово-цифровых преобразователя (АЦП) и два одноканальных цифро-аналоговых преобразователя (ЦАП). АЦП обладает разрешающей способностью 12 бит и очень высокой скоростью преобразования в 2,4 мегасемпла в одиночном режиме и 7,2 мегасемплов - в тройном режиме. Максимальное количество входных аналоговых каналов - 24. Гибкая система настроек встроенного аналогового мультиплексора позволяет задавать любые последовательности преобразования аналоговых каналов (за исключением одновременного преобразования одного канала на нескольких АЦП). Настройки АЦП позволяют производить однократные и циклические измерения. Для проведения преобразования на максимальных скоростях необходимо соблюдать диапазон напряжения питания 2,4...3,6 В. При снижении напряжения до 1,8 (1,7) В скорость преобразования снижается примерно в 2 раза.

Для контроля внутренней температуры микроконтроллера встроен температурный датчик. На его выходе формируется напряжение в зависимости от окружающей температуры. Выход датчика через мультиплексор подключается к АЦП. Используя температурный датчик, можно измерять температуру от -40 до 125°C с точностью $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$.

ЦАП обладает разрешающей способностью 12 бит, преобразование возможно в 8/12-битовом формате с выравниванием этого результата по левому или правому краям. Так как ЦАП содержит два канала, то есть возможность формирования стереосигнала. Доступна функция автоматической генерации шумового сигнала с меняющейся амплитудой или треугольного сигнала.

Контроллер прямого доступа к памяти DMA (*Direct Memory Access*) служит для высокоскоростного перемещения данных между периферией и памятью или памятью и памятью без участия CPU (*Central Processor Unit*). Это разгружает CPU для других операций.

Два DMA-контроллера, которые также могут работать параллельно, сочетают в себе возможности мощного коммутатора шин с независимым FIFO-буфером для оптимизации пропускной способности системы, Первый контроллер предназначен для доступа к памяти, а второй - для доступа к периферии.

В сумме контроллеры DMA имеют 16 потоков (по 8 на каждый контроллер), каждый используется для управления запросами доступа к памяти от одной или более периферии. Каждый поток может иметь суммарно до 8 каналов (запросов) и имеет арбитраж приоритетности. Приоритеты между DMA-потоками задаются программно (четыре уровня приоритета: очень высокий, высокий, средний и низкий) или аппаратно в случае равенства программных приоритетов. Потоки поддерживают работу с кольцевым буфером.

DMA работает со всей наиболее важной периферией: SPI, I²S, I²C, USART, таймеры, DAC, ADC, SDIO, DCMI, Ethernet, USB, и с модулем шифрования[2].

USB (англ. Universal Serial Bus — «универсальная последовательная шина») — последовательный интерфейс передачи данных для среднескоростных и низкоскоростных периферийных устройств в вычислительной технике. Разработка спецификаций для шины USB производится в рамках международной некоммерческой организации USB Implementers Forum (USB-IF), объединяющей разработчиков и производителей оборудования с шиной USB.

Для подключения периферийных устройств к шине USB используется четырёхпроводный кабель. Благодаря встроенным линиям питания USB позволяет подключать периферийные устройства без собственного источника питания (максимальная сила тока, потребляемого устройством по линиям питания шины USB, не должна превышать 500 мА, у USB 3.0 — 900 мА).

Соединительные кабели портов USB физически ориентированы, т.е. имеют различные по виду и конструкции разъемные соединители. Которые исключают возможность ошибочного соединения ведущего и ведомого устройств в системе обмена информацией (соединение «хостов» и

«устройств»). Существует реализация USB устройства без кабеля, со встроенным в корпус законечником «к хосту». Однако имеет место и неразъёмное встраивание кабеля в устройство, как в компьютерную мышь.

В качестве ведущего («хоста») выступает программно-управляемый USB-контроллер, который обеспечивает функциональность всего интерфейса. Соединение контроллера с внешними устройствами происходит через USB-концентратор (другие названия — хаб, разветвитель). В силу того, что USB-шина имеет древовидную топологию, концентратор самого верхнего уровня называется корневым (*root hub*). Он встроен в USB-контроллер и является его неотъемлемой частью.

Стандартизированные обозначения физических контактов USB соединителей следующие:

- 1) VBus – напряжение питания 5В;
- 2) + Data – линия данных;
- 3) - Data – линия данных;
- 4) ID – используется в спецификации USB OTG;
- 5) Ground – «земля».

У микроконтроллеров STM32F4 данный интерфейс может быть сконфигурирован на следующие режимы[3]:

1. OTG(Dual-Role-Device);
2. OTG(Dual-Role-Device with Start of Frame Packet);
3. Host only;
4. Host only with Start of Frame Packet;
5. Device only;
6. Device only with Start of Frame Packet;
7. Device –DP-DM(специализированный режим).

Структурная схема организации аппаратного и программного USB интерфейса микроконтроллеров представлена на рис. 1.

Микроконтроллеры на базе ядра Cortex M4 аппаратно поддерживают несколько спецификаций интерфейса USB 2.0:

1. USB 2.0 full-speed device(скорость передачи данных 0,5—12 Мбит/с);
2. USB 2.0 high-speed(скорость передачи данных 25—480 Мбит/с).

Для работы с каждой спецификацией интерфейса производители микроконтроллеров разработали готовые библиотеки, позволяющие использовать все возможности аппаратной организации.

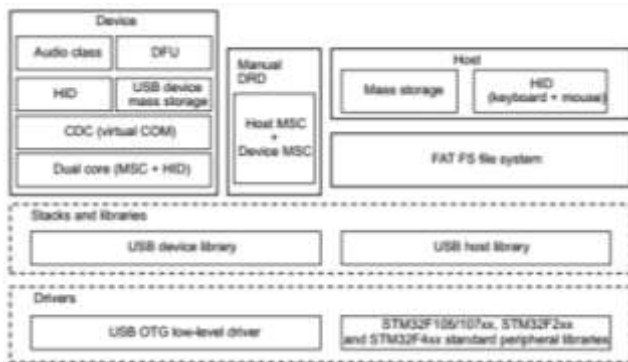


Рис. 1. – Структурная схема организации USB интерфейса микроконтроллеров STM32F4

USB OTG (*On-The-Go*) — расширение спецификации USB2.0, предназначенное для лёгкого соединения периферийных USB-устройств друг с другом без необходимости подключения к ПК. При подключении через USB OTG ранг устройства (ведущий или ведомый) определяется наличием или, соответственно, отсутствием перемычки между контактами ID и Ground в штекере соединительного кабеля. В USB OTG кабеле такая перемычка устанавливается лишь в одном из двух разъёмов.

Данные библиотеки могут настроить микроконтроллер на работу в режиме «хоста», «устройства» или настроить режим OTG. Для быстрой настройки производители включили в стандартные библиотеки с работой интерфейсом USB дополнительные файлы в папках Project и Utilities. В данных каталогах расположены примеры и драйверы готовых устройств.

Назначение USB-устройств определяется кодами классов, которые общаются USB-хосту для загрузки необходимых драйверов. Коды классов позволяют унифицировать работу с однотипными устройствами разных производителей. Устройство может поддерживать один или несколько классов, количество которых определяется количеством конечных точек (USB endpoints). Конечные точки представляют собой логические коды, которые используются «хостом» для организации связи с устройством. Входные и выходные точки конфигурируются под определенные режимы передачи данных.

Для работы в режиме «устройства», в библиотеку включены основные классы, в которых может находиться микроконтроллер. Это, например, классы COM-порта, аудиоустройств, класс устройств взаимодействия с человеком (HID), и т.д.

В режиме работы «хоста», микроконтроллер может поддерживать файловую систему FAT, а так же поддерживать класс HID.

Все указанные режимы устанавливаются и организуются в стандартной библиотеке для работы с USB интерфейсом. Она разделяется на несколько каталогов. Методика выбора режима подключения состоит в правильном подборе и включении в основное тело программы специализированных файлов из библиотеки (см. рис.2.)

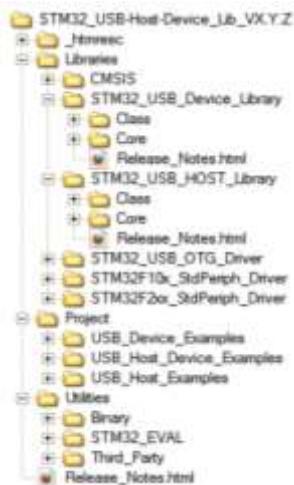


Рис. 2. – Организация библиотеки для работы с интерфейсом USB

Рассматриваемый в настоящей работе подход был практически реализован для организацией связи между различными подсистемами в информационно-управляющей системе транспортного средства.

Выводы: Таким образом, использование современных микроконтроллеров на базе ядра Cortex M4 позволяет создавать мощные вычислительные, управляющие и измерительные системы с широкими коммуникативными возможностями. Рассмотренная методика в сочетании с аппаратной реализацией интерфейса передачи данных USB и современным вычислительным ядром способствуют упрощению разработки объектного программного обеспечения обмена информацией между различными устройствами системы.

Список литературы: 1. Ю, Джозеф. Ю. Ядро CortexM3 компании ARM. Полное руководство / Джозеф Ю; пер. с англ. А. В. Евстифеева. М. : Додэка XXI, 2012. 552 с. : ил. (Мировая электроника). Доп. тит. л. англ. ISBN 9785941202430. 2. STM32F4XXX datasheet (см. <http://www.st.com/>). 3. Reference manual for USB (см. <http://www.st.com/>).

Bibliography (transliterated):1. Ju, Dzhozef. Ju. Jadro CortexM3 kompanii ARM. Polnoe rukovodstvo / Dzhozef Ju; per. s anrl. A. V. Evstifeeva. M. : Dodjeka HHI, 2012. 552 p. : il. (Mirovaja jelektronika). Dop. tit. l. anrl. ISBN 9785941202430. 2. STM32F4XXX datasheet (см. <http://www.st.com/>). 3. Reference manual for USB (см. <http://www.st.com/>).

Поступила (received) 11.04.2014

А.В. САДОВОЙ, д-р техн. наук., проф., ДГТУ, Днепродзержинск
М.В. ЦАБЕНКО, асс., ДГТУ, Днепродзержинск,
Д.А. НАГОРНЫЙ, студент, ДГТУ, Днепродзержинск,

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ "ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ КОМПРЕССОР – ПРИВОДНОЙ ДВИГАТЕЛЬ"

Рассмотрены системы компримирования центробежных компрессоров на основе уточненной модели Мура-Грейтцера с элементами антипомпажной защиты: байпасированием, антипомпажным клапаном. Исследовано влияние нестабильных явлений на работу приводного двигателя.

Ключевые слова: уточненная модель, антипомпажная защита, байпасирование, антимонтажный клапан, приводной двигатель.

