УДК 004.942

В. Ф. МИРГОРОД, В. В. ДАНИЛОВ

АО «Элемент», Одесса, Украина

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОСТРАНСТВА СОСТОЯНИЙ В ФОРМЕ ГАММЕРШТЕЙНА

Предложен подход к решению проблемы создания и реализации класса новых математических моделей процессов управляемого изменения состояния силовых и энергетических установок для получения оценок выходных переменных, недоступных для непосредственного измерения, с помощью разработанных методов эквивалентных и аппроксимационных преобразований моделей в виде нелинейных дифференциальных уравнений пространства состояний к математической модели в форме Гаммерштейна с линейной частью в виде многомерной следящей системы, что позволило учесть априорную информацию о нелинейных статических характеристиках и динамику отклонений от них и за счет этого уменьшить ошибки моделирования и вычислительную сложность реализации математических моделей.

Ключевые слова: *математическая модель, процессы управляемого изменения состояния, оценка состояния, форма Гаммерштейна.*

Введение

Состояние силовых и энергетических установок (СиЭУ) определяется по их выходным переменным, наиболее важные из которых (располагаемая мощность, тяга, запас газодинамической устойчивости и др.) недоступны для непосредственного измерения в эксплуатационных условиях. Оценки таких переменных могут быть получены только методами математического моделирования, для реализации которых в современных технических средствах управления, контроля и диагностирования состояния необходимы соответствующие математические модели (ММ).

Требования к таким моделям обусловлены также необходимостью их реализации непосредственно в составе бортовых и наземных технических средств, а именно:

– ошибки моделирования должны быть сопоставимы с ошибками измерительных каналов (ИК) для непосредственно измеряемых переменных (параметров);

– временной такт выдачи данных (время моделирования) не должен превышать временной такт указанных цифровых ИК.

Таким образом, указанные ММ должны давать возможность получения оценок переменных, недоступных для непосредственного измерения, с допустимыми ошибками и в масштабе времени, близкому к реальному.

1. Формулирование проблемы

Известные термогазодинамические [1 - 4] и феменологические [4 - 6] математические модели не разрешают существующее противоречие между необходимой и достижимой (на их основе) точностью воспроизведения недоступных для непосредственного измерения выходных переменных, что обеспечивает реализацию исследования процессов изменения состояния, перспективных методов управления, контроля и диагностирования технического состояния объектов, а также противоречие между вычислительной сложностью ММ и возможностями их реализации в бортовых и наземных средствах.

Целью работы является компьютерная реализация математических моделей процессов управляемого изменения состояния силовых и энергетических установок, предназначенных для использования непосредственно в составе бортовых и наземных средств реального времени для управления, контроля состояния и диагностирования, которые обеспечивают получение оценок переменных, недоступных для непосредственного измерения.

2. Решение проблемы

Полагается, что все переменные в ММ приведены к САУ, а уравнения статики решены в явном виде в функции от режимной переменной

$$\vec{\chi}_{st} = \vec{\chi}_{st}(s) = \vec{\phi}(s), \vec{y}_{st} = \vec{y}_{st}(s).$$

© В. Ф. Миргород, В. В. Данилов

Тогда уравнения СиЭУ в параметризованном виде могут быть представлены следующим образом

$$d\vec{x}/dt = \vec{f}_1(\vec{x},\vec{u}(s),s), \vec{y} = \vec{f}_2(\vec{x},\vec{u}(s),s),$$

где $\vec{x}$ – вектор состояния;

$\vec{u}$ – вектор смены состояния;

$\vec{y}$ – вектор наблюдения;

$\vec{f}_1$ и $\vec{f}_2$ – вещественные векторные функции.

В [7 - 9] предложены ММ процессов управляемого изменения состояния СиЭУ, основными отличиями которых является непосредственная привязка к СХ и структурная организация в виде следящих систем. Такие ММ описываются следующими ДУ в пространстве состояний.

