РОБАСТНОЕ ПРАКТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЫХОДНЫХ ДАННЫХ НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ ДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

К. Алимхан[1], М.Н. Калимолдаев[2], Н. Тасболатулы[2]

[1]*Tokyo Denki University, Tokyo, Japan*
[2]*Институт информационных и вычислительных технологий, Алматы, Казахстан*

УДК 519.71

Рассматривается глобальная робастная практическая задача управления (отслеживания) выходных данных с использованием контроллера динамической обратной связи по выходу (выходного компенсатора) для класса неопределенных нелинейных систем, чья якобианная линеаризация может быть нестабильной и / или неопределяемой. Показано, что в некоторых мягких условиях на данной системе имеется выходной компенсатор, обеспечивающий глобальное устойчивое практическое отслеживание выходных данных, и такой компенсатор построен методом «связанного контроллера-наблюдателя».

Ключевые слова: теория управления, робастное практическое управление, опорный сигнал, сигнал ошибки, практическое слежение выхода, обратная связь по выходу, метод контроллер-наблюдатель, неопределенные нелинейные системы

Введение. Практическое управление слежением является одной из наиболее важных проблем в области нелинейного контроля, и в течение последних трех десятилетий было предпринято несколько усилий для решения этой проблемы. По сравнению с контролем состояния с обратной связью теория управления обратной связью на выходе развивалась медленнее, потому что нет общего и эффективного метода для разработки нелинейного наблюдателя. Сравнительно недавняя работа [1] и монография [2] дают полный обзор и подробный отчет об основных событиях и достижениях в области теории регулятора выходного сигнала для линейных и нелинейных систем. В [3-6] рассматривается только простой случай, когда опорные сигналы, создаваемые экзосистемой, являются константами. Позднее проблема для нелинейных систем с изменяющимися во времени опорными сигналами была рассмотрена Исидори и Бирнсом [7]. Большинство упомянутых выше вкладов в теорию нелинейного регулятора требовали, чтобы якобианная линеаризация управляемой нелинейной системы была стабилизирована и обнаруживаема [2]. Стабилизируемость и обнаруживаемость линеаризованной системы являются двумя ключевыми предположениями для решения проблемы нелинейного регулирования выходного сигнала с помощью либо состояния, либо обратной связи с ошибками. Хотя рассматриваемая система по своей сути нелинейна, проблема становится более сложной и трудной для решения.

Далее мы рассматриваем следующие работы: Челиковский и Хуан [8]; Линь и Цянь [9]; и Цянь и Лин [10], которые тесно связаны с настоящим исследованием. Челиковский и Хуан [8] представили слегка расслабленную концепцию «практическое отслеживание выходных данных» и изучили эту практическую проблему отслеживания выходных данных для класса треугольных систем, линеаризованные системы которых могут быть нестабильны и получили локальный контроллер обратной связи с непрерывным состоянием для решения этой задачи отслеживания. Кроме того, Линь и Цянь [9] рассмотрели проблему глобального робастного отслеживания выходных данных для специального класса однопоточных нелинейных систем с одним входом и с одним выходом следующего вида:

$$\begin{gathered}\dot{x}_i = x_{i+1}^{p_i} + \phi_i(t, x, u),\ i = 1, \dots, n-1 \\ \dot{x_n} = u^{p_n} + \phi_n(t, x, u) \\ y = x_1\end{gathered} \tag{1.1}$$

Системы вида (1.1) образуют специальный класс внутренне нелинейных систем, который кажется не только математически очень интересным, но и практически значимым для изучения, и Линь и Цянь [9] показали, что при некоторых подходящих предположениях системе (1.1) проблема глобального робастного асимптотического отслеживания выходных сигналов в постоянном опорном сигнале разрешима посредством обратной связи с гладким состоянием. Однако соответствующая проблема для изменяющегося во времени опорного сигнала, как правило, не разрешима посредством обратной связи с гладким состоянием. Поэтому, чтобы преодолеть эту ситуацию, Цянь и Линь [10] рассмотрели практическую проблему отслеживания выхода для систем, несколько более общих, чем (1.1), и показали, что при некоторых подходящих условиях для таких систем глобальная робастная практическая проблема отслеживания выходных данных через обратную связь состояния разрешима [10].