Постановка проблемы. Стратегия управления системами компримирования, реализуемая при помощи автоматизированных систем управления электромеханическими позиционерами с целью повышения технико-экономических показателей технологических процессов, имеет большие перспективы. В соответствии с технологией, может возникнуть ситуация, когда потребление сжатого воздуха уменьшается, что создает предпосылки для возникновения помпажа. Такой режим работы компрессора является аварийным и приводит к механическому разрушению компрессора, приводного механизма и технологического оборудования. Для предотвращения помпажа чаще всего используют возврат части сжатого воздуха с выхода компрессора на его вход (байпасирование) или сброс части сжатого воздуха через антипомпажный клапан (АПК). Еще одним эффективным способом защиты от помпажа является управление скоростью приводного механизма. Поэтому работа, посвященная комплексному изучению процессов в системе "центробежный компрессор - приводной двигатель" (ЦК-ПД) является актуальной.

Анализ литературы. Несмотря на широкое распространение математических методов анализа процессов, происходящих в обобщенной динамической системе в целом, в системах управления компрессорами они не нашли широкого применения [1, 2]. Основными допущениями, сделанными Муром и Грейтцером при выводе модели являются: большой коэффициент, усиления прямого канала, использование несжимаемой массового потока в компрессоре, сжимаемый поток в камере и небольшое открытие дроссельной заслонки воздуховода. Другие варианты этой модели рассматривались с допущением, что в компрессоре одномерный несжимаемый проток, изоэнтропической процесс сжатия в камере. Влияние на приводной двигатель не рассматривалось.

Системы, которые рассматриваются в наше время [3, 4, 5], в основном линеаризованы, и приближенно описывают технологический процесс, суще-

ственно усложняя анализ и синтез высокоточных алгоритмов управления системами ЦК-ПД.

Цель. Разработка комплексной математической модели системы турбокомпрессор – приводной двигатель, учитывающей элементы антипомпажной защиты.

Результаты работы. Для исследования процессов, происходящих при байпасировании и сбросе воздуха посредством АПК в электромеханической системе ЦК-ПД, воспользуемся уточненной моделью Мура-Грейтцера [5, 6], которая учитывает квадратичную зависимость расхода от степени сжатия и инерционность потока газа

$$p\Phi = -\frac{\Phi}{T_n} + \frac{K_n}{T_n} \sqrt{\frac{1}{l_c}} \cdot (\Psi_c(\Phi, \omega) - \Psi), \quad p\Psi = \frac{1}{4B^2 l_c} (\Phi - \Phi_c), \quad (1)$$

где p - оператор Лапласа, Φ – расход воздуха через компрессор в относительных единицах, K_n – коэффициент зависящий от свойств газа, T_n – время, за которое газ проходит через компрессор, $\Psi_c(\Phi, \omega)$ – газодинамическая характеристика (ГДХ) компрессора в относительных единицах (2), Ψ – степень сжатия воздушного потока компрессором, l_c - длина компрессора, B – параметр Грейтцера, Φ_c – расход сети в относительных единицах

$$\Psi_c(\Phi, \omega) = \psi_{c0}(\omega) + H(\omega) \left(1 + \frac{3}{2} \left(\frac{\Phi}{W(\omega)} - 1 \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\Phi}{W(\omega)} - 1 \right)^3 \right), \quad (2)$$

$\psi_{c0}(\omega)$ – сжатие при отсутствии расхода, $H(\omega), W(\omega)$ – параметры определяемые по ГДХ, W – полуширина газодинамической характеристики $W = k_w \omega$, H – полувысота газодинамической характеристики $H = k_H \omega^2$, k_H, k_W - конструктивные коэффициенты компрессора, ω – скорость вращения компрессора в относительных единицах.

Рассмотрим динамику системы ЦК-ПД с использованием антипомпажного клапана. Дополним выражение (1) расходом через антипомпажный клапан $\Phi_{АПК}$.

$$p\Phi = -\frac{\Phi}{T_n} + \frac{K_n}{T_n} \sqrt{\frac{1}{l_c}} \cdot (\Psi_c(\Phi) - \Psi), \quad (3)$$

$$p\Psi = \frac{1}{4B^2 l_c} (\Phi - \Phi_c - \Phi_{АПК}).$$

В уравнениях (3) расход через $\Phi_{АПК}$ связан с углом поворота клапана зависимостью

$$\Phi_{АПК} = f(\varphi_{АПК}) \quad (4)$$

где $f(\varphi_{АПК})$ – характеристика открытия антипомпажного клапана.

Угол открытия $\varphi_{АПК}$ определяется управляющим воздействием, которое подается на электропривод клапана, и определяется следующими дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} p\varphi_{АПК} &= \omega_1; \quad p\omega_1 = \frac{R_{Я}}{CT_M} i_1; \\ pi_1 &= -\frac{C}{R_{Я}T_{Я}} \omega_1 - \frac{1}{T_{Я}} i_1 + \frac{1}{R_{Я}T_{Я}} E_1; \\ pE_1 &= -\frac{1}{T_{П}} E_1 + \frac{K_{П}}{T_{П}} u_{y1}, \end{aligned} \quad (5)$$

где ω_1 - скорость электропривода антипомпажного клапана (АПК), $R_{Я}$ - активное сопротивление электропривода АПК, C - конструктивный коэффициент электропривода АПК, T_M - электромеханический коэффициент электропривода АПК, i_1 - ток электропривода АПК, $T_{Я}$ - электромеханическая постоянная времени электропривода АПК, E_1 - противо-ЭДС электропривода АПК, $K_{П}$ - коэффициент усиления тиристорного преобразователя, $T_{П}$ - постоянная времени тиристорного преобразователя, u_{y1} - сигнал управления.

Оптимальное управление электроприводом АПК минимизирует интегральный функционал качества [6,7]

$$I = \int_0^{\infty} \left(V_{14}\eta_1 + V_{24} \frac{d}{dt} \eta_1 + V_{34} \frac{d^2}{dt^2} \eta_1 + V_{44} \frac{d^3}{dt^3} \eta_1 \right) dt, \quad (6)$$

и имеет следующий вид:

$$U = -sign \left[\left(V_{14}\eta_1 + V_{24} \frac{d}{dt} \eta_1 + V_{34} \frac{d^2}{dt^2} \eta_1 + V_{44} \frac{d^3}{dt^3} \eta_1 \right) \eta_1 \right] \quad (7)$$

где V_{i4} – коэффициент функции Ляпунова $V = \sum_{j,i}^4 V_{ij} \eta_j \eta_i$, η_j, η_i – координаты возмущенного движения электропривода, $\eta_i = y_i - y_i^*$, y_i – координаты электропривода в относительных единицах, y_i^* – желаемое значение координат ЭП [8, 9].

Преобразовав систему (5) с учетом (6) и (7) получим систему дифференциальных уравнений возмущенного движения

Преобразовав систему (5) с учетом (6) и (7) получим систему дифференциальных уравнений возмущенного движения

$$\begin{aligned}
 p\eta_1 &= b_{12}\eta_2; \quad p\eta_2 = b_{23}\eta_3; \\
 p\eta_3 &= b_{32}\eta_3 + b_{33}\eta_3 + b_{34}\eta_4; \\
 p\eta_4 &= b_{44}\eta_4 + m_4U,
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\text{где} \quad b_{12} = k_u, b_{23} = \frac{1}{T_M}, b_{32} = b_{33} = -\frac{1}{T_{Я}}, b_{34} = \frac{1}{T_{Я}}, b_{44} = -\frac{1}{T_{П}}, m_4 = \frac{1}{T_{П}}.$$

Что дает возможность создания систем управления.

При нормальной работе системы $\Phi > \Phi^*$ регулятор расхода через АПК находится в насыщении. Когда рабочая точка смещается по ГДХ компрессора к границе помпажа и при достижении нею предельного значения Φ^* – гранично-допустимого расхода при данной скорости вращения, регулятор расхода выходит из насыщения и дает задание на открытие АПК.

Для рассмотрения системы ЦК-ПД с АПК добавим в уравнение (3) уравнение описывающие управление антипомпажным клапаном (5), а в качестве приводного двигателя для центробежного компрессора можно выбрать двигатель постоянного тока. Так как сейчас любой двигатель можно представить как двухканальную систему, состоящую из электрической и механической части. Следовательно, система ЦК-ПД с АПК будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}
 p\omega_2 &= \frac{R_{Я2}}{C_2 T_{M2}} i_2; \\
 pi_2 &= -\frac{C_2}{R_{Я2} T_{Я2}} \omega_2 - \frac{1}{T_{Я2}} i_2 + \frac{1}{R_{Я2} T_{Я2}} E_2; \\
 pE_2 &= -\frac{1}{T_{П2}} E_2 + \frac{K_{П2}}{T_{П2}} u_{y2}, \\
 p\Phi &= -\frac{\Phi}{T_n} + \frac{K_n}{T_n} \sqrt{\frac{1}{l_c}} \cdot (\Psi_c(\Phi) - \Psi); \\
 p\Psi &= \frac{1}{4B^2 l_c} (\Phi - \Phi_c - f(\varphi_{АПК})); \\
 p\varphi_{АПК} &= \omega_1; \\
 p\omega_1 &= \frac{R_{Я}}{C T_M} i_1; \\
 pi_1 &= -\frac{C}{R_{Я} T_{Я}} \omega_1 - \frac{1}{T_{Я}} i_1 + \frac{1}{R_{Я} T_{Я}} E_1; \\
 pE_1 &= -\frac{1}{T_{П}} E_1 + \frac{K_{П}}{T_{П}} u_{y1}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

где ω_2 - скорость электропривода компрессора, R_2 - активное сопротивление электропривода компрессора, C_2 - конструктивный коэффициент электропривода компрессора, T_{M2} - электромеханический коэффициент электропривода компрессора, i_2 - ток электропривода компрессора, $T_{Я2}$ - электромеханическая постоянная времени электропривода компрессора, E_2 - противо-ЭДС электропривода компрессор, K_{II} - коэффициент усиления тиристорного преобразователя питающего электропривод компрессора, T_{II} - постоянная времени тиристорного преобразователя питающего электропривод компрессора.

Перейдем к рассмотрению системы ЦК-ПД с возвратом части сжатого воздуха с выхода компрессора на его вход. Введем новую переменную Φ' - расход компрессора на выходе из диффузора, тогда

$$\Phi_n + \Phi' = \Phi, \quad (10)$$

где Φ_n - расход газа через перепуск.

С учетом, что при перепуске с выхода на вход газ должен охлаждаться [10], а этот процесс длительный, то в первом приближении его можно описать аperiodическим звеном 1-го порядка. Тогда в выражении Φ_n для описания расхода перепуска будет иметь вид

$$\Phi_n = \Phi' \left(\frac{K_b}{T_b p + 1} \right) \quad (11)$$

где K_b, T_b - параметры трубы и холодильника.