ММСС 1:

$$\left.\begin{aligned}&\frac{d\vec{x}}{dt} = J_{1xk}\left[\vec{x} - \vec{x}_{st}(s_k) - \frac{d\vec{x}_{st}(s)}{ds}\right]_{s_k} \cdot (s - s_k)\\&\vec{y} = \vec{y}_{st}(s_k) + J_{2x}\left[\vec{x} - \vec{x}_{st}(s_k)\right] - \left.\frac{d\vec{x}_{st}(s)}{ds}\right|_{s_k} \cdot (s - s_k)\end{aligned}\right].$$

ММСС 2:

$$\left.\begin{aligned}&\frac{d\vec{x}}{dt} = J_{1xk}\left[\vec{x} - \vec{x}_{st}(s_k)\right]\\&\vec{y} = \vec{y}_{st}(s_k) + J_{2x}\left[\vec{x} - \vec{x}_{st}(s_k)\right]\end{aligned}\right\}.$$

Для удобства дальнейших преобразований введем следующие обозначения

$$\left.\frac{d\vec{f}_1}{d\vec{x}}\right|_{\vec{x}=\vec{x}_k} = J_{1xk} = A_k, \left.\frac{d\vec{f}_2}{d\vec{x}}\right|_{\vec{x}=\vec{x}_k} =$$
$$= J_{2xk} = C_k, \left.\frac{d\vec{x}_{st}}{ds}\right|_{s=s_k} = \vec{b}_k.$$

При рассмотрении конкретного k-го участка аппроксимации соответствующий индекс у матриц и векторов будем опускать.

Тогда уравнения предлагаемых ММ имеют следующий вид.

ММСС 1:

$$\left.\begin{aligned}&\frac{d\vec{x}}{dt} = A_k\left[\vec{x} - \vec{x}_{st}(s_k) - \vec{b}_k(s - s_k)\right]\\&\vec{y} = \vec{y}_{st}(s_k) + C_k\left[\vec{x} - \vec{x}_{st}(s_k) - \vec{b}_k(s - s_k)\right]\end{aligned}\right\}. \quad (1)$$

ММСС 2:

$$\left.\begin{aligned}&\frac{d\vec{x}}{dt} = A_k\left[\vec{x} - \vec{x}_{st}(s_k)\right]\\&\vec{y} = \vec{y}_{st}(s_k) + J_{2x}\left[\vec{x} - \vec{x}_{st}(s_k)\right]\end{aligned}\right\}. \quad (2)$$

Для последующего определения свойств (1) и (2) установим справедливость следующих лемм.

Лемма 1

Если система является линейной и стационарной, A – сопровождающая матрица характеристического полинома, то справедливо следующее соотношение

$$\begin{aligned}&\int_{t_k}^{t} e^{A(t-\tau)} A\vec{u}(\tau)d\tau =\\&= \vec{u}(t) + e^{A(t-t_k)}\vec{u}(t_k) + \int_{t_k}^{t} e^{A(t-\tau)} d\vec{u}(\tau).\end{aligned} \quad (3)$$

Справедливость (3) следует из формулы интегрирования по частям и свойств переходной матрицы.

Лемма 2

Для любой матрицы A и ее резольвенты $(pE - A)^{-1}$, справедливо следующее соотношение

$$(pE - A)^{-1} A + E = pE(pE - A)^{-1}. \quad (4)$$

Справедливость (4) следует из представления $(pE - A)^{-1} = \left[adj(pE - A)\right]/det(pE - A)$ и свойств присоединенной матрицы.

Лемма 3

Если квадратная матрица A является неособой и $rankA = n$, то

$$rank\left[AA^2....A^n\right] = n. \quad (5)$$

Справедливость леммы следует из теоремы Кэли-Гамильтона и свойства ранга произведения матриц. Представим ММ (1) в виде:

$$\begin{aligned}&\frac{d\vec{x}}{dt} = A\left[\vec{x} - \vec{x}_{st}(s_k)\right] - A\vec{b}\Delta s,\\&\Delta\vec{y} = \vec{y} - \vec{y}_{st}(s_k) = C\left[\vec{x} - \vec{x}_{st}(s_k)\right] - C\vec{b}\Delta s.\end{aligned} \quad (6)$$