В практической ситуации, однако, желательно использовать только выходные данные для построения такого контроллера, но это, кажется, намного сложнее. На самом деле проблема стабилизации системы (1.1) через обратную связь по выходу еще не решена, и, следовательно, соответствующая задача отслеживания еще очень далека от ее решения. Поэтому Ян и Линь [11] рассматривали более расслабленную систему, чем (1.1), сделав предположение $p_i = p(i = 1, \dots, n-1)$ и $p_n = 1$,

$$\begin{gathered}\dot{x}_i = x_{i+1}^{p} + \phi_i(t, x, u),\ i = 1, \dots, n-1 \\ \dot{x_n} = u + \phi_n(t, x, u) \\ y = x_1\end{gathered} \tag{1.2}$$

и показали, представив новую идею «связанного компенсатора – наблюдателя и контроллера», что при некоторых подходящих однородных условиях роста в системе (1.2), глобальная устойчивая стабилизация может быть достигнута гладкой обратной связью по выходу.

В этой статье мы рассмотрим практическую проблему отслеживания, используя обратную связь для системы (1.2), в основном фокусируясь на математическом аспекте проблемы, который может быть полезен для решения соответствующей задачи отслеживания для более общей системы (1.1). Фактически, используя ту же идею, что и в Ян и Линь [11], мы покажем, что при некоторых мягких условиях на системе, имеющей слегка измененную структуру из (1.2), глобальное устойчивое практическое отслеживание выходных данных на ограниченное по времени опорный сигнал может быть достигнут посредством плавной динамической обратной связи (называемой выходным компенсатором). В конце, чтобы увидеть эффективность результата, представлен простой численный пример.

1. Постановка задачи. Наша конечная цель - изучить проблему отслеживания вывода для системы (1.1), но, как упоминалось во введении, эта проблема пока еще далека от решения. Таким образом, было бы естественно начать с проблемы отслеживания вывода для более простой системы (1.2). Поэтому мы рассматриваем проблему отслеживания вывода для класса нелинейных систем (1.2) с выходом, слегка измененным следующим образом:

$$\begin{gathered} \dot{x}_i = x_{i+1}^p + \phi_i(t,x,u), \ i = 1, \dots, n-1 \\ \dot{x}_n = u + \phi_n(t,x,u) \\ y = x_1 - y_r(t) \end{gathered} \tag{2.1}$$

здесь $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in R^n$ – состояние системы, $u \in R$ – входные данные управления, $y \in R$ – выходные данные, $\phi_i(t,x,u)$, $i = 1, \dots, n$ - неизвестные непрерывные функции и степень $p_i \in R_{odd}^{\geq 1} := \left\{\frac{p}{q} \in [0,\infty) : p \text{ и } q - \text{ нечетные целые числа, где } p \geq q\right\}$ $(i = 1, \dots, n-1)$ показывает высокую степень системы и $y_r(t), t \in [0,\infty)$ представляет собой опорный сигнал для отслеживания. Хотя в обычной задаче отслеживания опорный сигнал$y_r(t)$ а также его производные считаются известными, в нашей задаче мы предполагаем, что единственным измеримым сигналом в системе (2.1) является ошибка $y = x_1 - y_r(t)$ между выходными данными x_1 и опорным сигналом $y_r(t)$. Таким образом, в структуре контроллера (так называемого компенсатора по выходу) допускается только y. Цель состоит в том, чтобы отрегулировать выход y достаточно небольшим, используя только измеримую информацию, а точнее, спроектировать выходной компенсатор для управления u для достижения «практического отслеживания выхода». Есть две причины ограничить единственное измерение сигналом ошибки. Во-первых, в некоторых практических приложениях управления неизбежно, что сигнал ошибки является прямым измерением. Например, в системе управления ракетами вместо измерения абсолютного положения движущейся мишени, то есть $y_r(t)$, бортовой радиолокатор продолжает измерять расстояние / погрешность между ракетой и мишенью [12]. Во-вторых, принятие только сигнала ошибки также делает структуру воздействующего устройства простым, поскольку контроллер не зависит от сигнала, который будет отслеживаться четко. Таким образом контроллер более адаптивен к различным опорным сигналам [13].

Здесь, мы, вначале вносим точное определение нашей проблемы отслеживания [8, 10].