Дополним систему (3) уравнениями (10) и (11). В результате получим систему описывающие динамику системы "центробежный компрессор - перепуск":

$$\begin{aligned} p\Psi &= \frac{1}{4B^2 l_c} \left(\Phi - \Phi_c - \Phi' \left(\frac{K_b}{T_b p + 1} \right) \right), \\ \frac{p\Phi'(T_b p + 1) + K_b}{T_b p + 1} &= - \frac{\Phi'(T_b p + 1 + K_b)}{T_n (T_b p + 1)} + \\ &+ \frac{K}{T_n} \sqrt{\frac{1}{l_c} \cdot ((\psi_{C0}(\omega) + H(\omega)) \cdot (S)) - \Psi}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$S = 1 + \frac{3}{2} \left(\frac{p\Phi'(T_b p + 1) + K_b}{(T_b p + 1)W(\omega)} - 1 \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{p\Phi'(T_b p + 1) + K_b}{(T_b p + 1)W(\omega)} - 1 \right)^3,$$

где S -газодинамическая характеристика с учетом влияния перепуска.

Для открытия клапана электромеханического позиционера необходимо задаться расходом Φ_n – который будет зависеть от угла открытия клапана на перепускном кране.

Проведем сравнение работы системы при использовании АПК и перепуска. Будем считать, что расход воздуха через АПК и байпасный клапан имеют одинаковое значение. Тогда, из полученных переходных процессов (рис. 3) видно, что обе системы обрабатывают задание на открытие клапана. Кривая 1 иллюстрирует работу система с АПК, кривая 3 – перепуск. Как видно из графика рабочая точка переходит на ГДХ, которое соответствует ГДХ с меньшей скоростью вращения. Кривая 2 отображает результаты совместной работы система управления с АПК и перепуском. В данной системе $\Phi' > \Phi_{АПК}$, таким образом, получаем, что если снижение параметров сети продолжается и достигает значения Φ^* , то происходит открытие АПК. Очевидно, что линии 1 и 2 не пересекают границу помпажа и циклические колебания не возникают. Еще одна особенность при работе с АПК в том, что ГДХ немного изменяют угол наклона.

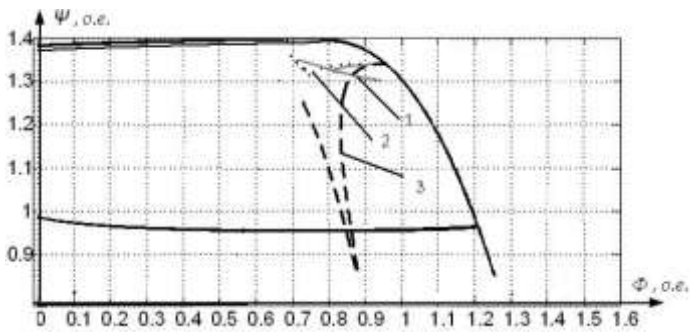


Рис. 1.– Газодинамические характеристики при работе с АПК, перепуском и со смешанным вариантом

Выводы. Как показывают исследования рис. 1 при использовании АПК, рабочая точка системы меняет траекторию движения и наклон ГДХ, тем самым позволяя "лишнему воздуху" выйти через АПК и предотвратить помпаж. При рассмотрении перепуска мы видим, что независимо от изменения параметром потребления рабочая точка остается в пределах заданных значений. Использование смешанной системы защиты позволяет стабилизировать систему, а при дальнейшем уменьшении потребления срабатывает АПК и стравливает "лишний воздух", при этом газодинамическая характеристика системы в целом остается неизменной.

Список литературы: 1. *Aben E.H. Bifurcation analysis of surge and rotating stall in axial flow compressors / E.H. Aben, P.K. Houpt, W.M. Hosny // Journal of Turbomachinery. – 1993. – № 115. – P.*

724-817. **2.** *Gravdahl J.T.* Modeling and Control of surge and rotating stall in compressor / *J.T. Gravdahl* // Journal of Turbomachinery. – 1998. – № 152. – P. 544-615. **3.** *Venturini M.* Development and experimental validation of a compressor dynamic model / *M. Venturini* // Journal of Turbomachinery. – 2005. – № 127. – P. 599-608. **4.** *Arnulfi G.L.* Extensive study on the control of centrifugal compressor surge / *G.L. Arnulfi, F. Blanchini, P. Giannattasio, D. Micheli, P. Pinamonti* // Journal of Power and Energy. – 2006. – № 220. – P. 289-304. **5.** *Dremin I.M.* (2002). Precursors of stall and surge processes in gas turbines revealed by wavelet analysis / *I.M. Dremin, V.I. Furletov, O.V. Ivanov, V.A. Nechitailoa, V.G. Terziev* // Control Engineering Practice. – 2002. – № 10. – P. 599-604. **6.** *Цабенко М.В.* Прогноз возникновения помпажа в центробежном компрессоре / *М.В. Цабенко, Р.С. Волянский, А.В. Садовой, Н.Т. Тищенко* // Тематический выпуск «Проблемы автоматизованного электропривода. Теория и практика» научно-технического журнала «Электроинформ». – 2009. – С. 404-405. **7.** *Цабенко М.В.* Математические модели устранения помпажа в центробежном компрессоре / *М.В. Цабенко, А.В. Садовой, Р.С. Волянский* // Вестник Кременчугского государственного университета имени М.Остроградского. – 2010. – Вып. 4 (63). – С. 167-169. **8.** Математическая теория оптимальных процессов / *Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко*. – М.: Физматгиз, 1961. – 392 с. **9.** *Летов А.М.* Математическая теория процессов управления / *А.М. Летов*. – М.: Наука, 1981. – 256 с. **10.** *Портнов В.В.* Воздухоснабжение промышленного предприятия: учеб. пособие / *В.В. Портнов*. – Воронеж: ГОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет". – 2007. – 228 с. **11.** *Садовой А.В.* Системы оптимального управления прецизионными электроприводами / *А.В. Садовой, Б.В. Сухинин, Ю.В. Сохина*. – К.:ИСИМО, 1996. – 298 с. **12.** Релейные системы оптимального управления электроприводами / *А.В. Садовой, Б.В. Сухинин, Ю.В. Сохина, А.Л. Дерез*. – Днепропетровск: ДГТУ, 2011. – 337 с.

Bibliography (transliterated): **1.** Aben E.H. Bifurcation analysis of surge and rotating stall in axial flow compressors / E.H. Aben, P.K. Houpt, W.M. Hosny // Journal of Turbomachinery. – 1993. – № 115. – P. 724-817. **2.** Gravdahl J.T. Modeling and Control of surge and rotating stall in compressor / J.T. Gravdahl // Journal of Turbomachinery. – 1998. – № 152. – P. 544-615. **3.** Venturini M. Development and experimental validation of a compressor dynamic model / M. Venturini // Journal of Turbomachinery. – 2005. – № 127. – P. 599-608. **4.** Arnulfi G.L. Extensive study on the control of centrifugal compressor surge / G.L. Arnulfi, F. Blanchini, P. Giannattasio, D. Micheli, P. Pinamonti // Journal of Power and Energy. – 2006. – № 220. – P. 289-304. **5.** Dremin I.M. (2002). Precursors of stall and surge processes in gas turbines revealed by wavelet analysis / I.M. Dremin, V.I. Furletov, O.V. Ivanov, V.A. Nechitailoa, V.G. Terziev // Control Engineering Practice. – 2002. – № 10. – P. 599-604. **6.** Cabenko M.V. Prognoz vzniknovenija pompazha v centrobezhnom kompressore / M.V. Cabenko, R.S. Voljanskij, A.V. Sadovoj, N.T. Tishhenko // Tematicheskij vypusk «Problemi avtomatizovanogo jelektroprivoda. Teorija i praktika» nauchno-tehnicheskogo zhurnala «Jelektroinform». – 2009. – S. 404-405. **7.** Cabenko M.V. Matematicheskie modeli ustranjenja pompazha v centrobezhnom kompressore / M.V. Cabenko, A.V. Sadovoj, R.S. Voljanskij // Vestnik Kremenchugskogo gosudarstvennogo universiteta imeni M.Ostrogradskogo. – 2010. – Vyp. 4 (63). – S. 167-169. **8.** Matematicheskaja teorija optimal'nyh processov / L.S. Pontrjagin, V.G. Boltjanskij, R.V. Gamkrelidze, E.F. Mishhenko. – M.: Fizmatgiz, 1961. – 392 s. **9.** Letov A.M. Matematicheskaja teorija processov upravlenija / A.M. Letov. – M.: Nauka, 1981. – 256 s. **10.** Portnov V.V. Воздухоснабжение промышленного предприятия: учеб. пособие / V.V. Portnov. – Voronezh: GOU VPO "Voronezhskij gosudarstvennyj tehnickeskij universitet". – 2007. – 228 s. **11.** Sadovoj A.V. Sistemy optimal'nogo upravlenija precizionnymi jelektroprivodami / A.V. Sadovoj, B.V. Suhinin, Ju.V. Sohina. – K.:ISIMO, 1996. – 298 s. **12.** Relejnye sistemy optimal'nogo upravlenija jelektroprivodami / A.V. Sadovoj, B.V. Suhinin, Ju.V. Sohina, A.L. Derec. – Dneprodzerzhinsk: DGTU, 2011. – 337 s.

Поступила (received) 08.02.2014

П.Ф. ЩАПОВ, докт. техн. наук, НТУ «ХПИ»
Р.П. МИГУЩЕНКО, канд. техн. наук, НТУ «ХПИ»
М.И. ШПАРЁВА, Харьков

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЕЗДЕМОНТАЖНОГО КОНТРОЛЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПЕРВИЧНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Рассмотрена статистическая модель бездемонтажного контроля погрешностей резервированных первичных измерительных преобразователей, позволяющая контролировать постоянство их систематических и случайных составляющих, без отключения преобразователей на поверку. Представлены результаты статистического моделирования, подтверждающих эффективность использования разностной остаточной дисперсии, как статистики контроля погрешностей измерительного преобразования

Ключевые слова: преобразование, контроль, дисперсия, статистическое моделирование.

1. Постановка проблемы. Бездемонтажный контроль точности измерительных преобразователей (без отключения последних на поверку) возможен при использовании специально организованных тестовых воздействий или структурно-алгоритмических методов обнаружения и коррекции погрешностей. При этом входные измеряемые величины должны быть статичны, а в состав средств контроля должны входить образцы или физически реализуемые модели контролируемых параметров или величин. Структурная избыточность тогда дополняется избыточностью информационной, что удорожает контроль, и делает его избирательным по отношению к той или иной части диапазона измеряемых величин. Однако, такие условия контроля точности первичных преобразователей, будут проблематичными, если техническое состояние объекта характеризуется нестационарностью, а измеряемые величины представляют собой случайные переходные процессы.