Тогда решение (6) может быть записано следующим образом

$$\begin{aligned}&\Delta\vec{x}(t) = \vec{x} - \vec{x}_{st}(s_k) =\\&= e^{A(t-t_k)}\Delta\vec{x}(t_k) - \int_{t_k}^{t} e^{A(t-\tau)} A\vec{b}\Delta s(\tau)d\tau.\end{aligned}$$

Опираясь на Лемму 1, получим

$$\Delta\vec{x}(t) = e^{A(t-t_k)}\Delta\vec{x}(t_k) + \vec{b}(s - s_k) - \int_{t_k}^{t} e^{A(t-\tau)}\vec{b}ds. \quad (7)$$

Отсюда вид решения определяется соотношением

$$\vec{x}(t) = \vec{x}_{st}(t_k) + \vec{b}(s - s_k) + \\ + e^{A(t-t_k)}\left[\vec{x}(t_k) - \vec{x}_{st}(t_k)\right] - \int\limits_{x}^{t} e^{A(t-\tau)}\vec{b}s'(\tau)d\tau. \quad (8)$$

Примечательной особенностью решения (8) является касательное приближение статики

$$\vec{x}(t) = \vec{x}_{st}(t_k) + \vec{b}(s - s_k).$$

Третье слагаемое в (2) является переходной компонентой, а четвертое – вектором сноса, записанным в известной форме интеграла Дюамеля.

Подставляя (2) во второе уравнение (6) и производя сокращение, получим решение относительно выхода

$$\Delta\vec{y}(t) = Ce^{A(t-t_k)}\left[\vec{x}(t_k) - \vec{x}_{st}(t_k)\right] - \\ - C\int\limits_{t_k}^{t} e^{A(t-\tau)}\vec{b}s'(\tau)d\tau. \quad (9)$$

Для получения передаточных функций запишем (6) в следующем виде

$$\left.\begin{aligned} \frac{d\vec{x}}{dt} &= A\vec{x} - A\left[\vec{x}_{st}(s_k) + \vec{b}\Delta s\right] \\ \vec{y} &= \vec{y}_{st}(s_k) + C\vec{x} - C\left[\vec{x}_{st}(s_k) + \vec{b}\Delta s\right] \end{aligned}\right\}. \quad (10)$$

Применяя к левой и правой частям (10) преобразование Лапласа, получим для изображений

$$X(p) = -(pE - A)^{-1} AL\left\{\vec{x}_{st}(s_k) + \vec{b}\Delta s\right\} + \\ + (pE - A)^{-1}\vec{x}(t_k). \quad (11)$$

Используя Лемму 2 в форме

$$(pE - A)^{-1} A = pE(pE - A)^{-1} - E$$

преобразуем (11) к виду

$$X(p) = -(pE - A)^{-1}\vec{x}(t_k) + L\left\{\vec{x}_{st}(s_k) + \vec{b}\Delta s\right\} - \\ - pE(pE - A)^{-1} L\left\{\vec{x}_{st}(t_k)\right\} - pE(pE - A)^{-1}\vec{b}L\{\Delta s\}.$$

Поскольку в данной модели $\vec{x}_{st}(t_k) = \text{const}$, то $L\left\{\vec{x}_{st}(t_k)\right\} = \vec{x}_{st}(t_k)/p$.

С учетом последнего представления, решение в изображениях имеет вид

$$X(p) = (pE - A)^{-1}\left[\vec{x}(t_k) - \vec{x}_{st}(t_k)\right] + \\ + L\left\{\vec{x}_{st}(s_k) + \vec{b}\Delta s\right\} - (pE - A)^{-1}\vec{b}pL\{\Delta s\}, \quad (12)$$

которое полностью согласуется с решением для оригиналов в виде (8).

