



## Исследование и оценка состояния технических объектов на основе компьютерного моделирования

*А.Р. Клюева*

*Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** в данной статье представлена роль компьютерного моделирования при исследовании и анализе состояния технических объектов на примере системы стабилизации температуры охлаждающего элемента термобокса. В работе описано построение системы стабилизации теплового режима охлаждающего элемента термобокса в виде математической модели. Сделаны выводы по проведенному исследованию.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, математическая модель, эксперимент, термобокс, электродвигатель, элемент Пельтье, температура, радиатор, вентилятор, переходные процессы, установившееся состояние.

Под компьютерным моделированием принято понимать комплексную компьютерную программу, которая может быть реализована на компьютере или совокупности взаимодействующих между собой электронно-вычислительных машин, реализующую абстрактную модель некоторой системы. В настоящее время методы компьютерного моделирования получили столь широкое распространение, что практически не осталось такой научной области, где бы эти методы не нашли своего применения. Компьютерное моделирование стало одним из самых эффективных инструментов математического моделирования и применяется при решении большого круга естественнонаучных и технических задач. Компьютерный эксперимент сейчас является одним из основных методов исследования сложных систем и физических процессов. Компьютерное моделирование как инструмент моделирования сложноорганизованных систем обладает целым рядом преимуществ по сравнению с реальным экспериментом. Например, компьютерное моделирование находит широкое применение в тех случаях, когда реальные эксперименты затруднены или даже невозможны из-за финансовых или физических препятствий, или могут дать непредсказуемый результат. Логичность и формализованность компьютерных моделей позволяют определить основные факторы, определяющие свойства

---

изучаемого объекта исследования. В частности, благодаря компьютерному моделированию можно исследовать поведение системы (объекта исследования) на изменение начальных условий и параметров моделирования; появление возмущающих воздействий [1-3].

Построение компьютерной модели основано на абстрагировании от конкретной природы явлений или исследуемого объекта. Оно состоит из двух этапов: первым этапом является создание качественной модели, а вторым – создание количественной модели. Чем больше свойств от исследуемого физического объекта будет выявлено и перенесено в компьютерную модель, тем более приближенной она окажется к реальной модели, и, соответственно, большими возможностями сможет обладать система, использующая данную модель.

Стоит упомянуть, что в компьютерном моделировании различают два типа моделирования: аналитическое моделирование и имитационное моделирование. При аналитическом моделировании изучаются математические модели реального объекта в виде алгебраических, дифференциальных и других уравнений, а также предусматривающих осуществление вычислительной процедуры, которая приводит к точному решению этих уравнений. При имитационном моделировании исследуются математические модели в виде алгоритмов, воспроизводящих функционирование исследуемой системы путем последовательного выполнения большого количества элементарных операций. Часто эти два вида моделирования используются совместно.

Оценка состояния сложного технического объекта, математические модели которого в общем случае описываются интегро-дифференциальными уравнениями, основывается на исследовании его поведения. Вид математических моделей объекта зависит от конечных целей мониторинга. Оценка состояния может базироваться на различных уровнях представления

---

технического объекта. Значительную роль в выборе модели объекта играют и те средства, с помощью которых будет осуществляться эта оценка: объем обрабатываемой информации, требуемая скорость обработки и т.д. [4]

Для задач предварительной оценки состояния предпочтительнее использовать упрощенные модели технического объекта, которые строятся на основе приближенных функциональных зависимостей между переменными объекта, полученными как в результате упрощения сложных математических соотношений, представляющих собой решения интегро-дифференциальных уравнений, так и в результате выявления и анализа экспертных и опытных данных. Часто такая оценка является достаточной для прогнозирования и предотвращения нештатных и аварийных ситуаций [5].

В данной статье в качестве технического объекта исследования рассмотрим поведение системы стабилизации температуры охлаждающего элемента термобокса.

Система стабилизации теплового режима охлаждающего элемента термобокса представляет собой совокупность корпусного вентилятора и радиатора. В качестве охлаждающего элемента термобокса используется модуль Пельтье TEC1-12706. Радиатор крепится элементу Пельтье посредством термопасты с хорошей теплопроводностью (рис. 1).

