

Системный анализ, управление и автоматизация

УДК 621.3.078

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТОМ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МАСЛА

С. В. Алимов¹, Л. А. Мигачева², А. В. Стариков², А. Р. Титов³

¹ ОАО «Газпром»
Россия, 117997, ГСП-7, г. Москва, ул. Наметкина, 16

² Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

³ ДООАО «Центрэнергогаз»
Россия, 117630, г. Москва, ул. Обручева, 23, стр. 3

Синтезирована двухконтурная система стабилизации температуры для аппарата воздушного охлаждения масла, отличающаяся малой чувствительностью к изменению параметров объекта управления. Разработана структурная схема системы стабилизации температуры. Произведен параметрический синтез регуляторов, позволяющий настроить систему управления аппарата воздушного охлаждения масла на желаемый характер переходного процесса. Построены области качества регулирования разработанной системы. Разработана методика выбора параметров регуляторов.

Ключевые слова: *аппарат воздушного охлаждения масла, система управления, структурная схема, передаточная функция, пропорционально-дифференциальный регулятор, интегральный регулятор, аperiodический фильтр.*

Газоперекачивающие агрегаты магистральных газопроводов имеют в своем составе маслосистемы, предназначенные для смазки гидростатических подшипников скольжения. В процессе работы агрегата масло нагревается и поступает в аппарат воздушного охлаждения (АВО). Теплообменник АВО обдувается с помощью вентиляторов охлаждающим воздухом, и за счет этого температура масла снижается до необходимого уровня. Вентилятор приводится во вращение асинхронным электродвигателем. В последнее время с целью экономии электроэнергии АВО масла оснащают частотными преобразователями и создают замкнутые по датчикам температуры системы управления.

Сергей Викторович Алимов (к.т.н.), первый заместитель начальника департамента по транспортировке, подземному хранению и использованию газа ОАО «Газпром».

Людмила Алексеевна Мигачева (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Материаловедение и товарная экспертиза».

Александр Владимирович Стариков (д.т.н., доц.), доцент кафедры «Электропривод и промышленная автоматика»

Андрей Римович Титов, заместитель генерального директора ДООАО «Центрэнергогаз».

Особенностью функционирования АВО масла является широкий диапазон изменения температуры охлаждающего воздуха. В связи с этим известные системы управления АВО требуют перенастройки регуляторов [1].

Цель настоящей работы заключается в структурно-параметрическом синтезе системы управления АВО масла, отличающейся малой чувствительностью к изменению параметров объекта, связанных с изменением температуры охлаждающего воздуха.

В связи с поставленной целью при выборе структурного построения будем ориентироваться на хорошо известные в области следящих электроприводов и электромагнитных подшипников многоконтурные системы с одной измеряемой координатой [2, 3]. Отличительная особенность таких систем заключается в слабой зависимости качества регулирования и устойчивости от вариации параметров объекта управления. Минимальное количество контуров в многоконтурных системах с одной измеряемой координатой – два.

Применительно к АВО масла структурная схема двухконтурной системы с одной измеряемой координатой принимает вид, приведенный на рис. 1. На ней представлены прежде всего передаточные функции обобщенного объекта управления, под которым понимается совокупность теплообменника, вентилятора и асинхронного электродвигателя.

Передаточная функция теплообменника по отношению к управляющему воздействию – объемному расходу воздуха G_e имеет вид динамического звена второго порядка [4]

$$W_y(p) = \frac{T_m(p)}{G_e(p)} = -\frac{k_G}{a_0 p^2 + a_1 p + 1}, \quad (1)$$

где T_m – температура масла на выходе теплообменника;

a_0 , a_1 и k_G – коэффициенты, зависящие от параметров теплообменника, объемного расхода воздуха и температуры окружающей среды;

p – комплексная переменная.

Передаточную функцию (1), как правило, можно представить в виде двойного аperiodического звена

$$W_y(p) = -\frac{k_G}{(T_{11}p + 1)(T_{22}p + 1)}, \quad (2)$$

где постоянные времени T_{11} и T_{22} определяются из разложения знаменателя (1), причем для определенности будем полагать, что $T_{22} \geq T_{11}$.

Процесс теплообмена характеризуется также передаточными функциями по отношению к возмущающим воздействиям – изменениям температур масла $T_{m.вх}$ и воздуха $T_{в.вх}$ на входе в АВО:

$$W_{e1}(p) = \frac{T_m(p)}{T_{m.вх}(p)} = \frac{a_0 \Delta T_m(\tau) p^2 + \left[k_{e1} b_0 + \frac{a_1 \Delta T_m(\tau)}{\Delta T_{m.вх}} + \frac{a_0}{\Delta T_{m.вх}} \frac{dT_m(\tau)}{dt} \right] p + k_{e1}}{a_0 p^2 + a_1 p + 1} e^{-\tau p};$$

$$W_{e2}(p) = \frac{T_m(p)}{T_{в.вх}(p)} = \frac{k_{e2}}{a_0 p^2 + a_1 p + 1},$$

где τ – величина транспортного запаздывания, определяемая скоростью движения масла и длиной трубки теплообменника;

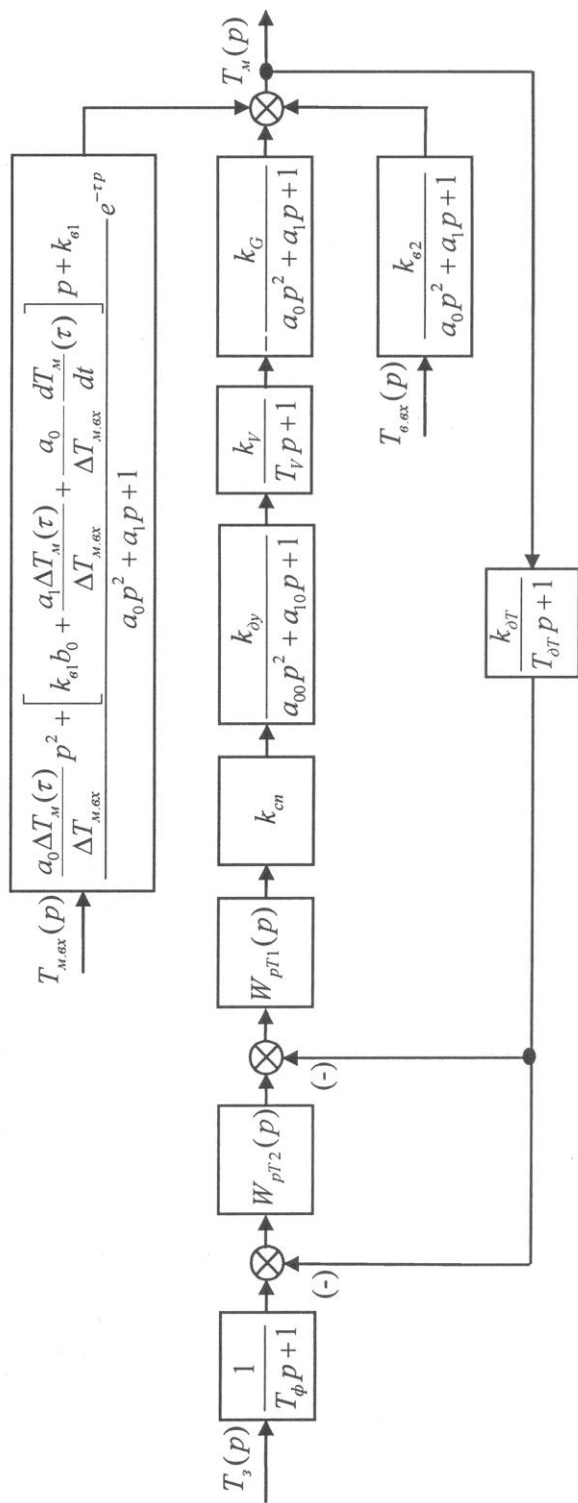


Рис. 1. Структурная схема системы управления АВО масла

b_0 , k_{e1} и k_{e2} – коэффициенты, зависящие от параметров теплообменника;
 Δ – знак приращения.

Вентилятор представлен аperiodическим звеном

$$W_V(p) = \frac{G_e(p)}{\omega(p)} = \frac{k_V}{(T_V p + 1)}, \quad (3)$$

где ω – скорость вращения рабочего колеса вентилятора;

k_V – коэффициент передачи;

T_V – постоянная времени, зависящая от длины воздухопровода и скорости ω .

Асинхронный электродвигатель в первом приближении рассматривается в виде динамического звена второго порядка

$$W_{dy}(p) = \frac{\omega(p)}{f_1(p)} = \frac{k_{dy}}{a_{00} p^2 + a_{10} p + 1}, \quad (4)$$

где f_1 – частота питающего напряжения на статоре;

k_{dy} – коэффициент передачи, определяемый числом пар полюсов;

a_{00} и a_{10} – коэффициенты, зависящие от параметров схемы замещения электродвигателя и частоты f_1 .

Система управления замкнута по датчику температуры, установленному на выходе теплообменника, с передаточной функцией

$$W_{dT}(p) = \frac{k_{dT}}{T_{dT} p + 1}, \quad (5)$$

где k_{dT} и T_{dT} – коэффициент передачи и постоянная времени датчика соответственно.

Силовой преобразователь (частотно-регулируемый привод) представлен безынерционным звеном с коэффициентом передачи k_{cn} , поскольку его инерционностью по сравнению с инерционностью объекта управления можно пренебречь.

Каждый контур системы управления оснащен своим регулятором. Регулятор внутреннего контура предназначен для компенсации наибольшей постоянной времени объекта управления. Поэтому он выбран пропорционально-дифференциальным с передаточной функцией

$$W_{pT1}(p) = -k_{nd}(T_{nd} p + 1), \quad (6)$$

где k_{nd} и T_{nd} – коэффициент передачи и постоянная времени пропорционально-дифференциального (ПД) регулятора.

Знак минус в передаточной функции регулятора учитывает тот факт, что увеличение его сигнала приводит к уменьшению выходной величины. Постоянная времени ПД-регулятора должна быть равной наибольшей постоянной времени теплообменника

$$T_{nd} = T_{22}. \quad (7)$$

Выбору величины коэффициента передачи k_{nd} этого регулятора в дальнейшем будет уделено особое внимание.