Представляя (12) в виде соотношений для изображений выходных координат

$$L\{\Delta\vec{y}\} + CX(p) - CL\left\{\vec{x}_{st}(s_k) + \vec{b}\Delta s\right\}$$

и выполняя необходимые сокращения, получим

$$L\{\Delta\vec{y}\} = C(pE - A)^{-1}\left[\vec{x}(t_k) - \vec{x}_{st}(t_k)\right] - \\ - C(pE - A)^{-1}\vec{b}pL\{\Delta s\}, \quad (13)$$

что также соответствует решению (9) для оригиналов.

Из (12) и (13) следуют выражения для матричных передаточных функций ММСС:

$$W_{xs}(p) = \vec{b} - pE(pE - A)^{-1}\vec{b} = \\ = \left[E - pE(pE - A)^{-1}\right]\vec{b} = -(pE - A)^{-1} A\vec{b}, \quad (14)$$

$$W_{ys}(p) = pC(pE - A)^{-1}\vec{b}. \quad (15)$$

По отношению к кусочно-линейно аппроксимированной функции $\vec{x}_{st}(t) = \vec{x}_{st}(t_k) + \vec{b}\Delta s$ передаточная функция ММСС 1 является единичной.

Полученные решения и эквивалентные операторные формы ММСС 1 позволяют выяснить не только качественный характер ММ, но и являются основой для численной реализации предлагаемой модели.

Для ММ (2) фиксированными на интервалах аппроксимации являются только элементы матриц А и С. Поэтому решение (2) имеет вид

$$\vec{x}(t) = e^{A(t-t_k)}\vec{x}(t_k) - \int\limits_{t_k}^{t} e^{A(t-\tau)}A\vec{x}_{st}(\tau)d\tau. \quad (16)$$

Используя Лемму 3, (16) можно представить следующим образом

$$\vec{x}(t) = \vec{x}_{st}(t) + e^{A(t-t_k)}\left[\vec{x}(t_k) - \vec{x}_{st}(t_k)\right] - \\ - \int\limits_{t_k}^{t} e^{A(t-\tau)}\vec{x}_{st}(\tau)d\tau. \quad (17)$$

В данной ММ входом является вектор, соответствующий положению изображающей точки на СХ, а решение в явном виде имеет компоненту, отражающую изменение положения этой точки. Второе слагаемое в (17) – переходная компонента, а третья – вектор сноса, также как и в ММСС 1 записываемый в форме интеграла Дюамеля. Поэтому (17) допускает следующее приближенное представление

$$\begin{aligned}\vec{x}(t) &\approx \vec{x}_{st}(t)+e^{A(t-t_k)}\left[\vec{x}(t_k)-\vec{x}_{st}(t_k)\right]-\\ &-\int_{t_k}^{t} e^{A(t-\tau)}\vec{b}(s)\,ds=\vec{x}_{st}(t)+\\ &+e^{A(t-t_k)}\left[\vec{x}(t_k)-\vec{x}_{st}(t_k)\right]-\\ &-\int_{t_k}^{t} e^{A(t-\tau)}\vec{b}(s)s'(\tau)\,d\tau.\end{aligned} \tag{18}$$

Таким образом, если СХ аппроксимируются касательными, решение (18) совпадает с (8), что отражает более общий характер ММСС 2. Для выходных координат, соответственно, получаем

$$\begin{aligned}\Delta\vec{y}(t) &= Ce^{A(t-t_k)}\left[\vec{x}(t_k)-\vec{x}_{st}(t_k)\right]-\\ &-C\int_{t_k}^{t} e^{A(t-\tau)}x'_{st}(\tau)\,d\tau.\end{aligned} \tag{19}$$

Передаточные функции ММСС 2 образуются на основе преобразования Лапласа

$$X(p)=(pE-A)^{-1}\vec{x}(t_k)-(pE-A)^{-1}AL\{\vec{x}_{st}\}.$$

Используя Лемму 4, получим

$$\begin{aligned}X(p) &= (pE-A)^{-1}\vec{x}(t_k)+L\{\vec{x}_{st}\}-\\ &-(pE-A)^{-1}pL\{\vec{x}_{st}\}.\end{aligned} \tag{20}$$