2. Анализ литературы. В настоящее время для бездемонтажного контроля применяются алгоритмические и структурные модели коррекции погрешностей первичных преобразователей, которые эксплуатируются в ИИС управления [1], в автоматизированных системах контроля [2, 3]. Методы и модели автоматического обнаружения и коррекции погрешностей особенно полно используются и для преобразователей температуры [4, 5]. Следует добавить, что во всех случаях подобного контроля необходимо наличие физически реализуемых образцов или моделей физических величин, обладающих заранее заданными свойствами.

© П.Ф. Щапов, Р.П. Мигущенко, М.И. Шпарёва 2014

3. Цель статьи. Раскрытие возможностей статистического подхода к получению информации об изменении погрешностей первичных преобразователей по изменению вероятностных свойств остаточного шума последних, когда входные величины являются функциями времени.

4. Статистическая модель информационных преобразований. Рассмотрим известную структурную модель пространственного усреднения случайных погрешностей [6], реализованную в виде постоянно резервированной структуры изображенной на рис. 1 и состоящей из двух преобразователей.

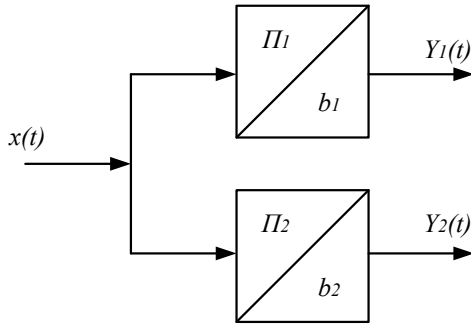


Рис. 1 – Параллельная структура постоянного резервирования

Зададим модель изменений входного сигнала $x(t)$ в виде случайного процесса с линейной нестационарностью среднего значения $\hat{x}(t_i) = A + B \cdot t_i$ и стационарным шумом $\varepsilon_i, i = \overline{1, N}$:

$$x(t_i) = A + B \cdot t_i + \varepsilon_i, \quad (1)$$

где A, B – постоянные коэффициенты, причем:

$$M[\varepsilon_i] = 0, \quad M[\varepsilon_i^2] = \sigma_\varepsilon^2, \quad M[\varepsilon_i \cdot \varepsilon_k] = 0, \quad (2)$$

для всех $i \neq k$, и $\varepsilon_i \sim NORM(0, \sigma_\varepsilon^2)$.

Преобразователи Π_1, Π_2 реализуют линейную (для простоты) функцию измерительного преобразования с чувствительностями δ_1, δ_2 , соответственно, и случайной погрешностью $z_j, j = \overline{1, 2}$. Вероятностные свойства погрешности z_j аналогичны условиям (2), в частности: $M[z_j] = 0; M[z_j^2] = \sigma_z^2$, а выходной сигнал j -того преобразователя – это линейная регрессионная модель вида:

$$Y_j(t_i) = b_j \cdot x(t_i) + z_{ji}. \quad (3)$$

Если во входном сигнале $x(t)$ присутствует динамика ($B \neq 0$), то появляется возможность оценки корреляционных свойств выходных сигналов $y_j(t_i)$ преобразователей Π_1, Π_2 , а, следовательно, и оценки отклонений чувствительностей b_1, b_2 от средней $b_c = 0,5(b_1 + b_2)$. Для этого достаточно использовать случайные отклонения сигналов $y_j(t_i)$, $j = \overline{1,2}$ от среднего арифметического:

$$\bar{y} = (2N)^{-1} \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^N y_{ji}. \quad (4)$$

Тогда статистика контроля примет вид:

$$\Delta = N \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^N (y_j(t_i) - \bar{y})^2. \quad (5)$$

Если пренебрегать, для простоты анализа, аддитивными погрешностями преобразования (это решенная задача для классического пространственного усреднения [6]), то, с учетом выражений (1) и (3), можно определить дисперсию статистики Δ :

$$\sigma_{\Delta}^2 = B^2 \cdot \sigma_t^2 \cdot \sigma_b^2 + B^2 \cdot \sigma_b^2 \cdot m_t + \sigma_{\varepsilon}^2 \sigma_b^2 + \sigma_z^2. \quad (6)$$

В выражении (6) имеем:

σ_t^2, \bar{t} – дисперсия и среднее времени наблюдения сигнала $x(t)$;

m_t – среднее значение времени наблюдения;

$$\sigma_b^2 = \sum_{j=1}^2 (b_j - \bar{b})^2; \quad (7)$$

$$\bar{b} = 0,5 \sum_{j=1}^2 b_j;$$

$$\overline{\sigma_z^2} = \sum_{j=1}^2 \sigma_{z_j}^2 = N^{-1} \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^N z_{ji}. \quad (8)$$

Если учесть дискретизацию времени t_i наблюдения сигнала $x(t_i)$, при равномерных отсчетах $i = \overline{1, N}$, то выражение (6) примет вид статистической модели параметра контроля случайных (дисперсия $\overline{\sigma_z^2}$) и мультипликативных (дисперсия σ_b^2) погрешностей измерительного преобразования:

$$\sigma_{\Delta}^2 = \frac{2(2N-1)}{(N-1)} \cdot B^2 \cdot \sigma_t^2 \cdot \sigma_b^2 + \sigma_{\varepsilon}^2 \cdot \sigma_b^2 + \overline{\sigma_z^2}. \quad (9)$$

5. Свойства статистической модели параметра контроля:

1) Увеличение σ_t^2 (времени наблюдения сигнала $x(t)$ при условии $B \neq 0$) повышает возможность обнаружения изменений в отклонениях b_j , $j = \overline{1,2}$, от среднего значения \bar{b} .

2) Контроль изменений случайных погрешностей $\overline{\sigma_z^2}$ можно обеспечить, задав $B=0$, для входного сигнала $x(t)$ и снизив его дисперсию σ_{ε}^2 , что приведет к уже известному классическому методу пространственного усреднения (уменьшение аддитивных погрешностей [6]). В этом случае исчезают первое и второе слагаемые в выражении (9) и минимизируется третье слагаемое этого же выражения.

3) В выражении (9) значение статистики σ_{Δ}^2 определяется случайными оценками σ_{ε}^2 и σ_z^2 . Величины N , B^2 , σ_t^2 , и σ_b^2 – не случайны, причем σ_b^2 имеет смысл представить в форме выражения (7), в котором разности $(b_j - \bar{b})$ – это детерминированные величины, а средняя чувствительность \bar{b} должна быть нормой, не зависящей от времени эксплуатации преобразователей. Тогда ширина δ допускового интервала для параметра контроля σ_{Δ}^2 будет определяться среднеквадратическими отклонениями оценок дисперсии σ_{ε}^2 и σ_{Δ}^2 , и заданным уровнем значимости α . При больших N ($N > 100$ [7]) ширина δ определится выражением:

$$\delta = 2K_{1-\alpha} \sqrt{\frac{2}{N} (\sigma_{\varepsilon}^4 \sigma_b^4 + \sigma_z^4)}, \quad (10)$$

где $K_{1-\alpha}$ – квантильный коэффициент доверия [8], который при $\alpha=0,05$ равен $K_{1-\alpha} = 1.96$.

Из выражения (10) следует, что увеличение числа измерений уменьшает ширину допускового интервала.

6. Статистическое моделирование процедур контроля. Для генерации входного измеряемого сигнала $x(t)$ использовались последовательности нормально распределенных псевдослучайных чисел, подвергаемых линейному преобразованию (1), для разных вариантов значений B и $N(A=0)$.

Среднеквадратические отклонения для E и Z принимались равными $\sigma_{\varepsilon} = \sigma_{z_1} = \sigma_{z_2} = 0.1$.

Таблица 1.– Результаты моделирования процедур бездемонтажного контроля (чувствительность $b_1 = 1$)

Параметры входного сигнала	Количество результатов измерений (N)	Границы зоны допуска на параметр σ_{Δ}^2		Чувствительность b_2	Среднее значение параметра σ_{Δ}^2 (моделирование)	Решение
		δ_n	δ_e			
A=0 B=1	20	$13,7 \cdot 10^{-3}$	$26,3 \cdot 10^{-3}$	1	$19,12 \cdot 10^{-3}$	γ_0
				(0,9÷1,1)	$(680,32 \div 774,78) \cdot 10^{-3}$	γ_1
	40	$15,6 \cdot 10^{-3}$	$24,5 \cdot 10^{-3}$	1	$14,88 \cdot 10^{-3}$	γ_0
				(0,9÷1,1)	$(2,26 \div 2,74) \cdot 10^{-1}$	γ_1

В табл. 1 представлены результаты моделирования процедур контроля, с решениями:

γ_0 – мультипликативные погрешности преобразователей Π_1, Π_2 соответствуют норме;

γ_1 – имеется значимое расхождение между мультипликативными погрешностями преобразователей.

Если δ_n, δ_e – нижняя и верхняя границы допускового интервала на параметр контроля σ_{Δ}^2 , то решения γ_0 и γ_1 соответствуют условиям [2]:

$$\begin{cases} \gamma_0 : \sigma_{\Delta}^2 \in (\delta_n, \delta_e); \\ \gamma_1 : \sigma_{\Delta}^2 \notin (\delta_n, \delta_e). \end{cases} \quad (11)$$

Из табл. 1 видно, что увеличение числа измерений N повышает чувствительность контроля (для $N=20$ имеем $\sigma_{\Delta}^2 = (680,32 \div 774,78) \cdot 10^{-3}$, а для $N=40$, $\sigma_{\Delta}^2 = (2,26 \div 2,74) \cdot 10^{-1}$).

7. Вывод. Статистическая модель (9) указывает на принципиальную возможность обнаружения изменений мультипликативных погрешностей резервированных первичных преобразователей без отключения последних на проверку, на основе использования случайных входных сигналов с регулируемые уровнями нестационарности по их математическому ожиданию.

Список литературы. 1. Кондрашов С. I. Методи підвищення точності систем тестових випробувань електричних вимірювальних перетворювачів у робочих режимах: Монографія / С. I. Кон-

драшов. – Х.: НТУ «ХП», 2004. – 224 с. **2.** Володарський Є. Т. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю / Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк. – Вінниця: Велес, 2001. – 219 с. **3.** Туз Ю. М. Автоматическая коррекция погрешностей и расширение функциональных возможностей цифровых вольтметров и мультиметров / Ю. М. Туз, В. В. Литвих // Измерения, контроль и автоматизация: Научно-технический сборник Выпуск 1 (65). – М.: Информприбор, 1988. – С. 1–15. **4.** Головка Д. Б. Структурно-алгоритмічні методи підвищення точності вимірювання температури / Д. Б. Головка, Ю. О. Скрипник, Г. І. Хімічева. – К.: ФАДА ЛТД, 1999 – 2006 с. **5.** Березький О. Спосіб прогнозування похибки дрейфу термоелектроперетворювачів / О. Березький // Зб. Наук. Праць НУ «Львівська політехніка»; вимірювальна техніка та метрологія. – 2001. – №58. – С. 72-75. **6.** Орнатский П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П. П. Орнатский. – К.: Вища школа, 1983. – 455 с. **7.** Смирнов Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. – М.: Наука. Главная ред. физматлитературы, 1969. – 512 с. **8.** Чинков В. М. Основы метрологии та вимірювальної техніки: [навч. посібн., 2-е вид., перероб. і доп.] / В. М. Чинков. – Х.: НТУ «ХП», 2005. – 524 с.