С учетом выражений (1) – (7) передаточная функция первого (внутреннего) замкнутого контура принимает вид

$$W_1(p) = \frac{T_{\partial T} p + 1}{k_{\partial T} [a_{01} p^5 + a_{11} p^4 + a_{21} p^3 + a_{31} p^2 + a_{41} p + 1]}, \quad (8)$$

где $a_{01} = \frac{a_{00} T_V T_{11} T_{\partial T}}{k}$; $a_{11} = \frac{a_{00} T_{11} T_V + T_{\partial T} [a_{10} T_{11} T_V + a_{00} (T_{11} + T_V)]}{k}$;

$$a_{21} = \frac{a_{10} T_{11} T_V + a_{00} (T_{11} + T_V) + T_{\partial T} [T_{11} T_V + a_{10} (T_{11} + T_V) + a_{00}]}{k}$$

$$a_{31} = \frac{T_{11} T_V + a_{10} (T_{11} + T_V) + T_{\partial T} (a_{10} + T_{11} + T_V)}{k}; \quad a_{41} = \frac{a_{10} + T_{11} + T_V + T_{\partial T}}{k};$$

$$k = k_{\text{но}} k_{\text{ст}} k_{\partial y} k_V k_G k_{\partial T}.$$

Регулятор второго (внешнего) контура выбирается интегральным с передаточной функцией

$$W_u(p) = \frac{1}{T_u p},$$

где T_u – постоянная времени интегрального регулятора.

Интегральный регулятор предназначен для компенсации всех помех, действующих в замкнутой системе после его выхода, и в частности для компенсации возмущений по входной температуре масла $T_{\text{м.вх}}$ и температуре охлаждающего воздуха $T_{\text{в.вх}}$.

Передаточная функция второго замкнутого контура

$$W_2(p) = \frac{T_{\partial T} p + 1}{k_{\partial T} [a_{01} T_u p^6 + a_{11} T_u p^5 + a_{21} T_u p^4 + a_{31} T_u p^3 + a_{41} T_u p^2 + T_u p + 1]}. \quad (9)$$

На входе системы установлен апериодический фильтр с передаточной функцией

$$W_\phi(p) = \frac{1}{T_\phi p + 1},$$

где T_ϕ – постоянная времени фильтра, величина которой выбирается из соотношения

$$T_\phi = T_{\partial T}$$

для компенсации форсирующей составляющей в (9). С учетом фильтра передаточная функция всей замкнутой системы

$$W_3(p) = \frac{1}{k_{\partial T} [a_{01} T_u p^6 + a_{11} T_u p^5 + a_{21} T_u p^4 + a_{31} T_u p^3 + a_{41} T_u p^2 + T_u p + 1]}.$$

Она представляет собой динамическое звено шестого порядка, свойства которого целесообразно исследовать численными методами компьютерного моделирования.

В большинстве случаев величинами a_{00} , a_{10} и T_V можно пренебречь, тогда передаточная функция (8) примет вид

$$W_1(p) \approx \frac{T_{\partial T} p + 1}{k_{\partial T} \left[\frac{T_{\partial T} T_{11}}{k} p^2 + \frac{T_{\partial T} + T_{11}}{k} p + 1 \right]},$$

передаточная функция (9) также упростится

$$W_2(p) \approx \frac{T_{\partial T} p + 1}{k_{\partial T} \left[\frac{T_{11} T_{\partial T} T_u}{k} p^3 + \frac{(T_{11} + T_{\partial T}) T_u}{k} p^2 + T_u p + 1 \right]},$$

а движение всей замкнутой системы стабилизации температуры масла опишется выражением

$$W_3(p) \approx \frac{1}{k_{\partial T} \left[\frac{T_{11} T_{\partial T} T_u}{k} p^3 + \frac{(T_{11} + T_{\partial T}) T_u}{k} p^2 + T_u p + 1 \right]}. \quad (10)$$

Анализ (10) показывает, что условие устойчивости синтезируемой системы вытекает из теоремы Вышнеградского [5]

$$T_u > \frac{T_{11} T_{\partial T}}{T_{11} + T_{\partial T}}. \quad (11)$$

Выбор параметров регуляторов k_{no} и T_u предлагается производить исходя из областей качества регулирования динамической системы третьего порядка [3].

Характеристическое уравнение передаточной функции (10) имеет третий порядок

$$a_{02} p^3 + a_{12} p^2 + a_{22} p + 1 = 0, \quad (12)$$

где $a_{02} = \frac{T_{11} T_{\partial T} T_u}{k}$; $a_{12} = \frac{(T_{11} + T_{\partial T}) T_u}{k}$; $a_{22} = T_u$.

Уравнение (12) в рамках границы устойчивости (11)

$$a_{12} a_{22} \geq a_{02}$$

может иметь либо три отрицательных вещественных корня, что соответствует аperiodическому переходному процессу, либо один вещественный и пару комплексно-сопряженных корней. Второй случай можно разбить на два возможных варианта. Если действительный корень находится ближе к мнимой оси, чем комплексно-сопряженные, то это соответствует монотонному характеру переходного процесса, при котором не будет наблюдаться перерегулирования. В случае, когда комплексно-сопряженные корни находятся ближе к мнимой оси, переходный процесс будет иметь колебательный характер. Учитывая, что колебательный переходный процесс нежелателен для системы управления АВО масла, определим области сочетания параметров, где наблюдаются аperiodический и монотонный переходные процессы.

Область аperiodичности переходных процессов определяется системой неравенств [2]

$$\left. \begin{aligned} a_{12} &\leq \frac{a_{22}^2}{3}; \\ a_{02(1)} &< a_{02} < a_{02(2)}, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где

$$a_{02(1,2)} = \frac{1}{27} \left(9a_{12} a_{22} - 2a_{22}^3 \mp 2\sqrt{a_{22}^6 - 9a_{12} a_{22}^4 + 27a_{12}^2 a_{22}^2 - 27a_{12}^3} \right). \quad (14)$$

Подставляя в (13) и (14) значения коэффициентов из (12), получим систему неравенств, выраженную через параметры настройки системы управления АВО масла

$$\left. \begin{aligned} \frac{T_{11} + T_{\partial T}}{k} &\leq \frac{T_u}{3}; \\ \frac{T_{11} T_{\partial T}}{k} &\underset{(1)}{<} \frac{T_{11} T_{\partial T}}{k} \underset{(1,2)}{<} \frac{T_{11} T_{\partial T}}{k} \underset{(2)}{<} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где

$$\frac{T_{11} T_{\partial T}}{k} \underset{(1,2)}{=} \frac{1}{27} \left(\frac{9(T_{11} + T_{\partial T})T_u}{k} - 2T_u^2 \mp 2 \sqrt{T_u^4 - \frac{9(T_{11} + T_{\partial T})T_u^3}{k} + \frac{27(T_{11} + T_{\partial T})^2 T_u^2}{k^2} - \frac{27(T_{11} + T_{\partial T})^3 T_u}{k^3}} \right). \quad (16)$$

Область монотонности переходных процессов определяется системой неравенств [2]

$$\left. \begin{aligned} a_{12} &\leq \frac{3a_{22}^2}{8}; \\ a_{02(3)} &< a_{02} < a_{02(4)}, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где

$$a_{02(3,4)} = \frac{1}{6} \left(a_{12} a_{22} \mp \sqrt{a_{12}^2 a_{22}^2 - \frac{8}{3} a_{12}^3} \right). \quad (18)$$

Подставляя значения коэффициентов a_{02} , a_{12} и a_{22} из (12) в (17) и (18), получим следующую систему неравенств:

$$\left. \begin{aligned} \frac{T_{11} + T_{\partial T}}{k} &\leq \frac{3T_u}{8}; \\ \frac{T_{11} T_{\partial T}}{k} &\underset{(3)}{<} \frac{T_{11} T_{\partial T}}{k} \underset{(3,4)}{<} \frac{T_{11} T_{\partial T}}{k} \underset{(4)}{<} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

где

$$\frac{T_{11} T_{\partial T}}{k} \underset{(3,4)}{=} \frac{1}{6} \left(\frac{(T_{11} + T_{\partial T})T_u}{k} \mp \sqrt{\frac{(T_{11} + T_{\partial T})^2 T_u^2}{k^2} - \frac{8(T_{11} + T_{\partial T})^3 T_u}{3k^3}} \right). \quad (20)$$

Выражения (15), (16), (19) и (20) позволяют построить области качества регулирования системы управления АВО масла на плоскости параметров $\frac{T_{11} T_{\partial T}}{k}$ и $\frac{T_{11} + T_{\partial T}}{k}$, промасштабированных через величину постоянной времени T_u (рис. 2).

Области качества регулирования позволяют настроить систему управления АВО масла на желаемый характер переходного процесса.

Методика настройки разрабатываемой системы управления АВО масла заключается в следующем. Для того чтобы получить отработку задающего процесса без перерегулирования, необходимо расположить изображающую точку М на плоскости параметров таким образом, чтобы она находилась либо в области апериодичности, либо в области монотонности. При этом следует учитывать, что параметры объекта управления меняются в широких пределах. Поэтому изображающую точку необходимо располагать с некоторым запасом от границы области колебательности. Следует также помнить, что чем дальше изображающая

точка от оси абсцисс и ближе к оси ординат, тем большего быстродействия можно добиться от системы управления АВО масла.

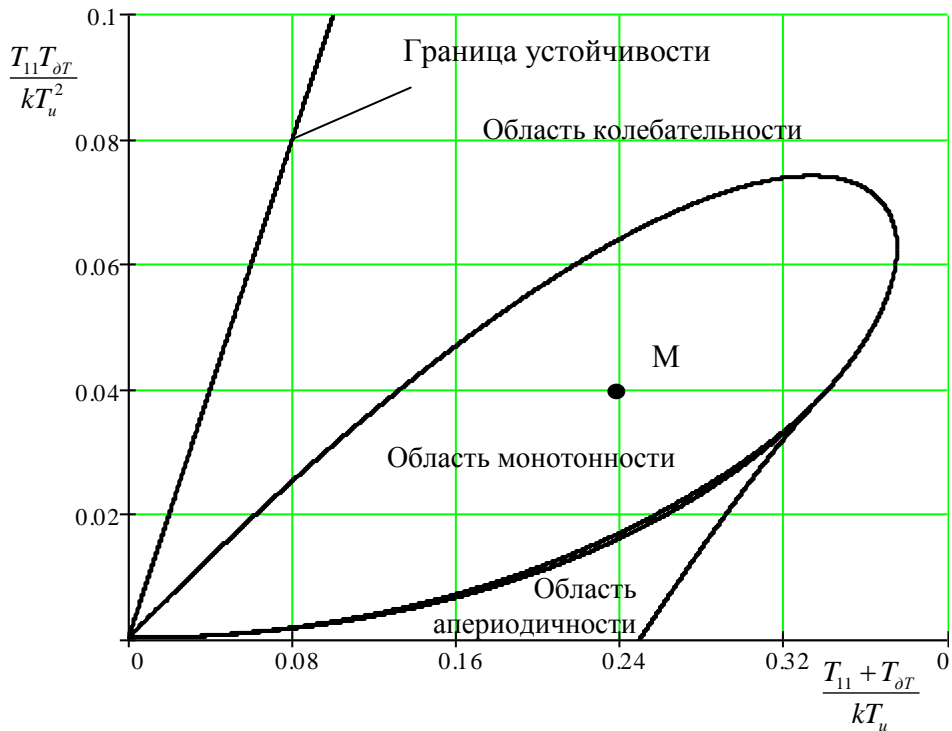


Рис. 2. Области качества регулирования синтезируемой системы управления АВО масла