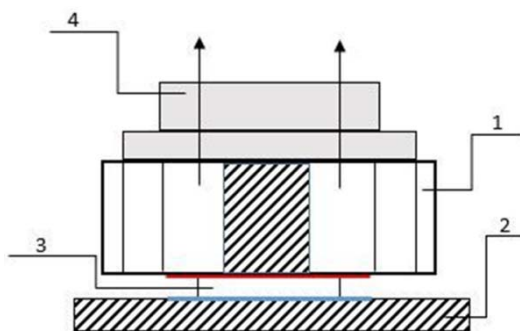


Рис. 1 – Элемент Пельтье с активным охлаждением:

1 – радиатор, 2 – алюминиевый брусок, 3 – элемент Пельтье (красная линия – нагревающая сторона элемента, синяя – охлаждающая), 4 – вентилятор

---

Модуль Пельтье представляет собой термопреобразователь, который работает по принципу, обратному действию термопары, т.е. принцип работы элемента Пельтье заключается в выделении или поглощении тепла в момент контакта разных материалов при прохождении через него тока (рис. 2).

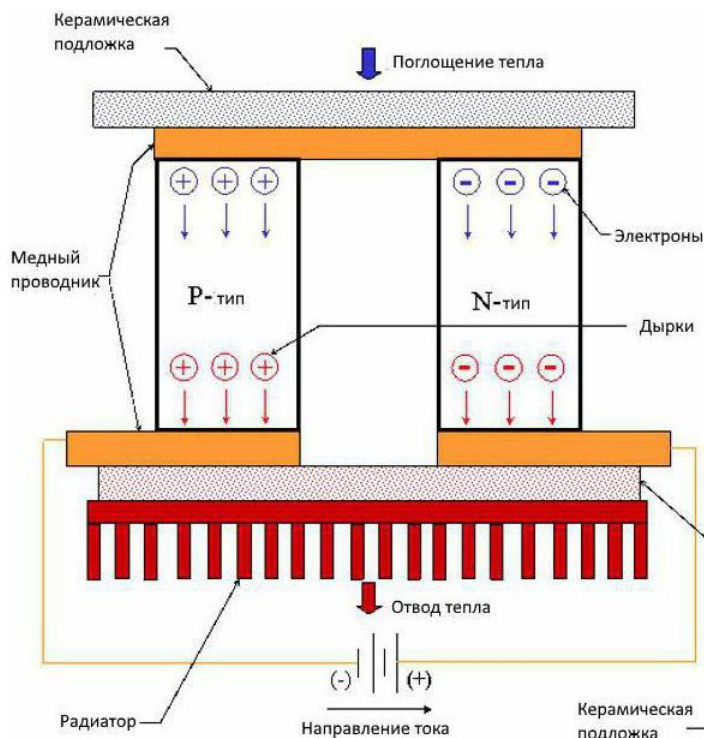


Рис. 2 – Принцип действия элемента Пельтье

Основной проблемой эксплуатации элементов Пельтье является то, что свободные электроны в веществе одновременно являются переносчиками и электрического тока, и тепла. Соответственно, в процессе своей работы нагревающаяся сторона элемента должна иметь качественный отвод тепла, иначе может произойти быстрый прогрев всего элемента, что приведет к выводу последнего из строя [6, 7].

Стрелками на схеме (рис. 1) показаны направления отвода тепла. Качество и точность системы охлаждения нагревающейся стороны элемента Пельтье определяется динамикой работы вентилятора, в связи с этим, большую роль в системах такого рода играет электропривод вентилятора. Для систем управления тепловыми процессами свойственно не учитывать

динамические особенности исполнительных подсистем, так как инерционность тепловых процессов существенно больше. То есть, все события, происходящие в исполнительной подсистеме системы стабилизации температурного режима, будут полностью не заметны на фоне динамики нагрева или охлаждения какого-то помещения. Однако, для случая, рассматриваемого в работе, это не так, потому что время, за которое произойдет перегрев нагревающейся стороны элемента Пельтье, может составлять секунды. Исходя из этого, динамика системы охлаждения в термобоксе будет зависеть как от динамики тепловых процессов, связанных с элементом Пельтье, так и от динамических особенностей используемого электродвигателя.

Примем, что в основе рассматриваемой электромеханической системы лежит электродвигатель 7015-С. Математическая модель электродвигателя постоянного тока с коллекторным управлением описывается следующей системой уравнений:

$$U - c_e \omega = L \frac{di}{dt} + R_i$$

$$c_m i = J \frac{d\omega}{dt} + M_c$$

где  $U$  – напряжение, подаваемое на коллектор двигателя;  $i$  – ток, потребляемый двигателем;  $R, L$  – параметры электрической части двигателя;  $J$  (параметр, характеризующий инерционные свойства якоря двигателя) – приведенный инерционный момент всех вращающихся масс;  $\omega$  – частота вращения якоря двигателя;  $M_c = \mu \omega^2$  – внешний, приложенный момент сопротивления, носящий аэродинамический характер с  $\mu = 1,1 * 10^{-7}$ ;  $c_m i, c_e$  – механическая и электрическая постоянные двигателя.