Bibliography (transliterated): **1.** Kondrashov S. I. Metodi pidvishhennja tochnosti sistem testovih viprobuvan' elektrichnih vimirjuval'nih peretvorjuvachiv u robochih rezhimah: Monografija / S. I. Kondrashov. – H.: NTU «HPI», 2004. – 224 s. **2.** Volodars'kij Є. Т. Metrologichne zabezpechennja vimirjuvan' i kontrolju / Є. Т. Volodars'kij, V. V. Kuharchuk, V. O. Podzharenko, G. B. Serdjuk. – Vinnicja: Veles, 2001. – 219 s. **3.** Tuz Ju. M. Avtomaticheskaja korrekcija pogrishnostej i rasshirenie funkcional'nyh vozmozhnostej cifrovyh vol'tmetrov i mull'timetrov / Ju. M. Tuz, V. V. Litvih // Izmerenija, kontrol' i avtomatizacija: Nauchno-tehnicheskij sbornik Vypusk 1 (65). – M.: Informpribor, 1988. – S. 1–15. **4.** Golovko D. B. Strukturno-algoritmichni metodi pidvishhennja tochnosti vimirjuvannja temperaturi / D. B. Golovko, Ju. O. Skripnik, G. I. Himicheva. – K.: FADA LTD, 1999 – 2006 s. **5.** Berez'kij O. Sposib prognozuvannja pohibki drejfu termoelekt-roperetvorjuvachiv / O. Berez'kij // Zb. Nauk. Prac' NU «L'vivs'ka politehnika»; vimirjuval'na tehnika ta metrologija. – 2001. – №58. – S. 72-75. **6.** Ornatskij P. P. Teoreticheskie osnovy informacionno-izmeritel'noj tehniki / P. P. Ornatskij. – K.: Vishha shkola, 1983. – 455 s. **7.** Smirnov N. V. Kurs teorii verojatnostej i matematicheskij statistiki dlja tehniceskij prilozhenij / N. V. Smirnov, I. V. Dunin-Barkovskij. – M.: Nauka. Glavnaja red. fizmatliteratury, 1969. – 512 s. **8.** Chinkov V. M. Osnovi metrologii ta vimirjuval'noi tehniki: [navch. posibn., 2-e vid., pererob. i dop.] / V. M. Chinkov. – H.: NTU «HPI», 2005. – 524 s.

Поступила (received) 05.03.2014

РЕФЕРАТИ

УДК 621.3.078.3

Синтез регуляторов простой структуры для управления процессами кристаллизации / Н. А. Балонин, В. С. Суздаль, Ю. С. Козьмин // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 3 назв.

Для систем керування процесами кристалізації вирішується задача досягнення бажаних показників якості методами модального керування. Синтез проводиться на основі аналізу мір модального домінування власних значень матриці станів об'єкта керування.

Ключові слова: монокристал, метод Чохральського, система, керування, якість, домінування.

УДК 629.424.3:621.314.12

Построение обобщенной структуры и математических моделей преобразователей параметров режимов работы электроэнергетической установки / А. Н. Борисенко, Б. И. Кубрик, А.Б. Богаевский // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 9 назв.

Стаття присвячена створенню узагальненої структури та побудови математичних моделей перетворювачів параметрів руху пристрою дозування палива і швидкості обертання турбокомпресора дизель - генераторної установки з нагнітанням в масу додаткового повітря, що подається в дизель при різкому прирості навантаження.

Ключові слова: математична модель, дизель, клапан, двигун.

УДК 004.932.2

Кодирование и оптимизация процесса передачи данных через локальные и глобальные сети / Р. А. Давыдов, А. А. Зуев, О. Г. Васильченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 4 назв.

Розглядаються питання оптимального кодування даних при передачі по локальних і глобальних мережах. Описаний алгоритм роботи і структурна схема програмно-апаратної системи, яка здійснює збір і передачу зображень по запиту користувача. Наводиться приклад використання даної системи для обробки біомедичних даних.

Ключові слова: локальна мережа, глобальна мережа, сервер, клієнт, алгоритм, надмірність, ПЕВМ.

УДК 621.389

Построение модели теплового объекта на RC-сетках / А. И. Гапон, О. Н. Евсеев // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 6 назв.

Проводиться вибір методу моделювання. Здійснюється побудова математичної моделі теплового об'єкта на основі методу RC-сіток. Знімаються перехідні характеристики. Досліджується реакція об'єкта на серію шім-імпульсів.

Ключові слова: модель, тепловий об'єкт, метод RC-сіток, масштабні коефіцієнти, перехідна характеристика, ШІМ.

УДК 681.518

Побудова тестових впливів для діагностичного приладу лазерних систем / І.В. Григоренко, А.С. Бєлєвцова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 5 назв.

У статті запропоновано варіант побудова тестових впливів для діагностичного приладу лазерних систем контролю. Висвітлені аналітичні залежності, які визначають процеси зміни вхідного сигналу у динамічному режимі.

Ключові слова: системи лазерного контролю, корекція похибки системи лазерного контролю, тестові методи контролю лазерних систем, алгоритм підвищення точності системи.

УДК 519.2

Цифровий вимірювач температури / В.К. Гусельніков, Т.С. Демент'єва // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 7 назв.

У статті розглянуті питання побудови цифрового вимірювача температури. Було обґрунтовано підхід до вибору датчика температури, також була проведена оцінка похибок даного приладу.

Ключові слова: вимірювання, температура, датчики температури, мікроконтролер, інтерфейс RS 485, похибка.

УДК 621.28.54

Цифровий вимірювач фізичних параметрів повітряного середовища / В.К. Гусельніков, Т.Б. Белікова, Г.В. Чорна // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 4 назв.

У статті розглянуті питання побудови цифрового вимірювача фізичних параметрів повітряного середовища. Було обґрунтовано підхід до вибору первинних вимірювальних перетворювачів, проведений аналіз можливих похибок цифрового вимірювача.

Ключові слова: клімат-контроль, повітряне середовище, цифровий вимірювач.

УДК 681.5.004.94

Електроимпедансний метод неінвазивного контролю при діагностиці плоских провідящих матеріалів / А. П. Давиденко, Е. А. Панченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 4 назв.

Розглянуто метод контролю плоских матеріалів (плівок, листів) і хімічних розчинів. Даний метод реалізується за допомогою підвідних ліній (провідників), які лежать у двох паралельних площинах і є ортогональними по відношенню одна до одної. На основі даних вимірювань комплексної провідності будується графік поверхні, який дає можливість виявити порушення і дефекти в структурі досліджуваного матеріалу. Побудовано імітаційну модель плоского матеріалу, що проводить, за допомогою програмного пакету Multisim. На імітаційній моделі були проведені дослідження, результати яких підтвердили дієвість розглянутого методу.

Ключові слова: метод контролю, плоский матеріал, імітаційна модель, елементарний об'єкт, поверхня.

УДК 621.3.078.3

Рандомизований синтез управління МІМО-системами вирощування монокристалів / Ю. М. Епифанов, В. С. Суздаль, А. В. Соболев // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 13 назв.

Для кристалізації сцинтиляційних монокристалів розглянутий метод стабілізації по стану й виходу лінійної МІМО-системи на основі специфічного перетворення подоби вихідної системи, що дозволяє в явному виді визначити елементи, зміна яких за допомогою зворотного зв'язку забезпечує стійкість замкнутої системи.

Ключові слова: монокристал, метод Чохральського, система, керування, стабілізація, стійкість, рандомізація.

УДК 654.937

Адаптація управляемых процессов к тренировкам копьеметателей в подготовительном периоде посредством интерактивного тренажера / П. А. Качанов, В. И. Галица, В. М. Адашевский, А. С. Горлов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 11 назв.

У статті висвітлено шляхи розвитку технічних засобів експрес-діагностики функціональних кондицій легкоатлетів у метанні списа. На основі проведених теоретичних досліджень описано варіанти технічної реалізації експрес-діагностики на прикладі інтерактивного тренажера, що дозволяє вимірювати початкову швидкість вильоту спортивного снаряда – аналога спису при

використанні троса в приміщенні. Завдяки отриманій інформації стає можливим розрахувати результати кожної із спроб, а також рівнів їх інтенсивності у % від максимуму.

Ключові слова: Біомеханіка, діагностична система, інтерактивний тренажер, динамічна модель, кінематична модель, симулятор.

УДК 654.937

Физико-математическое моделирование биомеханических систем в метании копья / П. А. Качанов, В. И. Галица, В. М. Адашевский, А. С. Горлов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 11 назв.

У статті проведено аналіз біомеханічних характеристик спортсмена –метальника спису, які найбільшою мірою впливають на результат, а також результати фізико-математичного моделювання біомеханічних систем у метанні списа.

Ключові слова: Біомеханіка, діагностична система, інтерактивний тренажер, динамічна модель, кінематична модель, симулятор.

УДК 621.394

Реализация адаптивного устройства кодирования/декодирования на ПЛИС / В.А.Крылова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 4 назв.

Пропонується розробка пристрою для адаптивного завадостійкого кодування / декодування для систем передачі інформації з оцінкою якості інформаційного стану каналу зв'язку.

Ключові слова: адаптивна система, канал передачі даних, ПЛІС-технології, канал зв'язку, статистика помилок.

УДК 535.337:[539.1.074.3:621.383.52]

Спектрометрический стенд для измерения сцинтилляционных характеристик сцинтилляторов и детекторов на основе системы «сцинтилятор – PIN фотодиод»/ А.М. Кудин, Ю.А. Бороденко, В.В. Белогуб, А.В. Диденко. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 2 назв..

Представлено результати розробки й виготовлення спектрометричного стенда для тестування сцинтиляційних складань, виконаних на основі системи «сцинтилятор CsI:TI – PIN фотодіод». Показано, що виготовлені складання й розроблений спектрометр задовольняють жорстким вимогам для приладів, призначених для дослідження сонячної радіації в космічних умовах.

Ключові слова: сцинтилятор, PIN фотодіод, детектор, спектрометрія, енергетичний дозвіл.