Для рассматриваемого примера, приведенного на рис. 2, изображающая точка имеет координаты $M(0,24; 0,04)$. Эти координаты позволяют составить систему уравнений для определения требуемых параметров регуляторов $k_{но}$ и T_u :

$$\left. \begin{aligned} T_{11}T_{\delta T} &= 0,04kT_u^2; \\ T_{11} + T_{\delta T} &= 0,24kT_u. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Полагая, что величины постоянных времени T_{11} и $T_{\delta T}$ известны, подстановкой kT_u из второго уравнения (21) в первое получим выражение для определения постоянной времени T_u интегрального регулятора

$$T_u = \frac{6T_{11}T_{\delta T}}{T_{11} + T_{\delta T}}.$$

Коэффициент передачи k разомкнутого внутреннего контура определяется из второго уравнения системы (21)

$$k = \frac{T_{11} + T_{\delta T}}{0,24T_u}.$$

Отсюда вытекает требуемая величина коэффициента передачи ПД-регулятора

$$k_{no} = \frac{T_{11} + T_{\partial T}}{0,24T_u k_{cn} k_{\partial y} k_V k_G}.$$

Полученные результаты позволяют записать более общие выражения для расчета параметров регуляторов из областей качества регулирования:

$$T_u = \frac{d_a T_{11} T_{\partial T}}{d_o (T_{11} + T_{\partial T})}; k_{no} = \frac{T_{11} + T_{\partial T}}{d_a T_u k_{cn} k_{\partial y} k_V k_G},$$

где d_a – абсцисса;

d_o – ордината изображающей точки $M(d_a; d_o)$ на плоскости параметров

$$\frac{T_{11} T_{\partial T}}{k T_u^2} \text{ и } \frac{T_{11} + T_{\partial T}}{k T_u}.$$

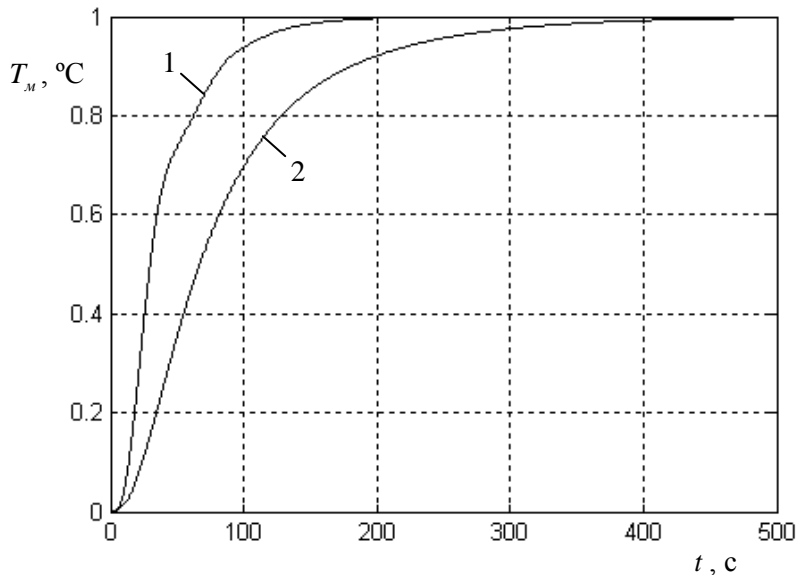


Рис. 3. Графики переходных процессов по управляющему воздействию с учетом вариации параметров объекта управления

Применительно к АВО масла типа 06-10 произведем расчет параметров регуляторов для изображающей точки, изображенной на рис. 2. Параметры регуляторов необходимо выбирать для режима, когда объект управления имеет наибольшие значения коэффициента передачи и постоянных времени. Этому режиму соответствуют температура окружающего воздуха $T_{в.ок} = -30$ °С, объемная скорость воздуха $G_{60} = 0,54$ м³/с и параметры обобщенного объекта управления: $k_G = 0,9943$ с·град./м³; $T_{11} = 6,8156$ с; $T_{22} = 60,4694$ с; $k_V = 0,4042$ м³/рад; $T_V = 1,202$ с; $k_{\partial y} = 1,57$ рад; $a_{00} = 0,1011$ с²; $a_{10} = 0,5939$ с. Коэффициент передачи силового преобразователя принципиально равен $k_{cn} = 1$. Датчик температуры, установленного в АВО масла, характеризуется постоянной времени $T_{\partial T} = 40$ с. Поскольку задающий сигнал в системе управления формируется в тех же величинах, что и выходная величина, то коэффициент передачи датчика температуры $k_{\partial T} = 1$.

Для исходных данных, приведенных выше, несложно рассчитать требуемые

параметры настройки регуляторов и аperiodического фильтра:

$$T_{no} = 60,4694 \text{ с}; k_{no} = 8,9; T_u = 35 \text{ с}; T_{\phi} = 40 \text{ с}.$$

Моделирование синтезированной системы управления АВО масла показывает, что при выбранных настройках регуляторов она устойчиво работает с обеспечением монотонных переходных процессов во всем возможном диапазоне температур охлаждающего воздуха – от -30 до $+40$ °С (рис. 3). Кривая 1 соответствует начальным условиям $T_{\text{в.вх}} = -30$ °С, $G_{\text{в0}} = 0,54$ м³/с, а кривая 2 – $T_{\text{в.вх}} = 40$ °С, $G_{\text{в0}} = 27,2$ м³/с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Росеев Н. Н.* Создание энергоэффективной системы автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения масла на основе частотно-регулируемого электропривода // Дисс. ... канд. техн. наук. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2006. – 126 с.
2. *Галицков С. Я., Галицков К. С.* Многоконтурные системы управления с одной измеряемой координатой: Монография. – Самара: СГАСУ, 2004. – 140 с.
3. *Макаричев Ю. А., Стариков А. В.* Теоретические основы расчета и проектирования радиальных электромагнитных подшипников. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 150 с.
4. *Алимов С. В., Мигачева Л. А., Титов А. Р.* Передаточные функции теплообмена в аппарате воздушного охлаждения масла // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 4 (36). – Самара: СамГТУ, 2012. – С. 198–205.
5. *Бесекинский В. А., Попов Е. П.* Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975.

Статья поступила в редакцию 5 января 2014 г.

STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS OF CONTROL SYSTEM BY THE USE OF OIL AIR-COOLING UNIT

S. V. Alimov¹, L. A. Migacheva², A. V. Starikov², A. R. Titov³

¹ OAO "GASPROM"

16, Nametkina, Moscow, GSP-7, 117997, Russian Federation

² Samara State Technical University

244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

³ DOAO "Centrenergogas"

3 str., h. 23, Obrucheve, Moscow, 117630, Russian Federation

The two-circuit system of stabilization of temperature for oil air-cooling unit is synthesized. The block diagram of stabilization temperature is developed. Parametrical synthesis of the regulators is made, allowing to adjust a control system of the device of oil air cooling on desirable character of transient process. Quality regulation areas of the developed system are constructed. The technique of parameters choice of regulators is developed.

Keywords: *air-cooling unit of oil, control system, block diagram, transfer function, proportional-differential regulator, integral regulator, aperiodic filter.*

Sergey V. Alimov, First Deputy Head of the Department.

Liudmila A. Migacheva (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Alexander V. Starikov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Andrey R. Titov, Deputy Director General.

УДК 621.391

СИНТЕЗ НЕЛИНЕЙНЫХ АДАПТИВНЫХ КИХ-ФИЛЬТРОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СИГНАЛОВ***В.И. Батищев, И.И. Волков, А.Г. Золин***Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: zolin.a.g@gmail.com

Рассмотрен метод построения обратных нелинейных нестационарных цифровых фильтров для решения обратных задач восстановления сигналов. Восстановление представленным методом возможно в случае применения к исходному сигналу фильтра с известной конечной импульсной характеристикой. Поиск импульсной характеристики обратного фильтра основывается на аппроксимационном подходе. В качестве критериев адекватности полученных решений рассматриваются два: критерий полного совпадения исходного и восстановленного сигналов и критерий минимума взвешенной квадратической погрешности. Апробация алгоритмов выполнена путем восстановления сигналов в виде различных аналитических функций.

Ключевые слова: критерий минимума взвешенной квадратической погрешности, КИХ-фильтр, весовая функция, обратный фильтр, восстановление сигнала.

В настоящее время при решении задач обработки и интерпретации экспериментальных данных часто возникает необходимость рассмотрения обратной задачи, заключающейся в восстановлении неизвестного входного воздействия по результатам регистрации откликов на выходе средств измерения. В большинстве случаев это задача компенсации искажающего действия аппаратной функции, обеспечивающая улучшение разрешающей способности различного рода измерительных приборов и систем. В случае, когда для обработки доступна только часть искаженного сигнала, без начальных условий, задача становится недоопределенной и, соответственно, некорректной.

На сегодняшний день методология синтеза оптимальных алгоритмов восстановления сигналов разработана достаточно полно. Однако существующие методы либо требуют для своей реализации не всегда доступной априорной информации, либо сталкиваются с вычислительными проблемами, связанными с некорректностью обратных задач и необходимостью использования регуляризующих процедур [1, 2].

В статье предлагаются алгоритмы синтеза нелинейных нестационарных (адаптивных) цифровых фильтров для решения задач восстановления сигналов, основанные на построении модели весовой функции обратного фильтра с использованием двух подходов: критерия полного соответствия и критерия минимума взвешенной среднеквадратической погрешности [3, 4].

Виталий Иванович Батищев (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Информационные технологии».

Игорь Иванович Волков (к.т.н., доцент), доцент кафедры «Информационные технологии».

Алексей Георгиевич Золин (к.т.н., доцент), доцент кафедры «Информационные технологии».

Пусть наблюдается ряд

$$y(j) = \sum_{i=0}^{N_0-1} h_0(i)x(j-i), \quad (1)$$

представляющий собой ряд $x(j)$, обработанный фильтром с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтром) с известной весовой функцией $h_0(i)$. Требуется восстановить ряд $x(j)$ по ряду $y(j)$. Начальные условия неизвестны. Оценку ряда x в момент времени m будем искать по алгоритму

$$x'(m) = \sum_{v=0}^p h(v)y(m-v), \quad (2)$$

где p – величина участка ряда y , по которой определяется оценка x .