Если учесть $pL\{\vec{x}_{st}\}=\frac{d\vec{x}_{st}}{dt}+\vec{x}_{st}(t_k)$, то (20) полностью соответствует решению (18) в оригиналах. Для выходных координат имеем

$$\begin{aligned}L\{\Delta\vec{y}\} &= CL\{\vec{x}-\vec{x}_{st}\}=\\ &=C(pE-A)^{-1}\vec{x}(t_k)-C(pE-A)^{-1}pL\{\vec{x}_{st}\}.\end{aligned} \tag{21}$$

Из (20) и (21) следуют передаточные функции ММСС 2:

$$\begin{aligned}W_{x_1x_{st}}(p) &= E-pE(pE-A)^{-1}=\\ &=-(pE-A)^{-1}A,\end{aligned} \tag{22}$$

$$W_{x_1x_{st}}(p)=-pC(pE-A)^{-1}. \tag{23}$$

Матричные передаточные функции позволяют получить в параметризованном виде частотные характеристики и оценить полосу пропускания, запасы устойчивости и другие важные свойства СиЭУ по их моделям.

Для компьютерной реализации предлагаемых ММ в бортовых и наземных средствах необходимы соотношения в виде разностных уравнений или рекуррентных соотношений. Применяемый для известных ММ способ предполагает использование метода Эйлера, который имеет известные недостатки, т.к. требует чрезмерно малых шагов временной дискретизации.

Для получения уравнений компьютерной реализации используем соотношение (18), т.к. оно обобщает, как ММСС1, так и известные ММ. Введем временной шаг дискретизации $\Delta t=t_{n+1,k}-t_{n,k}$ в пределах учета аппроксимации СХ, связанный с индексом *k*. Тогда матрица перехода имеет вид

$$A_{kx}=e^{A_k(t_{n+1,k}-t_{n,k})}=e^{A_k\Delta t}, \tag{24}$$

а вектор смены состояний описывается выражением

$$\vec{b}_{kn}=\int_{t_{k,n}}^{t_{k,n}+\Delta t} e^{A_k(t-\tau)}\vec{b}_k(s)\,ds.$$

В пределах участка аппроксимации СХ используем одну из предлагаемых кусочно-линейных аппроксимаций вектора $\vec{b}_k(s)$ – по касательной в точке перехода, по касательной в промежуточной точке, либо секущую. В любом случае $\vec{b}_k(s)=\text{const}$. Далее будем полагать, что допустимо считать, что в пределах одного участка режимная переменная изменяется кусочно-линейно. Отсюда вспомогательный вектор перехода допускает представление

$$\vec{b}_{ks}=\int_{t_{k,n}}^{t_{k,n}+\Delta t} e^{A_k(t-\tau)}\vec{b}_k\,d\tau=\int_{0}^{\Delta t} e^{A_k(t-\tau)}\vec{b}_k\,d\tau \tag{25}$$

и является постоянным в пределах участка аппроксимации СХ.

Следуя (24), (25), получаем рекуррентную процедуру вычисления значений координат вектора состояния

$$\begin{aligned}\vec{x}(t_{n+1,k}) &= \vec{x}_{st}(t_{n+1,k})+\\ &+A_{k,s}\left[\vec{x}(t_{n,k})-\vec{x}_{st}(t_{n,k})\right]-\vec{b}_{ks}s'_k(t_n),\end{aligned} \tag{26}$$

либо в следующем виде

$$\begin{aligned} &\Delta\vec{x}\left(t_{n+1,k}\right)=A_k\Delta\vec{x}\left(t_{n,k}\right)-\vec{b}_{ks}s'_k\left(t_n\right),\\ &\vec{x}\left(t_{n+1,k}\right)=\vec{x}\left(t_{n,k}\right)+\Delta\vec{x}\left(t_{n+1,k}\right). \end{aligned} \qquad (27)$$

Вектор выхода определяется соотношением

$$\vec{y}\left(t_{n+1,k}\right)=\vec{y}_{st}\left(t_{n,k}\right)+C_k\Delta\vec{x}\left(t_{n+1,k}\right). \qquad (28)$$