УДК 004.94

Применение k -значного дифференциального исчисления для исследования распространения сигналов в проводниках с потерями / Леонов С.Ю. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХП», 2014. – № 15 (1058). – С. 88–92. – Бібліогр.: 8 назв.

Розглядається використання K -значного диференціального числення при поширенні сигналів по лінії зв'язку з урахуванням втрат у лінії. Результати такого моделювання дозволяють точніше досліджувати працездатність швидкодіючих обчислювальних пристроїв. Моделювання проведено в системі на основі K -значного диференційного числення.

Ключові слова: K -значне диференціальне числення, поширення сигналів, лінії зв'язку, моделювання, працездатність швидкодіючих обчислювальних пристроїв.

УДК 681.586.773:621.317.7

Методы контроля расхода движущихся жидкостей / Т.Г.Мащенко, Р.И.Акоев // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 7 назв.

У статті наведено аналіз методів і засобів вимірювань витрати рідких і газоподібних середовищ. У ході аналізу існуючих методів і технічних засобів обґрунтований вибір найбільш перспективного і точного методу контролю витрати рухомих рідин.

Ключові слова: витрата, тиск, система, витратоміри, методи аналізу, вимірювання.

УДК 621.924

Снятие и обработка биоэлектрических сигналов головного мозга / Т.Г. Мащенко, Т.А.Тоноян // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 4 назв.

У статті розглянуті результати розробки пристрою для аналізу діяльності центральної нервової системи (ЦНС), за допомогою якого можливо досліджувати біопотенціали головного мозку, проводити діагностику, прогнозувати етапи лікування центральної нервової системи.

Ключові слова: головний мозок, електроенцефалограф, датчик, біоелектрична активність, фільтр низьких частот, фільтр високих частот.

УДК 62-83:621.77

Синтез робастного управления двухмассовой электромеханической системой с учетом неопределенностей объекта управления / Т.Б. Никитина, М.О. Татарченко, В.В. Хоменко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – №00. – С. Бібліогр.: 29 назв.

Розроблена математична модель двомасової електромеханічної системи з урахуванням невизначеності об'єкту керування і обґрунтовано вектор мети робастного керування. Виконано дослідження динамічних характеристик робастного керування двомасовою електромеханічною системою. Показано, що синтезована система робастного керування має низьку чутливість до зміни параметрів моделі об'єкта керування.

Ключові слова: двомасова електромеханічна система, робастне керування, математична модель, невизначеності параметрів.

УДК 621.317.42

Моделирование электрофизических процессов при ориентировке молнии на наземные объекты /М.М. Резинкина, О.Л. Резинкин,Е.Е. Светличная// Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 16 назв.

Описана модель електрофізичних процесів при русі лідерного каналу блискавки на останньому етапі його просування до землі з урахуванням можливості виникнення зустрічної іскри від наземних об'єктів.

Ключові слова: блискавка, лідерний канал, пробій, математичне моделювання.

УДК 621.515.1

Динамическая модель электромеханической системы "Центробежный компрессор – приводной двигатель" / Садовой А.В., Цабенко М.В., Нагорний Д.А. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 12 назв.

Розглянуто системи стиснення відцентрових компресорів на основі уточненої моделі Мура-Грейтцера, з елементами антипомпажного захисту: байпасування, антипомпажний клапан (АПК). Досліджено вплив нестабільних явищ на роботу приводного двигуна. Іл.: 1, Бібліогр.: 12 назв.

Ключові слова: уточнена модель, антипомпажного захист, байпасування АПК, приводний двигун.

УДК 681.518

Методика передачи данных через порт USB в микроконтроллерах на базе ядра CORTEX M4 в системах измерения и управления на транспорте/ С.А. Сериков, А.Н. Борисенко, А.Б. Богаевский, Е.Г. Вовк// Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 3 назв.

У статті аналізуються апаратні можливості передачі даних через порт USB сучасних мікропроцесорних систем на базі ядра Cortex M4 і пропонується методика розробки вимірювальних систем з можливістю передачі даних до персональних або спеціалізованих вимірювальних комплексів.

Ключові слова: мікропроцесор, транспортне машинобудування, мікроконтроллер, CORTEX, передача даних.

УДК 531.787+53.088

Статистическая модель бездемонтажного контроля погрешностей первичного измерительного преобразования измерительного преобразователя / П.Ф. Шапов, Р.П. Мигушенко, М.И. Шпарёва // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – №00. – С. Бібліогр.: 8.

Розглянута статистична модель бездемонтажного контролю похибок резервованих первинних вимірювальних перетворювачів, що дозволяє контролювати стабільсть їх систематичних і випадкових складових, без відключення перетворювачів на повірку. Представлені результати статистичного моделювання, що підтверджують ефективність використання залишкової дисперсії, як статистики контролю похибок вимірювального перетворення

Ключові слова: перетворювання, контроль, дисперсія, статистичне моделювання.

РЕФЕРАТЫ

УДК 621.3.078.3

Синтез регуляторов простой структуры для управления процессами кристаллизации / Н. А. Балонин, В. С. Суздаль, Ю. С. Козьмин // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 3 назв.

Для систем управління процесами кристалізації вирішується задача досягнення желяс-ных показателів качества методами модального управління. Синтез проводиться на основе анализа мер модального доминирования собственных значений матрицы состояний объекта управления.

Ключевые слова: монокристалл, метод Чохральского, система, управление, качество, доминирование.

УДК 629.424.3:621.314.12

Построение обобщенной структуры и математических моделей преобразователей параметров режимов работы электроэнергетической установки / А. Н. Борисенко, Б. И. Кубрик, А.Б. Богаевский// Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 9 назв.

Статья посвящена созданию обобщенной структуры и построению математических моделей преобразователей параметров движения топливоподающего органа и скорости вращения турбокомпрессора дизель – генераторной установки с наддувом в массу дополнительного воздуха, подаваемого в дизель при набросе нагрузки.

Ключевые слова: математическая модель, дизель, клапан, двигатель.

УДК 004.932.2

Кодирование и оптимизация процесса передачи данных через локальные и глобальные сети / Р. А. Давыдов, А. А. Зуев, О. Г. Васильченко// Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 4 назв.

В статье рассматриваются вопросы оптимального кодирования данных при передаче по локальным и глобальным сетям. Описан алгоритм работы и структурная схема программно-

аппаратной системы, которая осуществляет сбор и передачу изображений по запросу пользователя. Приводится пример использования данной системы для обработки биомедицинских данных.

Ключевые слова: локальная сеть, глобальная сеть, сервер, клиент, алгоритм, избыточность, ПЭВМ.

УДК 621.389

Построение модели теплового объекта на RC-сетях / А. И. Гапон, О. Н. Евсеенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХПІ», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 6 назв.

Производится выбор метода моделирования. Осуществляется построение математической модели теплового объекта на основе метода RC-сеток. Снимаются переходные характеристики объекта. Исследуется реакция объекта на серию ШИМ-импульсов.

Ключевые слова: модель, тепловой объект, метод RC-сеток, масштабные коэффициенты, переходная характеристика, ШИМ.

УДК 681.518

Построение тестовых воздействий для диагностического прибора лазерных систем / И.В. Григоренко, А.С.Белевцова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХПІ», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 5 назв.

В статье предложен вариант построение тестовых воздействий для диагностического прибора лазерных систем контроля. Отмечены аналитические зависимости, которые определяют процессы изменения входного сигнала в динамическом режиме

Ключевые слова: системы лазерного контроля, коррекция погрешности системы лазерного контроля, тестовые методы контроля лазерных систем, алгоритм повышения точности системы.

УДК 519.2

Цифровой измеритель температуры / В.К. Гусельников, Т.С. Дементьева // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХПІ», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 7 назв.

В статье рассмотрены вопросы построения цифрового измерителя температуры. Был обоснован подход к выбору датчика температуры, также была проведена оценка погрешностей данного прибора.

Ключевые слова: измерение, температура, датчики температуры, микроконтроллер, интерфейс RS 485, погрешность.

УДК 621.28.54

Цифровой измеритель физических параметров воздушной среды / В.К. Гусельников, Т.Б. Беликова, Г.В. Чорная // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХПІ», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 4 назв.

В статье рассмотрены вопросы построения цифрового измерителя параметров воздушной среды. Был обоснован подход к выбору первичных измерительных преобразователей, проведен анализ возможных погрешностей цифрового измерителя.

Ключевые слова: климат-контроль, воздушная среда, цифровой измеритель.

УДК 681.5.004.94

Электромпедансный метод неразрушающего контроля при диагностике плоских проводящих материалов / А. П. Давиденко, Е. А. Панченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХПІ», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 4 назв.

Рассмотрен метод контроля плоских материалов (пленок, листов) и химических растворов. Данный метод реализуется с помощью набора подводящих линий (проводников), которые лежат в двух параллельных плоскостях и являются ортогональными по отношению друг к другу. На основе данных измерений комплексной проводимости строится график поверхности, который дает возможность обнаружить нарушения и дефекты в структуре исследуемого материала.

Построена имитационная модель плоского проводящего материала с помощью программного пакета Multisim. На имитационной модели проводящего материала были поставлены опыты, результаты которых подтвердили действенность рассмотренного метода.

Ключевые слова: метод контроля, плоский материал, имитационная модель, элементарный объем, поверхность.

УДК 621.3.078.3

Рандомизированный синтез управления ММО-системами выращивания монокристаллов / Ю. М. Епифанов, В. С. Суздаль, А. В. Соболев // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 13 назв.

Для кристаллизации скнтилляционных монокристаллов рассмотрен метод стабилизации по состоянию и выходу линейной ММО-системы на основе специфического преобразования подобия исходной системы, что позволяет в явном виде определить элементы, изменение которых с помощью обратной связи обеспечивает устойчивость замкнутой системы.

Ключевые слова: монокристалл, метод Чохральского, система, управление, стабилизация, устойчивость, рандомизация.

УДК 654.937

Адаптация управляемых процессов к тренировкам копьеметателей в подготовительном периоде посредством интерактивного тренажера / П. А. Качанов, В. И. Галица, В. М. Адашевский, А. С. Горлов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 11 назв.

В статье освещены пути развития технических средств экспресс-диагностики функциональных кондиций легкоатлетов-копьеметателей и на основе проведенных теоретических исследований описаны варианты технической реализации экспресс-диагностики на примере интерактивного тренажера, позволяющего измерять начальную скорость вылета спортивного снаряда – аналога копья при использовании троса в помещении и, благодаря полученной информации, рассчитывать результаты каждой из попыток, а также уровень их интенсивности в % от максимума.

Ключевые слова: Биомеханика, диагностическая система, интерактивный тренажер, динамическая модель, кинематическая модель, симулятор.