Подставив в (1) вместо $x(j)$ $x'(j)$ из (2), получим

$$y'(j) = \sum_{v=0}^p h(v) \sum_{i=0}^{N_0-1} h_0(i)y(j-i-v). \quad (3)$$

Значения $y'(j)$ при идеальной обратной фильтрации будут совпадать со значениями $y(j)$, а при реальной будут отличаться от них. Весовая функция $h(v)$ обратного фильтра должна выбираться такой, чтобы это отличие было наименьшим.

Для простоты перепишем соотношение (3) в следующем виде:

$$y'(m-j) = \sum_{v=0}^p h(v) \sum_{i=0}^{N_0-1} h_0(i)y(m-i-j+v).$$

Введем обозначение

$$D(k) = \sum_{i=0}^{N_0-1} h_0(i)y(m-i-k), \quad k = \overline{0, 2p}. \quad (4)$$

Тогда

$$y'(m-j) = \sum_{v=0}^p h(v)D(j+v). \quad (5)$$

Отметим, что значения $D(k)$ будут зависеть от значения текущего момента времени.

Синтезируем алгоритмы вычисления весовой функции $h(v)$ обратного фильтра по различным критериям.

Критерий совпадения

$$y'(j) = y(j), \quad j = \overline{m, m-p}$$

или

$$y'(m-j) = y(m-j), \quad j = \overline{0, p}. \quad (6)$$

Из (6) с учетом (5) получим систему уравнений для вычисления значений $h(v)$

$$\sum_{v=0}^p h(v)D(j+v) = y(m-j), \quad j = \overline{0, p}. \quad (7)$$

Значения $h(v)$, найденные из этой системы уравнений, будут зависеть от значений текущего момента времени m и от $y(j)$.

Решение системы уравнений (7) может быть осуществлено по одному из следующих алгоритмов.

Общая часть:

$$D(k) = \sum_{i=0}^{N_0-1} h_0(i) y(m-i-k), \quad k = \overline{0, 2p};$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E(v, j) = D(v+j) - \sum_{k=0}^{j-1} C(j, k) E(v, k); \\ C(v, j) = \frac{E(v, j)}{E(j, j)}; \\ v = \overline{0, p}; \\ j = \overline{0, v}. \end{array} \right.$$

Алгоритм 1:

$$\left\{ \begin{array}{l} g(0, 0) = 1; \\ g(v, v) = 1; \\ g(v, k) = - \sum_{j=k+1}^v g(v, j) C(j, k), \quad v = \overline{1, p}, \quad k = \overline{v-1, 0}; \\ H(k, q) = \sum_{v=k}^p \frac{g(v, k) g(v, q)}{E(v, v)}, \quad k = \overline{0, p}, \quad q = \overline{0, k}; \\ h(k) = \sum_{q=0}^p H(k, q) y(m-q), \quad k = \overline{0, p}; \\ H(k, q) = H(q, k). \end{array} \right. \quad (8)$$

Алгоритм 2:

$$\left\{ \begin{array}{l} E(v) = y(m-v) - \sum_{j=0}^{v-1} C(v, j) E(j), \quad v = \overline{0, p}; \\ h(k) = \frac{E(k) - \sum_{v=k+1}^p h(v) E(v, k)}{E(k, k)}, \quad k = \overline{p, 0}. \end{array} \right. \quad (9)$$

Критерий минимума взвешенной квадратичной погрешности

Взвешенная квадратичная погрешность определяется соотношением

$$\varepsilon(m) = \sum_{j=0}^{N-1} w(j) (y'(m-j) - y(m-j))^2, \quad N = p+1. \quad (10)$$

Для обеспечения минимума этой погрешности должно быть выполнено условие

$$\frac{d\varepsilon(m)}{dh(k)} = 0, k = \overline{0, p}.$$

Это условие с учетом (10) сводится к системе уравнений

$$\sum_{v=0}^p h(v) \sum_{j=0}^{N-1} w(j) D(j+v) D(j+k) = \sum_{j=0}^{N-1} w(j) D(j+k) y(m-j), k = \overline{0, p}.$$

Для простоты введем обозначения:

$$\begin{cases} \Psi(v, k) = \sum_{j=0}^{N-1} w(j) D(j+v) D(j+k); \\ \psi(k) = \sum_{j=0}^{N-1} w(j) D(j+k) y(m-j). \end{cases} \quad (11)$$

Тогда получим такую систему уравнений:

$$\sum_{v=0}^p h(v) \Psi(v, k) = \psi(k), k = \overline{0, p}. \quad (12)$$

Для ее решения получаем следующий алгоритм:

$$\begin{cases} E(v, j) = \Psi(v, j) - \sum_{k=0}^{j-1} C(j, k) E(v, k); \\ C(v, j) = \frac{E(v, j)}{E(j, j)}; \\ v = \overline{0, p}; \\ j = \overline{0, v}; \\ E(v) = \psi(v) - \sum_{j=0}^{v-1} C(v, j) E(j), v = \overline{0, p}; \\ h(k) = \frac{E(k) - \sum_{v=k+1}^p h(v) E(v, k)}{E(k, k)}, k = \overline{p, 0}. \end{cases} \quad (13)$$

Апробация алгоритмов

Исследуя алгоритмы (8) и (13) на примерах, для простых случаев можно получить аналитические выражения весовой функции обратного фильтра. Рассмотрим в качестве исходного сигнала x различные виды элементарных функций. В качестве прямого фильтра возьмем фильтр с весовой функцией $h_0(k) = 1/3, k = \{0, 1, 2\}$.

Показательная функция:

$$x(m) = A\lambda^m.$$

Используя алгоритм (8), для данного случая можно аналитически получить значение весовой функции обратного фильтра

$$\begin{cases} p = 0; \\ h(0) = \frac{3\lambda^2}{1 + \lambda + \lambda^2}, \end{cases}$$

что дает нам абсолютно точное решение задачи.

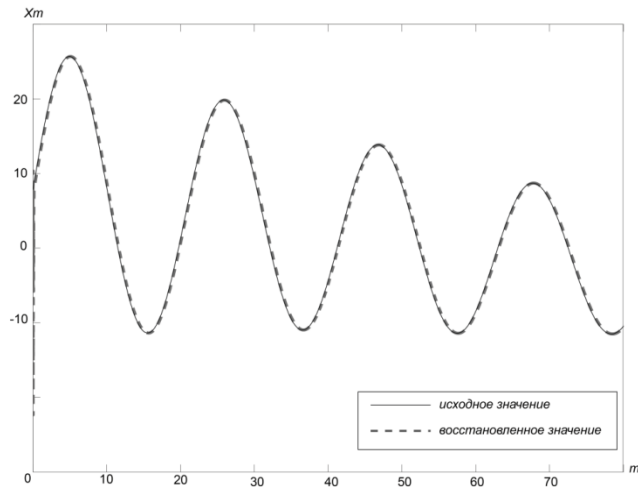
Полиномиальная функция:

$$x(m) = C_0 + C_1 m + C_2 m^2.$$

Для данного случая получим значение весовой функции обратного фильтра:

$$\begin{cases} p = 2; \\ h = \left\{ \frac{8}{3}, -\frac{7}{3}, \frac{2}{3} \right\}. \end{cases}$$

Применение обратного фильтра с такой весовой функцией даст нам абсолютно точное решение задачи.



Результаты восстановления $x(m)$

Тригонометрическая функция:

$$x(m) = A \cos(m\phi + \psi).$$

Используя алгоритм (8), получим значение весовой функции обратного фильтра:

$$\begin{cases} p = 1; \\ h(0) = \frac{3}{2 \cos \phi + 1} \cdot 2 \cos \phi; \\ h(1) = -\frac{3}{2 \cos \phi + 1}. \end{cases}$$

И в этом случае мы полиищаем абсолютно точное решение задачи.

Рассмотрим более сложный пример:

$$x(m) = 2 * 0.2^m + 5 * (-0.7)^m + 20 \sin(30 * m) \cdot e^{-m}.$$

Весовая функция прямого фильтра $h_0 = \{0.1, 0.3, 0.5, 1, 1, 1, 1, 1, 0.5, 0.3, 0.1\}$.

Результат восстановления по алгоритму (8) представлен на рисунке.

Относительная среднеквадратическая погрешность восстановления, вычисляемая по формуле

$$\Delta = \sqrt{\frac{\sum (x(m) - x'(m))^2}{\sum x(m)^2}},$$

в случае использования алгоритмов (8) и (13) без учета переходного процесса в начале восстановления составила 0,25%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Батищев В.И., Золин А.Г., Косарев Д.Н., Романев А.Е. Аппроксимационный подход к решению обратных задач анализа и интерпретации экспериментальных данных // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2006. – № 40. – С. 57-65.
2. Леонов А.С. Решение некорректно поставленных обратных задач. – М.: Лиبرоком, 2010.
3. Батищев В.И., Мелентьев В.С. Аппроксимационные методы и системы промышленных измерений, контроля, испытаний, диагностики. – М.: Машиностроение, 2007. – 393 с.
4. Батищев В.И., Волков И.И., Золин А.Г. Построение и оптимизация ортогональных базисных систем для аппроксимации спектрально-корреляционного анализа и идентификации линейных динамических объектов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2007. – № 40. – С. 47-52.

Статья поступила в редакцию 5 июня 2014 г.

FIR DIGITAL FILTERS SYNTHESIS FOR SOLVING SIGNAL RECONSTRUCTION USING TWO CRITERIA

V.I. Batishchev, I.I. Volkov, A.G. Zolin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The design method of the inverse nonlinear time-dependent digital filters for the solution of inverse problems of the recovery signals is given. Recovery method shown possible, in case of application to the original signal of the filter with known finite impulse response. Finding the impulse response of the inverse filter is based on the approximation approach. As a criterion for the adequacy of the solutions two criteria are considered: the criterion of complete coincidence of the original with the reconstructed signal and the criterion of the minimum weighted square error. Algorithm tests by restoring the signals in a variety of analytic functions are implemented.

Keywords: *weighted quadratic error, FIR filter, the weight function, the inverse filter, signal recovery.*

*Vitaly I. Batishchev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Igor I. Volkov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Aleksey G. Zolin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

УДК 004.891.3

АРХИТЕКТУРА МЕДИЦИНСКОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ

Н.В. Ле, В.А. Камаев, Д.П. Панченко, О.А. Трушкина

Волгоградский государственный технический университет
Россия, 400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28

E-mail: kamaev@cad.vstu.ru, panchenkodp@gmail.com, nvien.vstu@gmail.com, vamp@volgograd.ru

Рассмотрена структурная схема медицинской системы дифференциальной диагностики. Построение архитектуры экспертной системы производилось по архитектурным трехслойным шаблонам. Использование веб-ориентированных технологий при разработке сервера приложений позволяет четко разграничить на уровень логики, уровень доступа к данным и уровень представления. Разработано ядро системы с использованием объектно-ориентированной архитектуры. Предложен контур интерфейса с базой данных для решения проблемы несоответствия представления данных в системе. Также показаны режим приобретения медицинских знаний и режим медицинской консультации при работе экспертной системы. Разработанная экспертная система позволяет провести медицинскую диагностику в реальном времени в условиях неопределенности информации.