Определение (проблема практического робастного отслеживания выхода): Рассмотрим систему (2.1) и предположим, что опорный сигнал $y_r(t)$является ограниченной C^1-функцией на $[0,\infty]$, производная которой $\dot{y}_r(t)$ также ограничена. Затем задача практического робастного отслеживания выхода через компенсатором выхода, рассмотренная в этом исследовании, определяется следующим образом: для любого заданного $\varepsilon > 0$, структура компенсатора имеет форму:

$$\begin{cases} \dot{\zeta} = \alpha(\zeta, y), \ \zeta \in R^m \\ u = \beta(\zeta, y) \end{cases} \tag{2.2}$$

где α, β некоторые гладкие функции, а m – подходящее натуральное число, такое, что

1. Каждое состояние замкнутой системы (2.1) - (2.2) хорошо определено на $[0,\infty]$, и глобально ограничено;

2. Достигается практическое отслеживание, т. е. существует конечное время $T := T(\varepsilon, x(0)) > 0$, в зависимости от ε и начального состояния $x(0) \in R$, так что выход (выходные данные) замкнутой системы (2.1) - (2.2) удовлетворяет

$$|\boldsymbol{y}(\boldsymbol{t})| = |\boldsymbol{x_1}(\boldsymbol{t}) - \boldsymbol{y_r}(\boldsymbol{t})| < \boldsymbol{\varepsilon}, \ \forall \boldsymbol{t} \geq \boldsymbol{T} > \boldsymbol{0} \tag{2.3}$$

В дальнейшем при использовании метода «добавления степени интегратора» [14] и идеи «связанного контроллера-наблюдателя» [11], мы покажем, что при подходящих предположениях (2.1) практическая проблема отслеживания выходных данных в определении разрешима компенсатором (2.2). И, мы делаем следующие предположения относительно системы (2.1).

Предположение 1: для нелинейной системы (2.1) существует вещественное число $C_1 \geq 0, \ C_2 \geq 0$ такое, что

$$|\phi_i(t,x,u)| \leq C_1(|x_1|^p + \cdots + |x_i|^p) + C_2, \quad i = 1, \ldots, n \tag{2.4}$$

Предположение 2: опорный сигнал $y_r(t)$ является C^1-ограниченным, т. е. является C^1-функцией такой, что существует известная константа $D > 0$, удовлетворяющая

$$|y_r(t)| \leq D, \ |\dot{y_r}(t)| \leq D, \ \forall t \in [0, \infty) \tag{2.5}$$

Замечание: предположение 1 несколько более общее, чем предположение, введенное в Ян и Лином [11], в котором нет постоянного члена C_2. Фактически, предположение 1 с $C_2 = 0$ становится предположением, введенным в [11]. Например, рассмотрим нелинейную систему вида

$$\dot{x_1} = x_2^3 + ax_1 + b(t), \ \dot{x_2} = u, \ y = x_1 \tag{2.6}$$

где a – неопределенный постоянный параметр с $|a| \leq A$, и $b(t)$- неопределенный изменяющийся во времени параметр с $|b(t)| \leq B(t \in [0, \infty))$. Тогда нетрудно увидеть, что линеаризованная система в начале координат не стабилизируется и не обнаруживается, и, кроме того, система удовлетворяет предположению 1, но не удовлетворяет то, что введено в Ян и Линь [11]. Поэтому в класс нелинейных систем, рассматриваемых в этой статье, входят те, которые рассмотрены в Ян и Линь [11].

Теорема (основной результат). По предположениям 1-2 на систему (2.1) глобальная устойчивая практическая задача отслеживания выходных данных, определенная в определении, разрешима компенсатором вида (2.2), и дана эффективная процедура проектирования для такого компенсатора [15, 16].

Следует отметить, что наше доказательство в следующем разделе дает также конструктивную процедуру проектирования компенсатора для достижения желаемого отслеживания.