Для ММСС 1 соответствующие рекуррентные процедуры имеют следующий вид при тех же допущениях

$$\begin{aligned} &\vec{x}\left(t_{n+1,k}\right)=\vec{x}_{st}\left(t_k\right)+\vec{b}_{k,s}\left[s\left(t_{n,k}\right)-s\left(t_k\right)\right]+\\ &+A_k\left[\vec{x}\left(t_{n,k}\right)-\vec{x}_{st}\left(t_k\right)\right]-\vec{b}_{ks}s'_k\left(t_n\right). \end{aligned} \qquad (29)$$

Отличие (29) от (26) заключается в кусочном постоянстве значений $\vec{x}_{st}$ на участках аппроксимации.

Компьютерная реализация ММ требует определения двух наборов массивов: двумерного в виде матрицы перехода согласно (24) и одномерного в виде вектора перехода согласно (25) для заданных СХ, причем такие массивы могут быть сформированы заблаговременно для каждого из участков аппроксимации (т.е. не требуют вычислений в реальном времени). Важная особенность численной реализации предлагаемых ММ заключается в необходимости достижения соответствия значения производной режимного параметра конкретному участку аппроксимации. Такое соответствие достигается реализацией следующего алгоритма:

1) по таблично заданным СХ определяются полуотрезки участков аппроксимации $\left[s_k, s_{k+1}\right)$;

2) как только для измеренного значения режимного параметра $s\left(t_n\right)$ устанавливается принадлежность конкретному отрезку аппроксимации $s\left(t_n\right)\in\left[s_k, s_{k+1}\right)$, из массивов матриц и векторов перехода извлекаются их конкретные значения, соответствующие данному участку, т.е. формируются $s\left(t_{n,k}\right)A_{kx}, \vec{b}_{ks}$;

3) для каждого из интервалов счета определяется оценка $s'_k\left(t_n\right)$, например, один из известных численных методов оценки производной непрерывно изменяющейся функции времени;

4) формируются согласно (27), (28), (29) моделируемые значения переменных и осуществляется возврат к п. 2.

Алгоритм компьютерной реализации предлагаемых ММ в наиболее отчетливом виде иллюстрируют их преимущества, а именно: жесткая и физически объяснимая привязка к ходу изображающей точки на СХ, повышение точности за счет точных методов, определения матрицы перехода, физически объяснимый учет зависимостей от скорости перемещения изображающей точки на СХ. Таким образом, имея в виду целевую установку работы в получении ММ, реализуемых в бортовых технических средствах в масштабе времени, близком к реальному, предлагается следующий алгоритм реализации:

1) наборы матриц A_k, C_k для каждого из участков аппроксимации (при необходимости B_k, D_k) задаются в виде таблиц (массивов) СХ основных переменных;

2) заранее вычисляются для заданного интервала временной дискретизации Δt массивы матриц перехода A_k и вспомогательных векторов перехода $\vec{b}_k$;

3) вычисляются по полиномиальной модели данные в реальном времени о значениях $\vec{x}_{st}$ и $\vec{y}_{st}$ в зависимости от имеющихся данных значений режимной переменной – статическая модель;

4) вычисляются в реальном времени данные о значениях скорости изменения режимной переменной;

5) формируются в реальном времени моделируемые значения переменных в динамике согласно (19), (21), (25).

Заключение

Основные результаты работы заключаются в том, что предлагается и обосновывается подход к решению проблемы получения и вычислительной реализации новых математических моделей управляемого изменения состояния силовых и энергетических установок на основе эквивалентных преобразований моделей, представленных в общем виде нелинейных дифференциальных уравнений к математической модели в форме Гаммерштейна, в которой нелинейный оператор воспроизводит статические характеристики объекта, а линейная часть организована в виде астатической многомерной следящей системы, что обеспечивает уменьшение ошибок моделирования, а также сокращение вычислительных ресурсов, необходимых для компьютерной реализации.

Литература

1. Арьков, В. Ю. Идентификация динамических моделей САУ ГТД и их элементов статистическими методами [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.01 / Арьков В.Ю. – Уфа, 2002. – 372 с.