Ключевые слова: медицинская диагностика, экспертная система, архитектура системы.

Введение

В настоящее время существует необходимость применения современных информационных и коммуникационных технологий в медицине, особенно в задачах создания медицинских систем диагностики. Одним из подходов к созданию медицинских систем диагностики является теория экспертных систем. Существуют классические экспертные системы медицинской диагностики: PUFF, CADUCEUS, MYCIN, ONCOCIN и др. Использование этих систем позволяет повысить качество медицинской диагностики в клинических больницах и качество обучения в высших медицинских учебных заведениях.

Основная задача при создании экспертной системы заключается в сборе, систематизации и применении знаний о диагностике заболеваний, основанных на реальном опыте группы врачей. На практике специалисты-врачи работают в разных медицинских учреждениях. Поэтому необходимо создать распределенную экспертную систему медицинской диагностики. При этом врачи могут наполнить систему знаниями по своей медицинской специальности, которые позволят системе самостоятельно решать задачи направления пациента к врачу по его специальности на основании диагностических гипотез.

Это позволяет упростить процесс приобретения знаний за счет возможности распределения знаний по специальности и их организации ведения от группы

Ле Нгуен Виен, аспирант.

Валерий Анатольевич Камаев (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования».

Дмитрий Петрович Панченко (к.т.н.), старший преподаватель кафедры «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования».

Ольга Александровна Трушкина, магистрант.

врачей. Кроме того, обеспечивается автоматизация процесса пополнения базы знаний за счет возможности извлечения знаний из ответных писем врачей пациентам при заранее неизвестном диагностическом решении системы.

Одним из вариантов облегченного построения распределенной экспертной системы диагностики заболеваний является применение веб-ориентированных технологий. Для этого необходимо обозначать архитектурные принципы, которые в будущем обеспечат масштабируемость, гибкость, а также простоту сопровождения системы. Для обеспечения данных качеств в настоящее время широко применяются архитектурные трехслойные шаблоны. В данной архитектуре предполагаются три следующих компонента: пользовательское приложение; сервер приложений; сервер базы данных. На сервере приложений ядро системы разработано с использованием объектно-ориентированной архитектуры. Эта изолированность позволяет быстро и простыми средствами переконфигурировать систему при возникновении сбоев или при плановом обслуживании на одном из компонентов. В данной работе сервер базы данных представлен системой Microsoft SQL Server, а сервер приложений – технологиями: веб-сервер IIS; ASP.NET; ADO.NET. Роль пользователя играют веб-браузеры.

Целью работы являются описание разработанной архитектуры, а также определение основных функций медицинской экспертной системы дифференциальной диагностики, основанной на веб-ориентированных технологиях.

Основная часть

Схема архитектуры медицинской экспертной системы дифференциальной диагностики представлена на рис. 1.

Веб-браузеры предназначены для сбора информации от пациента для обработки, а также отображения ему результативной информации системы. При проектировании *сервера приложений* на основе веб-ориентированных технологий необходимо четко разграничить следующие уровни.

Уровень логики предназначен для реализации функциональности системы. Для реализации данного уровня использовано ядро, в которое включаются следующие модули: управление выводом – предоставляет пациенту возможность получить диагностическое решение, т. е. список диагностических гипотез и специальностей врачей, к которым пациенту нужно обращаться; объяснение результативной информации – позволяет сформировать журнал протоколирования вывода, т. е. поведение системы при диагностике заболеваний; приобретение медицинских знаний – предоставляет группе врачей (через посредничество инженера по знаниям) возможность редактировать существующую базу знаний или создавать новую, опираясь на их знания и опыт. База медицинских знаний содержит две следующих базы: фреймовая база знаний – предназначена для представления статических знаний о текущем состоянии области диагностики; нечеткая база знаний – предназначена для представления динамических знаний о переходе между состояниями. А рабочая память предназначена для хранения информации пациента, а также результативной информации диагностики и объяснительной информации после вывода решения. *Ядро системы* реализовано в виде программных модулей. На рис. 2 представлена структурная схема ядра данной системы.

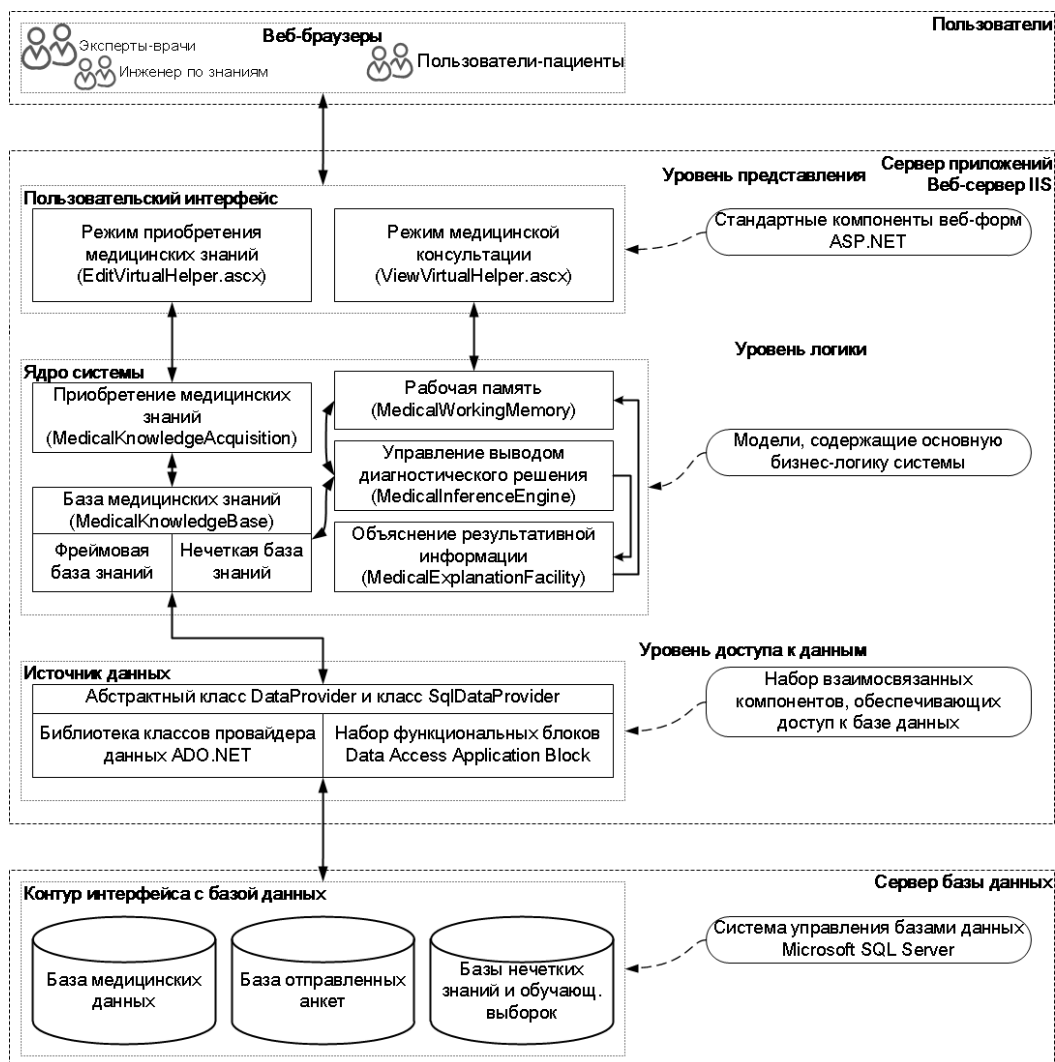
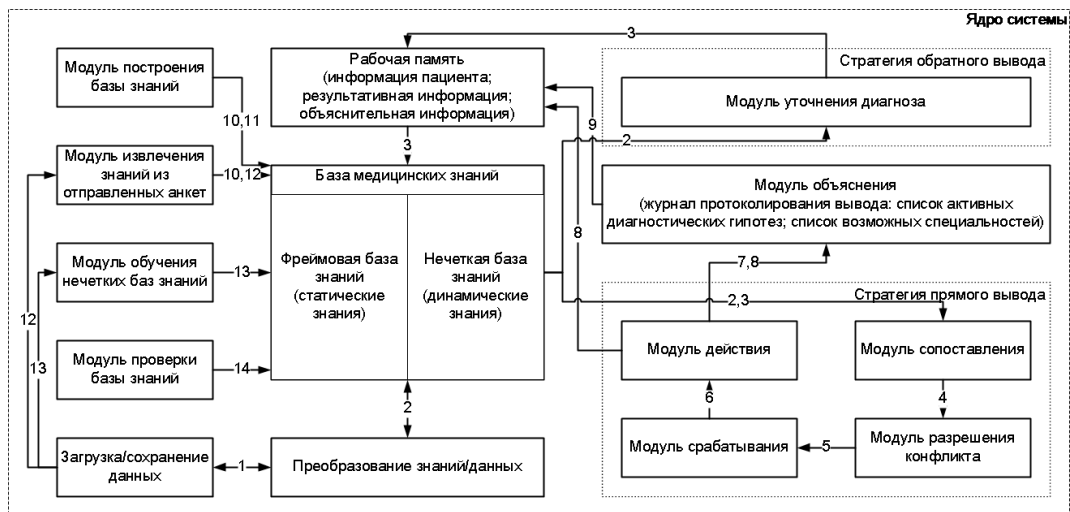


Рис. 1. Схема архитектуры системы

Управляющий механизм вывода решения может быть как обратным, так и прямым выводом. Для управления выводом решения разработано 5 следующих модулей: модуль уточнения диагноза; модуль сопоставления; модуль разрешения конфликта; модуль срабатывания; модуль действия. Для приобретения медицинских знаний разработано 4 следующих модуля: модуль построения базы знаний; модуль извлечения знаний из отправленных анкет; модуль обучения нечетких баз знаний; модуль проверки базы знаний.

В ходе реализации функциональности системы может потребоваться обращение к серверу базы данных, в этом случае используя единственный источник данных на *уровне доступа к данным*. Источник данных можно рассмотреть как набор взаимосвязанных компонентов, обеспечивающий операции подключения к базе данных и управления имеющимися данными.