2. Алгоритм решения задачи. Доказательство теоремы делим на две части. В первой части (структура обратной связи по состоянию), предполагая, что все переменные состояния $x_1, x_2 \ldots, x_n$ измеримы и с использованием метода добавления одного интегратора степени [10, 14], мы строим контроллер обратной связи по состоянию для (2.1), который обеспечивает глобальное практическое отслеживание выходных сигналов для любого опорного сигнала, удовлетворяющего предположению 2. И затем во второй части (конструкция связанного компенсатора: контроллера-наблюдателя), используя эту обратную связь состояния и связанный метод контроллера-наблюдателя [11, 17], мы строим компенсатор, который обеспечивает глобальное надежное практическое отслеживание выходных данных, как это требуется в теореме. В этой статье подробнее напишем о второй части доказательство теоремы.

Вводим следующее координационное преобразование:

$$z_i := y,\ \ z_i := \frac{x_i}{M^{\frac{1}{p}+\cdots+\frac{1}{p^{i-1}}}},\ \ i = 2, \dots, n$$
$$v =: \frac{u}{M^{1+\frac{1}{p}+\cdots+\frac{1}{p^{i-1}}}} \tag{2.7}$$

где $M \geq 1$ – коэффициент масштабирования, который будет определен позднее. Тогда систему (2.1) можно описать в новых координатах z_i как

$$\dot{z_i} = Mz_{i+1}^p + \psi_i(t, z, v),\ \ i = 1, \dots, n-1$$
$$\dot{z_n} = Mv + \psi_n(t, z, v) \tag{2.8}$$
$$y = z_1.$$

Здесь

$$\psi_1(t, z, v) := \phi_1(t, x, u) - \dot{y_r}$$
$$\psi_i(t, z, v) := \frac{\phi_i(t, x, u)}{M^{\frac{1}{p}+\cdots+\frac{1}{p^{i-1}}}}, i = 2, \dots, n.$$

Теперь, используя предположения 1-2 и тот факт, что $M \geq 1$, легко можно показать, что для $i = 1,2, \dots n$

$$|\psi_i(t, z, v)| \leq C|z_1|^p + C$$
$$|\psi_i(t, z, v)| \leq CM^{1-\frac{1}{p^i}}(|z_1|^p + \cdots + |z_i|^p) + \frac{C}{M^{\frac{1}{p^{i-1}}}}, i = 2, \dots, n. \tag{2.9}$$

где $C := max\{2^{p-1}C_1, 2^{p-1}C_1D^p + C_2 + D\}$. Обратите внимание, что две системы (2.1) и (2.8) эквивалентны друг другу, и следовательно мы будем работать над (2.8) вместо (2.1) каждый раз, когда это будет более удобно.

Связанный компенсатор: контроллер-наблюдатель. Поскольку состояния $(z_2, \dots, z_n)$ перемасштабированной системы (2.8) неизмеримы, но $y = z_1$ измеримо, нам нужно только спроектировать $(n-1)$-мерный наблюдатель для (2.8). Во-первых, вводя новые переменные

$$\eta_i = z_i - L_i \dots L_2 z_1,\ \ i = 2, \dots n \tag{2.10}$$

здесь параметры $L_i \geq 1$ являются коэффициентами наблюдателя. Систему (2.8) можно записать в виде

$$\dot{\eta}_i = Mz_{i+1}^p + \psi_i(\cdot) - L_i \dots L_2\{Mz_2^p + \psi_1(\cdot)\},\ \ i = 2, \dots, n-1$$
$$\dot{\eta_n} = Mv + \psi_n(\cdot) - L_n \dots L_2\{Mz_2^p + \psi_1(\cdot)\} \tag{2.11}$$

где $\psi_i(\cdot)$ означает $\psi_i(t, z, v)$. Теперь для системы (2.11) с $z_1 = y$, являющейся как измерение, мы построим $(n-1)$-мерный наблюдатель для (2.11) вида

$$\dot{\hat{\eta}}_i = M(\hat{\eta}_{i+1} + L_{i+1} \dots L_2 z_1)^p - ML_i \dots L_2(\hat{\eta}_2 + L_2 z_1)^p, i = 2, \dots, n-1$$
$$\dot{\hat{\eta}}_n = Mv - ML_n \dots L_2(\hat{\eta}_2 + L_2 z_1)^p. \tag{2.12}$$