2. Гольберг, Ф. Д. Математические модели газотурбинных двигателей как объектов управления [Текст] / Ф. Д. Гольберг, А. В. Батенин. – М. :

Наука, 1999. – 80 с.

3. Добрянский, Г. В. Динамика авиационных ГТД [Текст] / Г. В. Добрянский, Т. С. Мартьянова. – М. : Машиностроение, 1989. – 240 с.

4. Гуревич, О. С. Состояние и перспективы развития систем автоматического управления авиационными газотурбинными двигателями [Текст] / О. С. Гуревич // ЦИАМ 2001–2005. Основные результаты научно–технической деятельности. – М. : ЦИАМ, 2005. – С. 267–270.

5. Епифанов, С. В. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей [Текст] / С. В. Епифанов, Б. И. Кузнецов, И. И. Богаенко. – К. : Техника, 1998. – 312 с.

6. Тунаков, А. П. Классификация математических моделей ГТД I [Текст] / А. П. Тунаков // Изв. вузов. Авиац. техника. – 1986. – № 4. – С. 99–101.

7. Миргород, В. Ф. Эквивалентные формы линейных математических моделей процессов управления объектами энергетики [Текст] / В. Ф. Миргород, И. М. Гвоздева // Електромашинобудування та електрообладнання : зб. наук. праць. – К. : Техніка, 2010. – Вип. 76. – С. 180-186.

8. Миргород, В. Ф. Аппроксимационные формы математических моделей процессов управления нелинейными объектами [Текст] / В. Ф. Миргород, И. М. Гвоздева // Системні технології: регіональний міжвуз. зб. наук. праць. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 2 (73). – С. 122-129.

9. Миргород, В. Ф. Новые формы математических моделей изменения состояния нелинейных динамических объектов [Текст]/ В. Ф. Миргород, И. М. Гвоздева, А. Ю. Кузьменко // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2011. – № 7 (84). – С. 208-211.

Поступила в редакцию 8.06.2014, рассмотрена на редколлегии 16.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С. Г. Антонщук, Одесский национальный политехнический университет, Одесса.

ОБЧИСЛЮВАЛЬНА РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОСТОРУ СТАНІВ У ФОРМІ ГАММЕРШТЕЙНА

В. Ф. Миргород, В. В. Данилов

Запропоновано підхід до вирішення проблеми створення і реалізації класу нових математичних моделей процесів керованої зміни стану силових і енергетичних установок для отримання оцінок вихідних змінних, недоступних для безпосереднього виміру, за допомогою розроблених методів еквівалентних і апроксимаційних перетворень моделей у вигляді нелінійних диференціальних рівнянь простору станів до математичній моделі у формі Гаммерштейна з лінійною частиною у вигляді багатовимірної системи, що стежить, що дозволило врахувати апріорну інформацію про нелінійні статичні характеристики і динаміку відхилення від них і за рахунок цього зменшити помилку моделювання та обчислювальну складність реалізації математичних моделей.

Ключові слова: математична модель, процеси керованої зміни стану, оцінка стану, форма Гаммерштейна.

CALCULABLE REALIZATION OF MATHEMATICAL MODELS OF STATE SPACE IN FORM HAMMERSHTEIN

V. F. Mirgorod, V. V. Danilov

Offered approach to the solution of problem of creation and realization of class of new mathematical models for processes of the change of the power and power options state for derivation of outgoing variables estimations which are inaccessible for the direct measuring. Approach is realized by the help of the developed methods of equivalent and approximation models transformations in the form of nonlinear differential equalizations of state space to the mathematical model in form Hammershtein with linear part in the form of tracker system .It allowed to take into account a priori information about nonlinear static characteristics and dynamics of deviations from them and due to what to decrease modeling errors and calculable complication of realization model mathematical.

Keywords: mathematical model, processes of the controlled change of the state, estimation of the state, form of Hammershtein.

Миргород Владимир Федорович – вед. науч. сотр. АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail: odessa@element.od.ua.

Данилов Всеволод Владимирович – вед. инженер-программист АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail: odessa@element.od.ua.