- | | |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 1 – Медицинские данные | 8 – Список возможных специальностей |
| 2 – Медицинские знания | 9 – Объяснительная информация |
| 3 – Факты | 10 – Знания и опыты группы врачей |
| 4 – Потенциальное заболевание | 11 – Фреймовой и нечетко-продукционной модели |
| 5 – Активное заболевание | 12 – Отправленные анкеты |
| 6 – Диагностическая гипотеза | 13 – Обучающие нечеткие знания и обучающие выборки |
| 7 – Список активных диагностических гипотез | 14 – Тестирующие выборки |

Рис. 2. Структурная схема ядра системы

На уровне представления с учетом результативной информации функциональности системы осуществляется рендеринг графического интерфейса страницы, и содержимое сгенерированной страницы отправляется клиентскому браузеру.

Место сервера базы данных занимает система управления базами данных Microsoft SQL Server, которая относится к реляционным системам. В системе используются три следующих базы данных: база медицинских данных; база отправленных анкет; базы нечетких знаний и обучающих выборок. Для решения проблемы несоответствия объектно-ориентированного представления данных в системе и их представления в виде записей в базе данных используется контур интерфейса с базой данных.

Режимы работы медицинской экспертной системы дифференциальной диагностики. В режиме приобретения знаний эксперты-врачи вводят в систему знания об области диагностики. Эксперты-врачи описывают и добавляют объекты (специальности, заболевания и симптомы) в базу знаний. После добавления врачи выполняют модификацию симптомокомплексов для каждого заболевания. База знаний преобразуется и сохраняется в реляционной базе медицинских данных. Происходит переход к режиму медицинской консультации. Пользователь-пациент выполняет регистрацию, вводя персональную информацию. Система начинает задавать вопросы по симптомам. Пациент вводит факты проявления симптомов, отвечая на заданные вопросы. Управление выводом решения на основе поступающих фактов из рабочей памяти и знаний из базы знаний формирует диагностический результат, который передается пациенту. Если результат системы непонятен пациенту, то он может потребовать у системы объяснительную информацию. Полученная информация обновляется рабочей памятью. Если па-

циент соглашается с диагностическим результатом, то производится печать анкеты с вопросами пациенту и завершается работа системы. В случае, если пациент не принимает решение, он может потребовать у системы решение от группы врачей. Система формирует и сохраняет анкеты с вопросами в реляционную базу отправленных анкет. Иначе, если пациент хочет продолжения консультации, модуль уточнения диагноза выполняет генерацию дополнительных вопросов по ведущим симптомам. Далее происходит завершение работы в режиме консультации. Врачи, входят в систему, после регистрации видят анкеты. Если врач принимает отправленные анкеты, то он формирует диагностические ответы на вопросы. Новые диагностические ответы под управлением модулей приобретения знаний добавляются в базу знаний и отправляются пациенту по электронной почте.

Основные функции медицинской экспертной системы дифференциальной диагностики: направление рассуждения; объяснение диагностического результата пользователям; вывод диагностического решения при условиях неопределенности; медицинская диагностика в реальном времени; самостоятельное обучение; разграничение прав доступа, роли; масштабирование; универсальное представление медицинских знаний; эффективное приобретение знаний; проверка базы знаний.

Заключение

В результате работы разработана трехслойная архитектура медицинской системы дифференциальной диагностики, в которой ядро данной системы разработано с использованием объектно-ориентированной архитектуры. В зависимости от функциональных требований предложены следующие слои: пользователи; сервер приложений; сервер базы данных. Ядро системы состоит из следующих основных модулей и компонентов: пользовательский интерфейс, реляционные базы данных; база медицинских данных; рабочая память; модули управления выводом диагностического решения; модуль объяснения; модули приобретения медицинских знаний. Приведены режимы работы, а также основные функции данной системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Джарратано Д., Райли Г. Экспертные системы: принципы разработки и программирование, 4-е изд. / Пер. с англ. – М.: ИД «Вильямс», 2007. – 1152 с.: ил. – Парл. тит. англ.
2. Гаврилова Т., Хорошевский В. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2001. – 584 с.
3. Новикова В.А., Андреева Е.Ю., Туйкина Д.К. Искусственный интеллект и экспертные системы: Учеб. пособие. – Курск: КГУ, 2004. – 45 с.
4. Искусственный интеллект. Базы знаний и экспертные системы: Учеб. пособие / А.М. Дворянкин, А.В. Кизим, И.Г. Жукова, М.Б. Сипливая. – Волгоград: ВолгГТУ, 2002. – 140 с.
5. Камаев В.А., Филатов Б.Н., Панченко Д.П. Многомодульная система медицинской диагностики // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2005. – № 1. – М., Машиностроение. – С. 17.

Статья поступила в редакцию 13 января 2014 г.

MEDICAL EXPERT SYSTEM ARCHITECTURE OF DIFFERENTIAL DIAGNOSIS

N.V. Le, V.A. Kamaev, D.P. Panchenko, O.A. Trushkina

Volgograd State Technical University
28, Lenin avenue, Volgograd, 400005, Russian Federation

The structural scheme of the medical systems of differential diagnosis is considered. The expert system architecture was made by three-layer architectural templates. Web-based technologies in developing of application server allows to distinguish between the logic levels, data access layer and the presentation layer. System kernel with the use of object-oriented architecture is developed. An outline interface with the database to solve the inconsistency of data presentation in the system is offered. The mode of obtaining medical knowledge and health consultation mode during the expert system work are shown. The developed expert system allows to provide medical diagnostics in real time in the conditions of uncertainty of information.

Keywords: *medical diagnosis, expert system, system architecture.*

*Nguyen V. Le, Postgraduate student.
Valery A. Kamaev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Dmitry P. Panchenko (Ph.D. (Techn.)), Senior Lecture.
Olga A. Trushkina, Graduate student.*

УДК 007, 336.76

МНОГООБРАЗИЕ СТРУКТУР ДВУХУРОВНЕВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИНВЕСТИЦИЯМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОРТФЕЛЕЙ

В.Г. Саркисов, Г.А. Саркисов

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассматриваются различные подходы к построению систем управления инвестиционными портфелями, предусматривающие как единовременное формирование инвестиционного портфеля, так и изменение его структуры во времени. Проводится сравнительный анализ классического статического инвестиционного портфеля, динамических портфелей, управляемых по различным алгоритмам, и динамических портфелей, являющихся линейными комбинациями других портфелей (статических или динамических). Предлагается обобщенная двухуровневая структура системы управления портфелем, в которой подсистема нижнего уровня производит моделирование временных рядов доходностей портфелей из реальных инвестиционных инструментов, а подсистема верхнего уровня формирует портфель, рассматривая портфели нижнего уровня в качестве инвестиционных инструментов.

Ключевые слова: *двухуровневая система, многоуровневая система, инвестиционный портфель, управление портфелем, финансовый инструмент, портфель систем, динамический портфель.*

Частные случаи построения систем управления инвестиционным портфелем на основе объединения уже существующих систем известны и представлены в литературе. Например, в [1] рассматривается единовременное построение оптимального портфеля из портфелей, сформированных на разных организованных рынках. В работе [2] рассмотрен портфель систем в общем виде, а в [3] – конкретная реализация двухуровневой системы управления портфелем с неизменной заранее заданной структурой рискованной части портфеля.

В настоящей статье авторы исследуют различные варианты объединения исходных систем в двухуровневую систему.

Под статическим портфелем будем понимать инвестиционный портфель, доли инструментов в котором неизменны в течение всего рассматриваемого интервала времени. Основы теории формирования таких портфелей были заложены Г. Марковицем в [4]. Предложенные им методы базируются на статистической оценке и прогнозе математических ожиданий и ковариаций доходностей инвестиционных инструментов на рассматриваемый интервал времени. Основными характеристиками оценки качества портфеля являются математическое ожидание доходности (мера доходности) и дисперсия доходности (мера риска). Оптимальным (недоминируемым) будем называть портфель с одновременно минимальным риском при данной доходности и максимальной доходностью при данном риске.

При формировании портфелей широко используется диверсификация – рас-

Виген Геннадьевич Саркисов (к.т.н.), доцент кафедры «Высшая математика и прикладная информатика».

Геннадий Арсенович Саркисов (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Высшая математика и прикладная информатика».

пределение средств между различными инструментами (например акциями и облигациями) в целях улучшения соотношения доходности и риска.

В динамическом портфеле общего вида доли инструментов могут изменяться в течение рассматриваемого интервала времени в соответствии с заданным алгоритмом, учитывающим динамику рыночных цен инвестиционных инструментов. При этом в соответствии с алгоритмом может изменяться как структура рисковей части портфеля, так и соотношение рисковей и безрисковей частей. При построении и оптимизации алгоритмов управления портфелем часто применяются вспомогательные показатели, учитывающие динамику доходности (как в течение заданного периода времени, так и в отдельных сделках).

Из введенных определений следует, что статический портфель является частным случаем динамического, алгоритм формирования которого предполагает изменение долей лишь в начальный момент времени.

Статическими портфелями (по определению) являются портфели индексных фондов: их структура постоянна и соответствует структуре индекса, например индекса Московской межбанковской валютной биржи (ММВБ) или Dow Jones Industrial Average (DJIА).

Инвестиционные портфели крупных корпораций также близки к статическим, так как рыночная ликвидность недостаточна для быстрого изменения структуры портфеля большого объема.

Напротив, частные инвесторы и небольшие предприятия имеют возможность динамично управлять своими вложениями, постоянно изменяя структуру портфеля.

Двухуровневая система управления портфелем

Структуру портфеля в момент времени t будем описывать вектором $x_k(t) = (x_{k,1}(t), x_{k,2}(t), \dots, x_{k,N}(t))$ долей инструментов в этом портфеле, где k – номер портфеля ($k = \overline{1, K}$), N – количество доступных инвестиционных инструментов. Обычно на доли инструментов в портфеле в каждый момент времени накладываются ограничения, описывающие отсутствие кредитования:

$$x_{k,n}(t) \geq 0, n = \overline{1, N}, k = \overline{1, K}, \quad (1)$$

$$\sum_{n=1}^N x_{k,n}(t) = 1, k = \overline{1, K}. \quad (2)$$

Если же кредитование доступно для инвестора, то в зависимости от условий кредитования по аналогии с (1) и (2) можно построить ту или иную систему ограничений, содержащую ограничения вида равенств и неравенств.