так что оценки из z_i могут быть получены как

$$\hat{z}_i = \hat{\eta}_i + L_i \dots L_2 z_1,\ \ i = 2, \dots, n \tag{2.13}$$

Далее, определяя ошибки оценки $\varepsilon_i = z_i - \hat{z}_i = \eta_i - \hat{\eta}_i$ для $i = 2, \dots, n$, их динамика дается формулой

$$\dot{\varepsilon}_i = M\big(z_{i+1}^p - \hat{z}_{i+1}^p\big) + \psi_i(\cdot) - ML_i \dots L_2\big(z_2^p - \hat{z}_2^p\big) - L_i \dots L_2\psi_1(\cdot), i = 2, \dots, n-1$$
$$\dot{\varepsilon}_n = \psi_n(\cdot) - ML_n \dots L_2\big(z_2^p - \hat{z}_2^p\big) - L_n \dots L_2\psi_1(\cdot) \tag{2.14}$$

Теперь подставим оценки $(\hat{z}_2, \dots, \hat{z}_n)$ неизмеримых состояний $(z_2, \dots, z_n)$ в контроллер $v = z_{n+1}^* = -(a_n\xi_n)^p = -(c_1 z_1 + \cdots + c_n z_n)^p$, чтобы сформировать следующий компенсатор

$$v^* = -(c_1 z_1 + c_2 \hat{z}_2 + \cdots + c_n \hat{z}_n)^p. \tag{2.15}$$

Это показывает, что если все неопределенные параметры подходящим образом выбраны, то этот компенсатор достигает желаемого отслеживания.

3. Численные расчеты. Рассмотрим систему, приведенную в (2.6), т. е.

$$\dot{x}_1 = x_2^3 + ax_1 + b, \quad \dot{x}_2 = u, \quad y = x_1 - y_r \tag{3.1}$$

где неизвестные a, b считаются неопределенными константами, удовлетворяющими $|a| \le A = 1$ и $|b| \le B = \frac{1}{4}$. Цель управления заключается в том, чтобы заставить состояние $x_1(t)$ отслеживать заданный изменяющийся по времени опорный сигнал $y_r(t)$, используя только измерение y_r. Напомним, что $y_r(t)$ не требуется быть известным в этой проблеме отслеживания.

Во-первых, нетрудно проверить, что линеаризованная система (3.1) при $x = 0$ не стабилизируется и не обнаруживается. Далее, как упоминалось в замечании, эта система удовлетворяет предположению 1, но не удовлетворяет предположению, введенную в [11]. Действительно, поскольку неопределенные функции в (3.1) оцениваются как

$$|\phi_1(t,x,u)| \le |a||x_1| + |b| \le A|x_1| + B \le \frac{1}{3}|x_1|^3 + \frac{2A^{\frac{3}{2}}}{3} + B,$$
$$|\phi_2(t,x,u)| = 0,$$

так что $C_1 = \frac{1}{3}$ и $C_2 = \frac{2A^{\frac{3}{2}}}{3} + B = \frac{11}{12}$, предположение 1 выполнены, но предположение, введенное в [11], никогда не выполняется с $C_2 > 0$. Затем мы выбираем изменяющийся во времени опорный сигнал $y_r = \left(sin(t)\right)^3$. Очевидно, что опорный сигнал удовлетворяет предположению 2. Поэтому согласно (2.12), (2.13) и (2.15) при доказательстве теоремы (основной результат) мы можем построить выходной компенсатор следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_2 &= \frac{u}{M^{\frac{1}{3}}} - ML_2(\hat{x}_2 + L_2 y)^3 \\ u &= -M^{\frac{4}{3}}\{10(\hat{x}_2 + L_2 y) + 16y\}^3 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Тогда теорема (основной результат) гарантирует, что ошибка отслеживания может быть малой после некоторого конечного времени, в зависимости от начальных состояний ($x_1(0) = 2, x_2(0) = 5$ и $\hat{x}_2(0) = 3$), если $M > 1$ выбрано достаточно большим. Ошибка отслеживания устойчивого состояния составляет около 0,025 при $L_2 = 3$ и $M = 729$.