Как известно, динамика тепловых процессов носит ярко выраженный апериодический характер, в связи с этим термодинамические параметры

---

рассматриваемой модели описываются следующим дифференциальным уравнением [8]:

$$T \frac{d\theta}{dt} + \theta = N_1 - N_2$$

где  $\theta$  – текущая температура;  $N_1$  – мощность истока (постоянная величина, показывающая, какое количество теплоты получает горячая сторона элемента Пельтье во время работы);  $N_2$  – мощность стока (величина, показывающая, сколько тепла отводит вентилятор от элемента Пельтье в единицу времени), в данном случае она является некоторой функцией от угловой скорости:  $N_2 = f(\omega)$ ;  $T$  – постоянная времени элемента Пельтье, получена эмпирическим путем и равна 2,85 с. [9]

Тогда система уравнений примет вид:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{N_1}{T} e^{-\alpha\omega} - \frac{\theta}{T}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{c_m i}{J} - \frac{M_c}{J}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{U}{L} - \frac{c_g \omega}{L} - \frac{R_1}{L}$$

Используя паспортные и расчетные данные, перепишем систему уравнений следующим образом:

$$\frac{dx_1}{dt} = -a_{11}x_1 + a_{12}e^{-\alpha x_2}$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -a_{22}x_2^2 + a_{23}x_3$$

$$\frac{dx_3}{dt} = -a_{32}x_2 - a_{33}x_3 + bU$$

где  $\theta = x_1$ ;  $\omega = x_2$ ;  $i = x_3$ ;  $a_{11} = \frac{1}{T} = \frac{1}{2,85} = 0,35$ ;  $a_{12} = \frac{N_1}{T} = \frac{223,58}{2,85} = 78,45$ ;

$a_{22} = \frac{\mu}{J} = \frac{1,1 \cdot 10^{-7}}{1,423 \cdot 10^{-8}} = 0,0079$ ;  $a_{23} = \frac{c_m}{J} = \frac{0,078}{1,423 \cdot 10^{-8}} = 5487$ ;  $a_{32} = \frac{c_g}{L} = \frac{0,1}{0,0048} = 20,83$ ;

$$a_{33} = \frac{R}{L} = 16583,3; \quad b = \frac{1}{L} = \frac{1}{0,0048} = 206,74; \quad U = 12.$$

Численный анализ полученной математической модели будет происходить в графической среде имитационного моделирования Simulink программного пакета MATLAB [10, 11].

Полученной системе уравнений (1) соответствует следующая математическая модель:

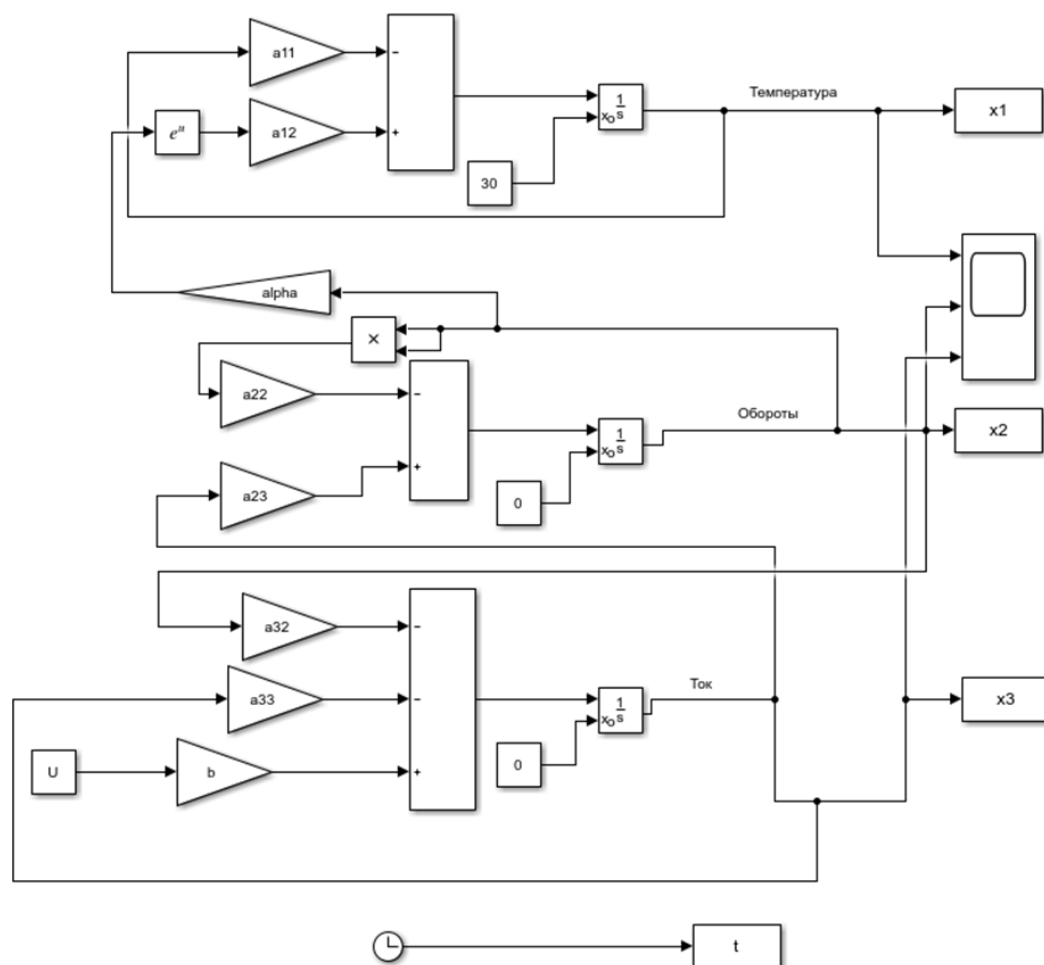
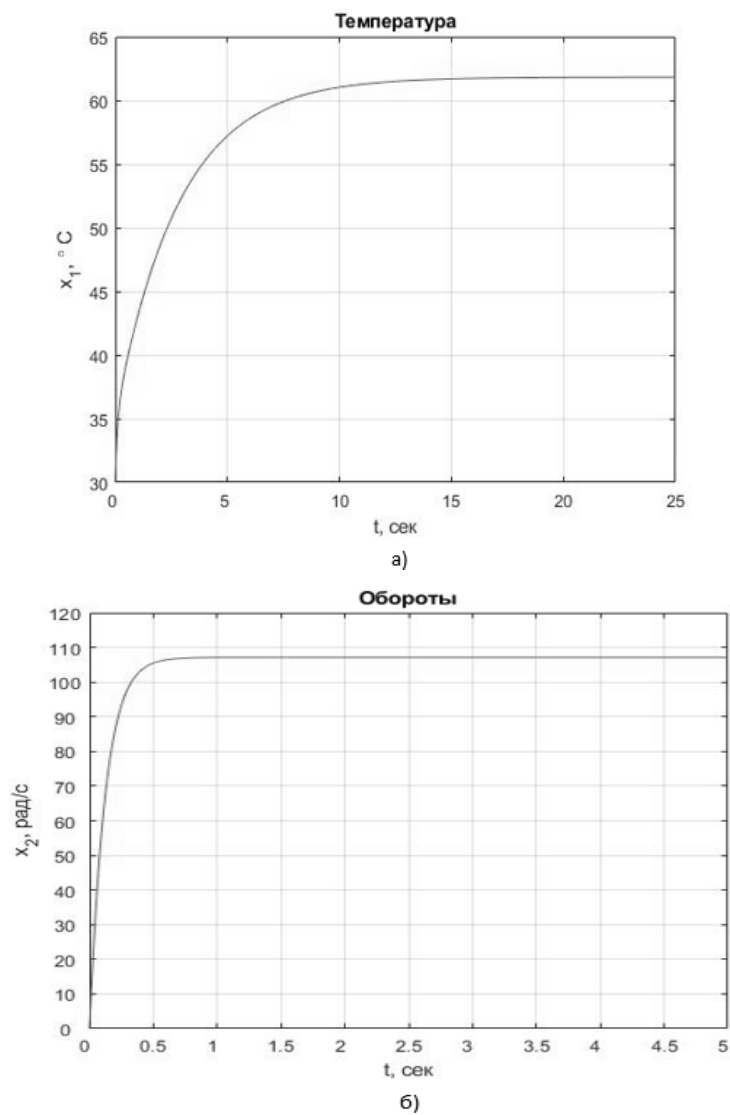


Рис. 3 – Математическая модель эксперимента

В качестве начальных условий для параметров  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  примем, соответственно, следующие значения: 30 (температура окружающей среды), 0, 0 (обороты двигателя и ток в начальный момент равны 0 – двигатель находится в состоянии покоя).