Из K исходных портфелей составлен объединенный портфель y (рис. 1). Можно показать [5], что при этом доходности исходных портфелей можно рассматривать в качестве доходностей новых виртуальных инвестиционных инструментов. Доли исходных портфелей в объединенном портфеле обозначим $a_k(t), k = \overline{1, K}$. На эти доли также накладываются ограничения:

$$a_k(t) \geq 0, k = \overline{1, K}, \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K a_k(t) = 1. \quad (4)$$

Доли исходных инвестиционных инструментов в объединенном портфеле:

$$y(t) = \left(\sum_{k=1}^K a_k(t)x_{k,1}(t), \sum_{k=1}^K a_k(t)x_{k,2}(t), \dots, \sum_{k=1}^K a_k(t)x_{k,N}(t) \right). \quad (5)$$

Системы управления исходными портфелями, формирующие доли $x_{k,n}(t)$, будем называть системами нижнего уровня, а системы, формирующие $a_k(t)$, – системами верхнего уровня.

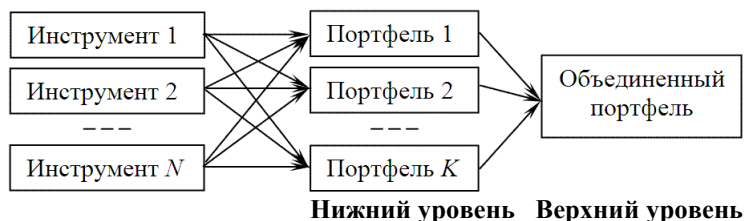


Рис. 1. Формирование портфеля с помощью двухуровневой системы

Формирование двухуровневой системы приводит к изменению критериев оценки качества работы системы нижнего уровня. Задача системы нижнего уровня – формирование такого набора временных рядов виртуальных инструментов, который позволяет получить высокую эффективность системы верхнего уровня. При этом к системе верхнего уровня применяются классические критерии качества (доходности и риска).

Рассматриваемые системы и виртуальные инструменты

Будем рассматривать следующие варианты систем управления портфелем (и соответствующих виртуальных инструментов).

1) *Системы управления статическими портфелями (рис. 2).* Структура портфеля формируется единовременно и остается неизменной до конца рассматриваемого периода. Доходность системы (и соответствующего виртуального инструмента) определяется изменением цен входящих в портфель инструментов.

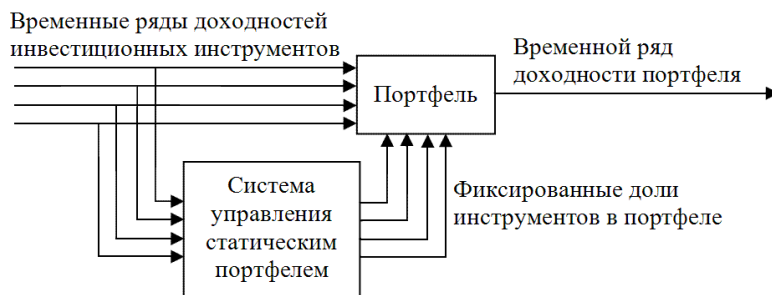


Рис. 2. Управление статическим портфелем

2) *Системы управления динамическими портфелями общего вида (рис. 3).* Структура портфеля постоянно изменяется на основе анализа динамики изменения цен входящих в него инвестиционных инструментов.

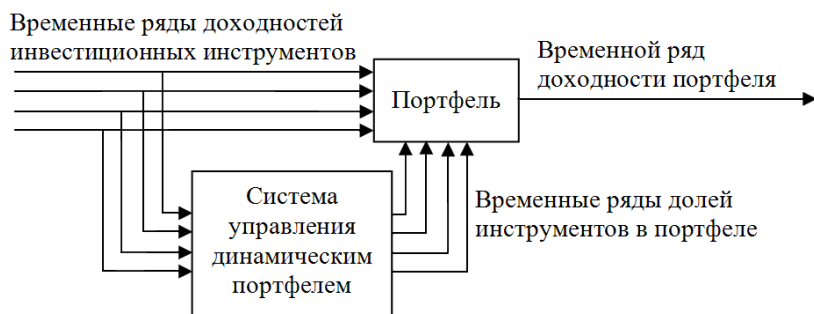


Рис. 3. Управление динамическим портфелем

3) *Механическая торговая система (МТС)* (рис. 4) – простейший вариант системы управления динамическим портфелем. Портфель состоит либо полностью из одного инструмента, либо полностью из денежных средств. Управление таким портфелем заключается лишь в выборе моментов времени для изменения структуры портфеля.

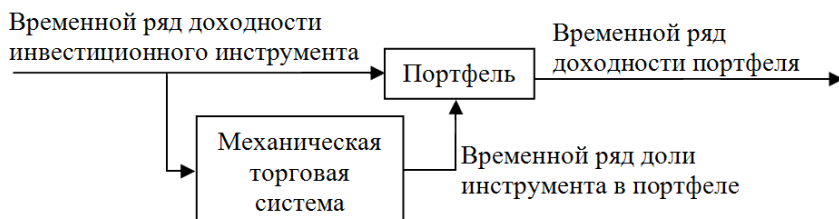


Рис. 4. Механическая торговая система

Каждый из вариантов может быть реализован как на нижнем, так и на верхнем уровне. Соответственно, всего возможно 9 вариантов структур двухуровневой системы. Рассмотрим эти варианты, сгруппировав их по типу системы верхнего уровня.

Двухуровневые системы с механической торговой системой (МТС) на верхнем уровне

Двухуровневые системы с МТС на верхнем уровне по своей структуре являются наиболее простыми, так как наличие МТС на верхнем уровне обуславливает единственность выхода структуры первого уровня.

Наиболее простая из двухуровневых структур данного типа получается, если на нижнем уровне находится также МТС (рис. 5).

Далее для краткости не будем рассматривать внутреннюю структуру уровней системы. Компактное представление для схемы рис. 5 показано на рис. 6.

Так как и первый и второй уровни системы имеют по одному входу, то работа такой системы возможна с единственным выбранным реальным инвестиционным инструментом.

Портфель двухуровневой системы МТС (как и обычной МТС) имеет два состояния: вся стоимость портфеля сосредоточена либо в единственном инвестиционном инструменте ($a_1(t)=1$ и $x_{1,1}(t)=1$), либо в денежных средствах ($a_1(t)=0$ и/или $x_{1,1}(t)=0$). Структура портфеля (выражение (5) с учетом (2)) описывается следующим вектором (6):

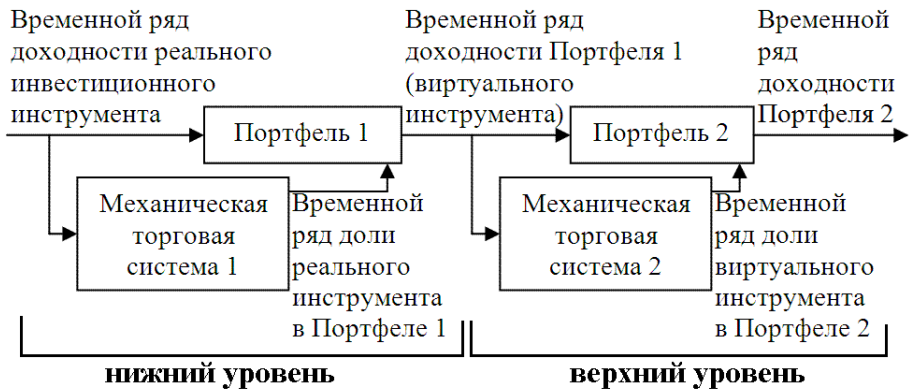


Рис. 5. Система управления портфелем на основе МТС на нижнем и верхнем уровнях

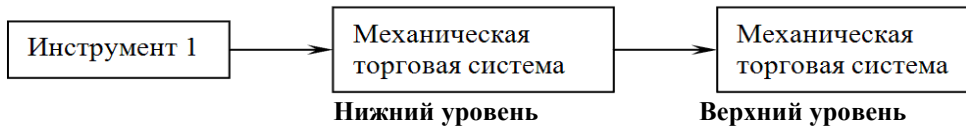


Рис. 6. Система управления портфелем на основе МТС на нижнем и верхнем уровнях (компактное представление)

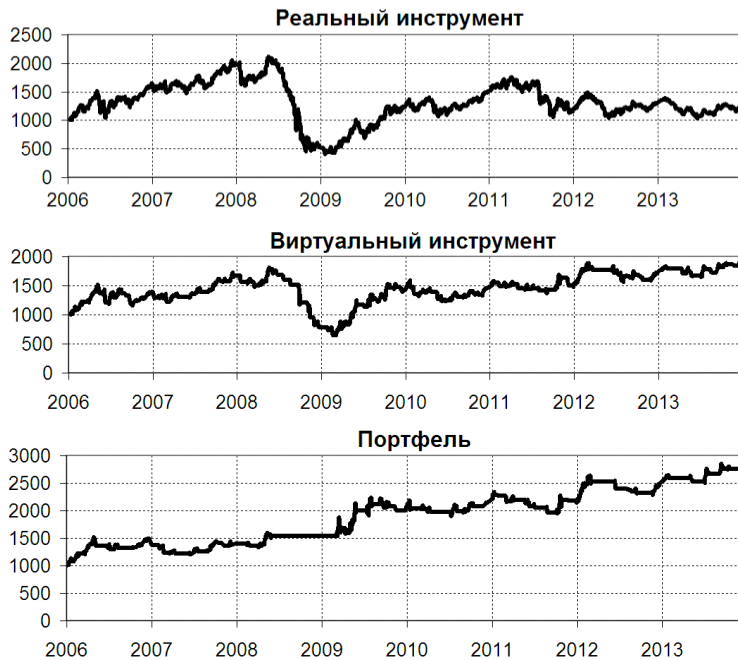


Рис. 7. Динамика стоимости реального и виртуального инструментов и стоимости портфеля в системе с МТС на нижнем и верхнем уровнях

$$y(t) = (a_1(t)x_{1,1}(t), 1 - a_1(t)x_{1,1}(t)), \quad (6)$$

где первая координата вектора $y(t)$ описывает долю инвестиционного инструмен-

та в портфеле, а вторая – долю денежных средств.

Задачей МТС верхнего уровня является включение в портфель ($a_1(t)=1$) виртуального инструмента с выхода нижнего уровня в те периоды времени, когда МТС нижнего уровня дает прибыль, и исключение его из портфеля ($a_1(t)=0$) в убыточные периоды. На рис. 7 представлен пример временных рядов на входе системы (реальный инструмент), на выходе нижнего уровня (виртуальный инструмент) и на выходе двухуровневой системы (портфель).

Интересным представляется период с середины до конца 2008 года, когда реальный инструмент (фьючерс на индекс РТС) потерял примерно 80 % стоимости, потери МТС первого уровня – около 60 %. Введение МТС верхнего уровня позволило исключить продолжительные убыточные периоды и снизить потери до 17 %.

Аналогичный рассмотренному выше принцип лежит и в основе функционирования других систем с МТС на верхнем уровне (рис. 8 и рис. 9).