Заключение. Была исследована глобальная робастная практическая задача отслеживания выходных данных для класса нелинейных систем в виде (2.1), которые имеют нестабилизированное и / или неопределяемое линеаризованное приближение, и была представлена его разрешимость наряду с конструктивным методом проектирования компенсатора для достижения отслеживания. Ключевым моментом этого исследования является то, что информация, которая может использоваться для управления обратной связью, является только ошибкой отслеживания, так что вся другая информация в системе, которая необходима для отслеживания, должна быть получена путем обработки этой ошибки отслеживания. Основным подходом является так называемый «метод контроллера-наблюдателя», предложенный в [11], который представляется наиболее подходящим для проблемы, рассмотренной в этой статье, и получен метод построения выходного компенсатора, обеспечивающий требуемое глобальное робастное практическое регулирование выходного сигнала.

Список литературы

1. Byrnes C., Isidori A. Output regulation for nonlinear systems: an overview // Int. J. Robust and Non-linear Control, 2000, 10, (5), pp. 323–337.

2. Byrnes C., F.D. Psicoli, Isidori A. Output regulation of uncertain nonlinear systems // Boston: Birkhäuser, 1997.

3. Desoer C., Lin C. Tracking and disturbance rejection of MIMO nonlinear systems with PI controller // IEEE Trans. Autom. Control, 1985, 30, (9), pp. 861–867.

4. Di Benedetto M. Synthesis of an internal model for nonlinear output regulation // Int. J. Control, 1987, 45, (3), pp. 1023–1034.

5. Huang J., Rugh W. On a nonlinear multivariable servomechanism problem // Automatica, 1990, 26, (6), pp. 963–972.

6. Hepburn J., Wonham W. Error feedback and internal models on differentiable manifolds // IEEE Trans. Autom. Control, 1984, 29, (5), pp. 397–403.

7. Isidori A., Byrnes C. Output regulation of nonlinear systems // IEEE Trans. Autom. Control, 1990, 35, (2), pp. 131–140.

8. Čelikovský S., Huang J. Continuous feedback practical output regulation for a class of non-linear systems having non-stabilizable linearization // in Proc.38th IEEE Conf. Decision and Control, Phoenix, AZ, pp.4796–4801.

9. Lin W., Qian C. Robust regulation of a chain of power integrators perturbed by a lower-triangular vector field // Int. J. Robust Non-linear Control, Vol. 10, 2000a, pp.397–421.

10. Qian C., Lin W. Practical output tracking of nonlinear systems with uncontrollable unstable linearization // IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. 47, 2002a, pp.21–36.

11. Yang B., Lin W. Robust output feedback stabilization of uncertain non-linear systems with uncontrollable and unobservable linearization // IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. 50, 2005, pp.619–630.

12. Gong Q., Qian C. Global practical output regulation of a class of nonlinear systems by output feedback // Proc. the 44th IEEE conference on decision and control, and the European control conference, Seville, Spain, pp. 7278-7283, 2005.

13. Zhai J., Fei S. Global practical tracking control for a class of uncertain nonlinear systems // IET Control Theory and Applications, vol 5, Issue 11, pp. 1343 – 1351, 2011.

14. Lin W., Qian C. Adding one power integrator: a tool for global stabilization of high-order triangular systems // Syst. Contr. Lett., Vol. 39, 2000b, pp.339–351.

15. Alimhan K., Inaba H. Practical output tracking by smooth output compensator for uncertain nonlinear systems with unstabilisable and undetectable linearization // International Journal of Modelling, Identification and Control, 5, 2008, 1-13.

16. Alimhan K., Inaba H. Robust practical output tracking by output compensator for a class of uncertain inherently nonlinear systems // International Journal of Modelling, Identification and Control, Vol.4, 2008, No.4, 304-314, 2008.

17. Qian, C., Lin, W. Smooth output feedback stabilization of planar systems without controllable/observable linearization // IEEE Trans. Automat. Control., Vol. 47, 2002b, pp. 2068-2073.

Кейлан Алимхан – д-р наук, науч. сотр. Токио Денки университета (Япония)
350-0394, Токио, Япония; e-mail: 20787@ms.dendai.ac.jp;
Калимолдаев Максат Нурадилович – акад. НАН РК, д.ф.-м.н., проф., ген. директор
Института информационных и вычислительных технологий КН МОН РК;
050010, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: mnk@ipic.kz;
Нурболат Тасболатулы – PhD докторант Казахского национального университета
им. аль-Фараби, мл. науч. сотр. Института информационных и вычислительных
технологий КН МОН РК;050010, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: tasbolatuly@gmail.com