УДК 654.937

Физико-математическое моделирование биомеханических систем в метании копья / П. А. Качанов, В. И. Галица, В. М. Адашевский, А. С. Горлов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 11 назв.

В статье проведен анализ биомеханических характеристик спортсмена – копьеметателя, которые в наибольшей степени влияют на результат, а также параметры действий, используемые в физико-математическом моделировании биомеханических систем в метании копья.

Ключевые слова: Биомеханика, диагностическая система, интерактивный тренажер, динамическая модель, кинематическая модель, симулятор.

УДК 621.394

Реализация адаптивного устройства кодирования/декодирования на ПЛИС / В.А.Крылова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 4 назв.

Предлагается разработка устройства для адаптивного помехоустойчивого кодирования/декодирования для систем передачи информации с оценкой качества информационного состояния канала связи.

Ключевые слова: адаптивная система, канал передачи данных, ПЛИС-технологии, канал связи, статистика ошибок.

УДК 535.337:[539.1.074.3:621.383.52]

Спектрометрический стенд для измерения скнтилляционных характеристик скнтилляторов и детекторов на основе системы «скнтиллятор – рпн фотодиод»/ А.М. Кудин,

Ю.А. Бороденко, В.В. Белогуб, А.В. Диденко. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХПІ», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 2 назв..

Представлены результаты разработки и изготовления спектрометрического стенда для тестирования скнтилляционных сборок, выполненных на основе системы «скнтиллятор CsI:TI – PIN фотодиод». Показано, что изготовленные сборки и разработанный спектрометр удовлетворяют жестким требованиям для приборов, предназначенных для исследования солнечной радиации в космических условиях.

Ключевые слова: скнтиллятор, PIN фотодиод, детектор, спектрометрия, энергетическое разрешение.

УДК 004.94

Применение k -значного дифференциального исчисления для исследования распространения сигналов в проводниках с потерями / Леонов С.Ю. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 15 (1058). – С. 88–92. – Бібліогр.: 8 назв.

Рассматривается использование K -значного дифференциального исчисления для анализа распространения сигналов по линиям связи с учетом потерь в линиях. Результаты такого моделирования позволяют более точно исследовать работоспособность быстродействующих вычислительных устройств. Моделирование проведено в системе на основе K -значного дифференциального исчисления.

Ключевые слова: K -значное дифференциальное исчисление, распространение сигналов, линии связи, моделирование, работоспособность быстродействующих вычислительных устройств.

УДК 681.586.773:621.317.7

Методы контроля расхода движущихся жидкостей/ Т.Г.Мащенко, Р.И.Акоев// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХПІ», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 7 назв.

В статье приведен анализ методов и средств измерений расхода жидких и газообразных сред. В ходе анализа существующих методов и технических средств обоснован выбор наиболее перспективного и точного метода контроля расхода движущихся жидкостей.

Ключевые слова: расход, давление, система, расходомеры, методы анализа, измерения.

УДК 621.924

Снятие и обработка биоэлектрических сигналов головного мозга / Т.Г. Мащенко, Т.А.Тоноян // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХПІ», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 4 назв.

В статье рассмотрены результаты разработки прибора для анализа деятельности центральной нервной системы (ЦНС), с помощью которого можно исследовать биопотенциалы головного мозга, проводить диагностику, прогнозировать этапы лечения центральной нервной системы.

Ключевые слова: головной мозг, электроэнцефалограф, датчик, биоэлектрическая активность, фильтр низких частот, фильтр высоких частот.

УДК 62-83:621.77

Синтез робастного управления двухмассовой электромеханической системой с учетом неопределенностей объекта управления / Т.Б. Никитина, М.О. Татарченко, В.В. Хоменко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХПІ», 2014. – №00. – С. –. – Бібліогр.: 29 назв.

Разработана математическая модель двухмассовой электромеханической системы с учетом неопределенности объекта управления и обоснован вектор цели робастного управления. Выполнено исследование динамических характеристик робастного управления двухмассовой электромеханической системой. Показано, что синтезированная система робастного управления имеет низкую чувствительность к изменению параметров модели объекта управления.

Ключевые слова: двухмассовая электромеханическая система, робастное управление, математическая модель, неопределенности параметров.

УДК 621.317.42

Моделирование электрофизических процессов при ориентировке молнии на наземные объекты /М.М. Резинкина, О.Л. Резинкин,Е.Е. Светличная// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХПІ», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 16 назв.

Описана модель электрофизических процессов при движении лидерного канала молнии на последнем этапе его продвижения к земле с учетом возможности возникновения встречной искры от наземных объектов.

Ключевые слова: молния, лидерный канал, пробой, математическое моделирование.

УДК 621.515.1

Динамическая модель электромеханической системы "Центробежный компрессор – приводной двигатель"/ Садовой А.В., Цабенко М.В., Нагорний Д.А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХПІ», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 12 назв.

Рассмотрены системы компримирования центробежных компрессоров на основе уточненной модели Мура-Грейтцера с элементами антипомпажной защиты: байпасированием, антипомпажным клапаном. Исследовано влияние нестабильных явлений на работу приводного двигателя.

Ключевые слова: уточненная модель, антипомпажная защита, байпасирование, антимонтажный клапан, приводной двигатель.

УДК 681.518

Методика передачи данных через порт USB в микроконтроллерах на базе ядра CORTEX M4 в системах измерения и управления на транспорте/ С.А. Сериков, А.Н. Борисенко, А.Б. Богаевский, Е.Г. Вовк// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків.: НТУ «ХПІ», 2014. – № (). – С. –. – Бібліогр.: 3 назв.

В статье анализируются аппаратные возможности передачи данных через порт USB современных микропроцессорных систем на базе ядра Cortex M4 и предлагается методика разработки измерительных систем с возможностью передачи данных к персональным или специализированным измерительным комплексам.

Ключевые слова: микропроцессор, транспортное машиностроение, микроконтроллер, CORTEX, передача данных.

УДК 531.787+53.088

Статистическая модель бездемонтажного контроля погрешностей первичного измерительного преобразования измерительного преобразователя / П.Ф. Щанов, Р.П. Мигушенко, М.И. Шпарёва // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – №00. – С. –. – Бібліогр.: 8.

Рассмотрена статистическая модель бездемонтажного контроля погрешностей резервированных первичных измерительных преобразователей, позволяющая контролировать постоянство их систематических и случайных составляющих, без отключения преобразователей на поверку. Представлены результаты статистического моделирования, подтверждающих эффективность использования разностной остаточной дисперсии, как статистики контроля погрешностей измерительного преобразования

Ключевые слова: преобразование, контроль, дисперсия, статистическое моделирование.

ABSTRACTS

The synthesis of controllers simple structure for management of processes of crystallization / N. A. Balonin, V. S. Suzdal, Y. S. Kozmin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № (). – P. –. – Bibliogr.: 3.

For crystallization process control systems to solve the problem to achieve the desired quality indicators modal control methods. The synthesis is based on the analysis of measures modal dominance matrix eigenvalues of the states of the control object.

Keywords: single crystal, Czochralski method, system, control, quality, dominance.

Construction of the generalized patterns and mathematical models of the Converter parameters of modes of electric power installation / A. N. Borisenko, B. I. Kubrick, A.B. Bogaevsky // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № (). – P. –. – Bibliogr.: 3.

The creation of a generalized structure and the construction of mathematical models of motion parameters of transducers fuel dosing body and the rotational speed of a turbocharger diesel engine - generator set with a lot of additional pressurized air to the diesel in the load-on has been described in the article.

Keywords: mathematical model, diesel, valve, engine.

Coding and optimization of process data through the WAN and LAN / R. A. Davydov, A. A. Zuev, O. G. Vasilchenkov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № (). – P. –. – Bibliogr.: 4.

Optimal data coding issues are reviewed in document. Purpose is data exchange in local and global networks. Algorithm and hardware structure for data collection and sending by user request is proposed. Example demonstrate using of proposed system for biomedical data processing.

Keywords: local network, global network, server, client, algorithm, surplus, PECM.

Model building thermal object on RC-grids / A. I. Gapon, O. N. Evsenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № (). – P. –. – Bibliogr.: 6.

Choosing a method of modeling. It was built a mathematical model of the thermal object on basis of RC-networks. Received transient curves. Explored the response of object on series of PWM pulses.

Keywords: model, thermal object, method RC-networks, scale factors, the transient response, PWM.

Building a test influences for diagnostic laser systems / I. V. Grigorenko, A.S. Belevtsova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № (). – P. –. – Bibliogr.: 3.

The paper presents the construction of test impact diagnostic device for laser control systems. Highlights analytical capabilities that define processes of input signal changed dynamically.

Keywords: laser systems control, error correction system for laser control, test methods for laser control systems, the algorithm of improving accuracy of system.

Digital temperature meter / V.K. Guselnikov, T.S. Dementieva // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № (). – P. –. – Bibliogr.: 7.

In article questions *рассмотрены* building a digital *yzmerytelya* temperature. It would *obosnovano* approach by choice temperature sensor, has been conducted well as evaluation of *pogreshnost* of the given device.

Keywords: measurements, temperature, temperature sensors, microcontroller, interface RS 485, accuracy.

Digital measuring physical parameters of the air environment /V.K. Guselnikov, T.B. Belikova, G.V. Chornaya// Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № (). – P. –. – Bibliogr.: 4.

In the article questions build a digital meter air parameters. Was justified approach to the selection of transducers, an analysis of possible errors in the digital meter.

Keywords: climate control, air environment, digital meter.

Electrical impedance method for non-destructive control and diagnostics flat conductive materials / A. P. Davidenko, E. A. Panchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № (). – P. –. – Bibliogr.: 4.

A method of controlling the fully flattened materials (films, sheets) and chemical solutions was learned. This method is implemented by means of a selection of fill lines (conductors) which lie in two parallel planes and are orthogonal to each other. Based upon measurements of the complex conductivity a graph of the surface is constructed, which makes it possible to detect irregularities and defects in the structure of the test material. A simulation model of a flat conductive material using the software package Multisim was constructed. Experiments on a simulation model of the conductive material were made, the results of which confirmed the validity of this method.

Key words: a method of controlling, fully flattened materials, a simulation model, elementary volume, surface.

A randomized synthesis MIMO systems crystal growing / Yu. M. Epifanov, V. S. Suzdal, A.V. Sobolev// Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № (). – P. –. – Bibliogr.: 13.

For crystallization of scintillation single crystals considered a method of stabilizing on the states and output of linear MIMO-system based on a specific transformation of the similarity initial system that allows explicitly identify the elements which change via feedback ensures stability of the closed system.

Keywords: single crystal, Czochralski method, system, control, stabilization, stability, randomization.

Adaptation controlled process for training athletes - javelin throwers during the Winter by using interactive simulator/ Kachanov P., Galitsa V., Adashevskiy V., Gorlov A. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № (). – P. –. – Bibliogr.: 11.