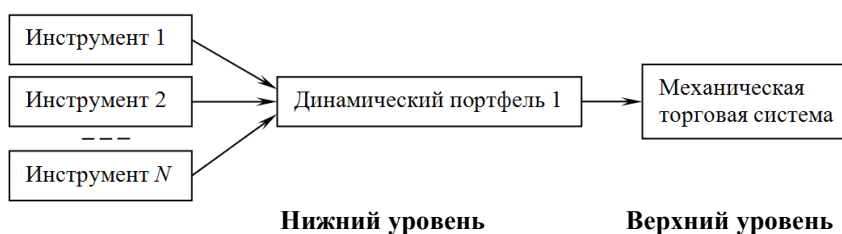


Рис. 8. Система с динамическим портфелем общего вида на нижнем уровне и МТС на верхнем уровне

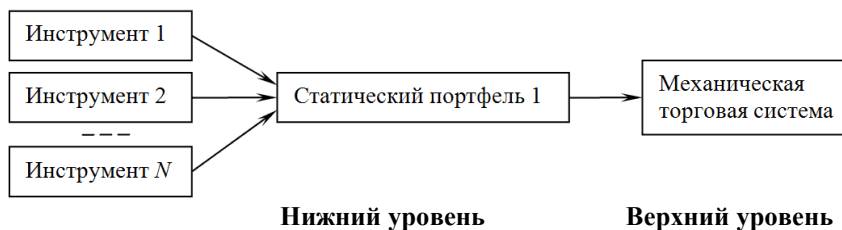


Рис. 9. Система со статическим портфелем на нижнем уровне и МТС на верхнем уровне

В каждом из этих вариантов МТС верхнего уровня оценивает (прямо или косвенно) текущую эффективность работы системы нижнего уровня и на основе этой оценки либо инвестирует в портфель этой системы все средства, либо отказывается от инвестирования.

Двухуровневые системы со статическим портфелем на верхнем уровне

Система формирования статического портфеля на верхнем уровне единовременно оценивает доходности и риски (а также некоторые вспомогательные показатели) систем нижнего уровня. На основе этих оценок формируется оптимальный статический портфель. Например, можно оценить математические ожидания и ковариации доходностей всех МТС и составить оптимальный портфель в соответствии с моделью Марковица (с заданной доходностью и наименьшим риском). С практической точки зрения система верхнего уровня перераспределяет средства между системами нижнего уровня в зависимости от качества их работы.

Простейшим случаем является система с набором МТС на нижнем уровне. Схема такой системы представлена на рис. 10. Преимуществом такого подхода является существенное увеличение разнообразия виртуальных инструментов: каждая из K МТС нижнего уровня может быть применена к каждому из N реальных инвестиционных инструментов, что дает $K \cdot N$ виртуальных инструментов. В этом наборе с большой вероятностью найдутся инструменты, пригодные для формирования качественного портфеля. Интерес представляют виртуальные инструменты, доходности которых слабо и/или отрицательно коррелированы. Это позволяет снизить риск при формировании портфеля.

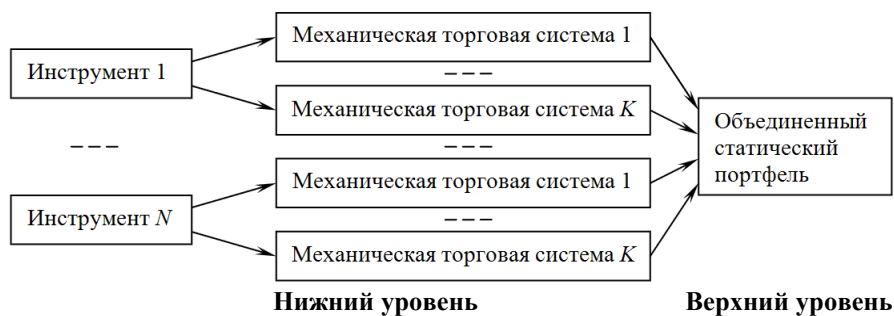


Рис. 10. Система с МТС на нижнем уровне и статическим портфелем на верхнем уровне

Более общим подходом является использование на нижнем уровне не МТС, а систем управления динамическим портфелем общего вида (рис. 11).

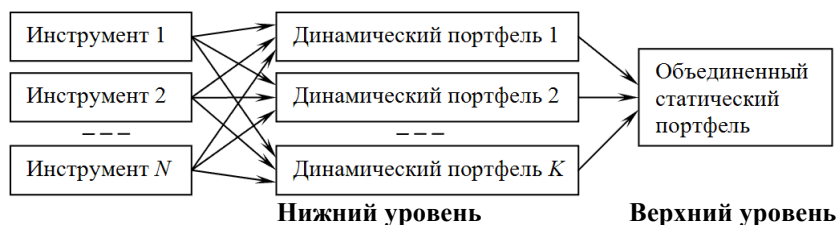


Рис. 11. Система с динамическими портфелями общего вида на нижнем уровне и статическим портфелем на верхнем уровне

При использовании статических портфелей на верхнем и нижнем уровнях (рис. 12) все доли инструментов (реальных и виртуальных) фиксируются в начальный момент времени. Следовательно, доли реальных инструментов в объединенном портфеле (5) также являются постоянными. С этой точки зрения его можно рассматривать в качестве обычного статического портфеля.

Никакие новые полезные свойства в результате объединения статических портфелей не возникают. Более того, можно показать [6], что существуют такие недоминируемые исходные портфели, при объединении которых невозможно получить недоминируемый портфель.

Исходя из этих соображений можно сделать вывод: формирование статического портфеля из других статических портфелей не дает преимуществ по сравнению с формированием оптимального портфеля непосредственно из реальных

инвестиционных инструментов. Это единственный вариант, когда формирование двухуровневой системы бессмысленно.

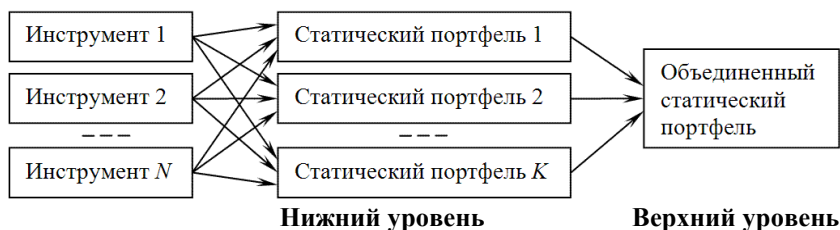


Рис. 12. Система со статическими портфелями на нижнем и верхнем уровнях

Двухуровневые системы с динамическим портфелем общего вида на верхнем уровне

Система формирования динамического портфеля общего вида на верхнем уровне в реальном времени оценивает (прямо или косвенно) доходности виртуальных инструментов, формируемых на нижнем уровне, и строит оптимальный портфель в соответствии с этими оценками и их динамикой.

Схемы таких систем полностью аналогичны схемам, приведенным на рис. 10, рис. 11 и рис. 12, с той лишь разницей, что на верхнем уровне формируется динамический, а не статический портфель.

Система с динамическими портфелями на обоих уровнях является наиболее общим случаем двухуровневой системы. Она предоставляет максимально широкие возможности для формирования оптимального инвестиционного портфеля и изменения его структуры на основе анализа динамики инвестиционных инструментов.

Важными факторами, которые необходимо учитывать при оптимизации систем подобного рода, являются транзакционные издержки и потенциальные потери, связанные с ограниченной ликвидностью реальных инструментов. Система производит большое число сделок относительно небольших объемов, которые не оказывают существенного влияния на текущие рыночные цены (этот факт можно рассматривать в качестве преимущества предлагаемых подходов). Однако при определенных обстоятельствах даже небольшое изменение цены может привести к лавинообразному удовлетворению условий, используемых в системах нижнего уровня, и лавинообразному же неблагоприятному движению цены, вызванному исполнением соответствующих этим условиям заявок. Фактически в системе неявно присутствует положительная обратная связь, наличием которой в большинстве случаев можно пренебречь (в силу инерционности совокупности остальных участников рынка), но существование которой необходимо учитывать при оценке неблагоприятных для системы сценариев.

Заключение

Анализ разнообразия двухуровневых систем показал возможность построения структур, положительно влияющих на эффективность инвестиций. В зависимости от своих индивидуальных предпочтений и капитала инвестор может выбрать более или менее диверсифицированную и/или агрессивную систему, а в зависимости от особенностей конкретного рынка и условий совершения сделок на нем – с большей или меньшей интенсивностью сделок.

Начинающему разработчику целесообразно сосредоточиться на наиболее

простых типах двухуровневых систем – двух последовательно соединенных МТС (см. рис. 6) и статическом портфеле из множества МТС (см. рис. 10).

Также выделен случай, не дающий преимуществ ни при каких условиях, – система со статическими портфелями на обоих уровнях (см. рис. 12). Для формирования статического портфеля достаточно использовать классическую одноуровневую систему.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мерфи Дж.Дж. Межрыночный технический анализ. Торговые стратегии для мировых рынков акций, облигаций, товаров и валют. – М.: Диаграмма, 2002. – 317 с.
2. Винс Р. Математика управления капиталом. Методы анализа риска для трейдеров и портфельных менеджеров. – М.: Альпина, 2007. – 402 с.
3. Титов С.Ю. Адаптивная система принятия решений на финансовых рынках // Прикладная эконометрика. – 2007. – № 3(7). – С. 27-43.
4. Markowitz H. Portfolio selection // The Journal Of Finance. – 1952. – № 1. – С. 77-91.
5. Саркисов В.Г., Саркисов Г.А. Синтез системы управления инвестиционным портфелем на основе моделирования виртуальных финансовых инструментов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 3(31). – С. 33-39.
6. Саркисов В.Г. Система оптимального управления коллективными инвестициями в модели Марковица // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 4(40). – С. 45-52.

Статья поступила в редакцию 26 июня 2014 г.

STRUCTURE VARIETY OF TWO-LEVEL INVESTMENT MANAGEMENT SYSTEMS WITH THE USE OF DYNAMIC PORTFOLIOS MODELS

V.G. Sarkisov, G.A. Sarkisov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Different approaches to the construction of investment portfolios management systems, providing both single formation of an investment portfolio and dynamical changes in its structure, are considered. A comparative analysis of the classical static investment portfolio, dynamic portfolios managed by different algorithms and dynamic portfolios being linear combinations of other portfolios (static or dynamic) are carried out. The generalized two-level structure of a portfolio management system is offered. The lower-level subsystem simulates profitabilities time series of real investment instrument portfolios. The top-level subsystem forms a portfolio, using lower-level formed portfolios as investment instruments.

Keywords: *two-level system, multilevel system, investment portfolio, portfolio management, financial instrument, portfolio of systems, dynamic portfolio.*

*Vigen G. Sarkisov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Gennady A. Sarkisov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*