This article presents the development of technical means express diagnostics of functional conditions of athletes spear-throwers and on the basis of the theoretical research describes the options for the technical implementation of express diagnostics system. Presents an interactive simulator, which allows to measure the initial rate of departure pipe - an analog of the spear along the steel cable in the room. The received information allows to calculate the results and levels of intensity in % of maximum of each attempt.

Key words: Biomechanics, diagnostic system, an interactive simulator, the dynamic model, the kinematic model

Physical and mathematical modeling of biomechanical systems in the javelin. / Kachanov P., Galitsa V., Adashevskiy V., Gorlov A. /// Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № (). – P. –. – Bibliogr.: 11.

The article analyzes the biomechanical characteristics of an athlete -javelin, which correlates to the greatest extent on the result, and presents results of physical and mathematical modeling of biomechanical systems in the javelin.

Key words: Biomechanics, diagnostic system, an interactive simulator, the dynamic model, the kinematic model

Realization of adaptive encoding/decoding devices on FPGA /V.A. Krulova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automation and Instrumentation. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (948). –

P. – Bibliogr.: 4.

Device development for the adaptive noiseproof coding/decoding for information transmission systems with an assessment of quality of information link state of communication is offered.

Keywords: adaptive transmission, channel data, FPGA technology, the communication channel.

Spectrometric stand for measuring scintillation characteristics scintillators and detectors on the basis of the «scintillator - pin photodiode»/ A. M. Kudin, Y.A Borodenko, V.V. Belogub, A. V. Didenko. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № (). – P. – Bibliogr.: 2.

Scintillation spectrometer for testing so called photodiode detectors has been developed. A peculiarity of this device is a low background of noise (500 electrons at a 10 kHz band). Spectrometric characteristics of two types of detection assemblies for space research on a base of CsI:TI crystal and PIN photodiode were measured. It has been shown that developed assemblies and scintillation spectrometer satisfy to strong requirements for devices intended for study a solar radiation in space.

Key words: scintillator; PIN photodiode; detector, spectrometry; energy resolution.

Applications of K-Valued differential calculus for signal propagation research in conductors with loss / Leonov S.Yu. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 15 (1058). – P.88–92. – Bibliogr.: 8

Examines the use of K-valued differential calculus in the propagation of signals on the link for the losses in the line. The results of this simulation can more accurately investigate the performance of high-speed computing devices. Simulation is carried out in the system based on the K-Valued differential calculus.

Keywords: K-Valued differential calculus, signal propagation, communication lines, modeling, performance of high-speed computing devices.

Methods to control the moving of liquids/ T.G. Mashchenko, R.I. Akoyev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № (). – P. – Bibliogr.: 7.

The article is an analysis of the methods and means of flow measurement of liquids and gases. In the analysis of existing methods and techniques chosen are the most promising and accurate method for monitoring the flow of moving fluids.

Keywords: flow rate, pressure, the system flow analysis methods, the measurement.

Removal and processing of bioelectric signals / T.G. Mashchenko, T.A. Tonoyan// Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № (). – P. – Bibliogr.: 4.

In article reviewed the results of the development device for the analysis of the central nervous system (CNS), with which you can explore the bioelectric potentials of the brain, diagnose, predict stages of treatment of the central nervous system, are considered in the article.

Keywords: brain, elektroentsefalograf, sensor, bioelectric activity, filter of low frequencies, filter of high frequencies

Synthesis of robust control by twomass electromechanics system with plant uncertainty / T.B. Nikitina, M.O. Tatarchenko, V.V. Khomenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № (). – P. – Bibliogr.: 29.

The mathematical model of the twomass electromechanics system is worked out taking into account the model plant uncertainty and the vector of robust control purpose is reasonable. Research of dynamic descriptions of robust control the twomass electromechanics system is executed. It is shown that the synthesized system of robust control has a subzero sensitiveness to the change of parameters of plant model.

Key words: twomass electromechanics system, robust control, mathematical model, uncertainty of parameters

Modeling of electrophysical processes in the orientation of lightning on ground objects /M.M. Rezinkina, O.L. Rezinkin, E.E. Svetlichnaya// Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № (). – P. –. – Bibliogr.: 16.

Statistical model of electrical physical processes at movement of leader channel of lightning in the last stroke stage of its movement toward the earth taking into account possibility of emerging of upward leader from objects on the earth has been described.

Key words: lightning, leader of the channel, sample, mathematical modeling.

The dynamic model of the Electromechanical systems "Centrifugal compressor drive motor" / Sadovoy A.V., Cabenko M.V.Nagorniy D.A. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № (). – P. –. – Bibliogr.: 12.

We consider compression of centrifugal compressors based on the specified models of Moore-Hreytsera, with elements antysurge protection: bypassing, antysurge valve (APC). The influence of unstable phenomena at work outputs. Figs: 1, Refs: 12 titles.

Keywords: refined model antysurge protection, bypassing, agriculture, the drive motor.

Data transmission technique through USB port in microcontrollers on the basis of CORTEX M4 kernel in measurement and management systems on transport / S. A. Serikov, A.N. Borisenko, A.B. Bogayevsky, E.G. Vovk// Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № (). – P. –. – Bibliogr.: 3.

The article analyses the use of measuring and computing power of modern microcontrollers based on the Cortex M4 core in the organization of control systems of transport means and development methodology object software for hardware USB2.0 data interface in a software development environment Coocox Coide. These methodological recommendations aimed at familiarization with the working modes of functioning and implementation of the integrated data interface USB microcontrollers company STMicroelectronics, as well as represented company-developer of the standard library files and examples organization of information transfer between the microcontroller and a personal computer. This article was published on the basis of received practical results of the organization of communication between the microcontroller and the various subsystems in the information management system of the vehicle.

Key words: microprocessor, transport mechanical engineering, microcontroller, CORTEX, data transmission.

The statistical model buddemontaj error control primary measuring conversion transducer / P.F. Shapov, R.P. Migushenko, M.I. Shparyova// Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № (). – P. –. – Bibliogr.: 8.

The statistical model bezdemontazhnogo error control in redundant transducers, allowing you to control the constancy of their systematic and random components without shutting down converters in fact. The results of statistical modeling to support the effectiveness of using the residual variance of the difference, as the statistics error control measuring conversion

Key words: transformation, control, dispersion, statistical modeling.

<i>Балонин Н.А., Суздаль В.С., Козьмин Ю.С.</i> Синтез регуляторов простой структуры для управления процессами кристаллизации.....	3
<i>Борисенко А. Н. , Кубрик Б. И. , Богаевский А.Б., Лавриненко О.В.</i> Построение обобщенной структуры и математических моделей преобразователей параметров режимов работы электроэнергетической установки	12
<i>Давыдов Р. А. , Зув А. А. , Васильченков О. Г.</i> Кодирование и оптимизация процесса передачи данных через локальные и глобальные сети	18
<i>Гапон А. И. , Евсеенко О. Н.</i> Построение модели теплового объекта на РС-сетках	24
<i>Григоренко І.В., Бєлєвцова А.С.</i> Побудова тестових впливів для діагностичного приладу лазерних систем	30
<i>Гусельников В.К., Демент'єва Т.С.</i> Цифровой вимірювач температури ...	35
<i>Гусельников В.К., Белікова Т.Б., Чорна Г.В.</i> Цифровой вимірювач фізичних параметрів повітряного середовища	39
<i>Давиденко А. П., Панченко Е. А.</i> Электроимпедансный метод неразрушающего контроля при диагностике плоских проводящих материалов	43
<i>Давиденко О. П., Сидорова Л. І.</i> Кореляційний метод вимірювання витрат рідини	49
<i>Епифанов Ю. М. , Суздаль В. С. , Соболев А. В.</i> Рандомизированный синтез управления МІМО-системами выращивания монокристаллов	53
<i>Качанов П. А., Галица В. И., Адашевский В. М., Горлов А. С.</i> Адаптация управляемых процессов к тренировкам копьеметателей в подготовительном периоде посредством интерактивного тренажера.....	63
<i>Качанов П. А., Галица В. И., Адашевский В. М., Горлов А. С.</i> Физико-математическое моделирование биомеханических систем в метании копья	75
<i>Крылова В.А.</i> Реализация адаптивного устройства кодирования/декодирования на ПЛИС	83
<i>Кудин А.М., Бороденко Ю.А., Белозуб В.В., Диденко А.В.</i> Спектрометрический стенд для измерения сцинтилляционных характеристик сцинтилляторов и детекторов на основе системы «сцинтиллятор – рпн фотодиод»	87
<i>Леонов С.Ю.</i> Применение k -значного дифференциального исчисления для исследования распространения сигналов в проводниках с потерями	92
<i>Мащенко Т.Г., Акоев Р.И.</i> Методы контроля расхода движущихся жидкостей	97
<i>Мащенко Т.Г., Тоноян Т.А</i> Снятие и обработка биоэлектрических сигналов головного мозга	105
<i>Никитина Т.Б., Татарченко М.О., Хоменко В.В.</i> Синтез робастного управления двухмассовой электромеханической системой с учетом неопределенностей объекта управления	111
<i>Резинкина М.М., Резинкин О.Л., Светличная Е.Е.</i> Моделирование электрофизических процессов при ориентировке молнии на наземные объекты	122

Сериков С.А., Борисенко А.Н., Богаевский А.Б., Вовк Е.Г. Методика передачи данных через порт USB в микроконтроллерах на базе ядра Cortex M4 в системах измерения и управления на транспорте	128
Садовой А.В., Цабенко М.В., Нагорный Д.А. Динамическая модель электро-механической системы "центробежный компрессор – приводной двигатель"	134
Щапов П.Ф. , Мигущенко Р.П. , Шарёва М.И. Статистическая модель без-демонтажного контроля погрешностей первичного измерительного преобразования измерительного преобразователя	141

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»**

Збірник наукових праць

Серія:
Автоматика та приладобудування

№ 15 (1058)

Наукові редактори: проф. П. О. Качанов
Технічний редактор: ас. О. В. Сосіна

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Г. Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002 Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПІ».
Кафедра теоретичних основ електротехніки.
Тел.: (057) 707-69-61; e-mail: elenasosina09@gmail.com

Обл.-вид № 89–12.

Підп. до друку 12.03.2013 р. Формат 60×84 1/16. Папір Copy Paper.
Друк ризографія. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,4. Облік.-вид. арк. 7,7.
Тираж 300 пр. Зам. № 23. Ціна договірна.

НТУ «ХПІ», 61002, Харків, вил Фрунзе, 21

Надруковано в друкарні КП “Міська друкарня”
Свідоцтво про реєстрацію № 3613 серія ДК від 29.10.2009 р.
м. Харків, вул. Артема, 44 тел. (057)700-48-37