При моделировании синтезированной математической модели были получены следующие переходные процессы для переменных состояния  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  (рис. 4):





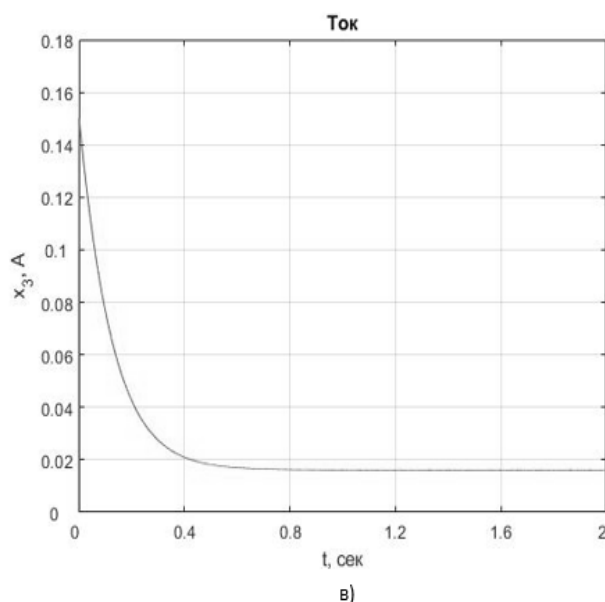


Рис. 4 – Переходные процессы: а) по температуре; б) скорости; в) току

Исходя из рис. 4, видно, что установившееся состояние характеризуется тремя координатами:  $x_{01}=61,82$ ;  $x_{02}=107,11$ ;  $x_{03}=0,016$ . Также можно говорить о том, что время переходного процесса двигателя под нагрузкой приблизительно равно 0,8 с, время же переходного процесса температуры – почти 20 с.

Проведенные исследования показали, что при синтезе систем управления термодинамическими процессами для термобоксов на основе элементов Пельтье, важное значение имеет учет динамики электромеханического преобразователя, который используется для отвода тепла с нагреваемой стороны элемента Пельтье.

Таким образом, в работе были наглядно показаны важность и эффективность компьютерного моделирования при проектировании и оценке поведения сложных систем. Не имея возможности спроектировать реальную систему, была создана математическая модель, которая учитывала основные электромеханические и тепловые процессы, происходящие в системе. Спроектированная система полностью оправдала заложенные предположения, результаты моделирования близки к реальным процессам,

происходящим в системы стабилизации теплового режима охлаждающего элемента термобокса.

### Литература

1. Дворецкий С.И., Муромцев Ю.Л., Погонин В.А., Схиртладзе А.Г. Моделирование систем – учебник. – М.: Академия, 2009. – 317 с.
  2. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
  3. Боев В.Д., Сыпченко Р.П. Компьютерное моделирование. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий, 2010. – 350 с.
  4. Жога Л.В., Бакулин П.А., Коренева В.В., Жога В.В. Поляризационный шум в сегнетоэлектриках. Компьютерное моделирование // Инженерный вестник Дона, 2017, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4459/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4459/).
  5. Клевцов С.И., Радченко С.А., Клевцова А.Б. Особенности оценки состояния технического объекта с использованием средств когнитивного моделирования. Известия Южного федерального университета. Технические науки. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2005, №1(45). – с.67 – 70.
  6. Лапшин В.П., Туркин И.А. Влияние свойств сервопривода шпинделя на динамику сверления глубоких отверстий малого диаметра // Вестник Донского государственного технического университета. – 2013. – №. 5-6 (74) – с. 125-130.
  7. Модуль Пельтье: технические характеристики. URL: [fb.ru/article/228355/modul-pelte-tehnicheskie-harakteristiki](http://fb.ru/article/228355/modul-pelte-tehnicheskie-harakteristiki).
  8. Капля В.И., Бурцев А.Г., Андриянов С.А., Соболева Е.К. Расчет режима работы элемента Пельтье, используемого в качестве охладителя в модуле осушки проб воздуха // Инженерный вестник Дона, 2017, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4200/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4200/).
  9. Simulink – графическая среда имитационного моделирования. URL: [matlab.ru/products/simulink](http://matlab.ru/products/simulink).
-



10. Gyurkovics, E. Periodica Mathematica Hungarica (2000) 40: 77. URL: doi.org/10.1023/A:1004846622180.

11. H. Gao, X. Wang. Simulation research on extension adaptive control of inverted pendulum / Intelligent Control and Automation Fifth World Congress, Volume 1, pp: 437 – 439, 15-19 June 2004.

### References

1. Dvoretckij S.I., Muromtsev YU.L., Pogonin V.A., Skhirtladze A.G. Modelirovanie system [System modeling] Uchebnik. M.: Akademiya, 2009. 317 p.

2. Samarskij A.A., Mikhajlov A.P. Matematicheskoe modelirovanie: Idei. Metody. Primery [Mathematical Modeling: Ideas. Methods. Examples]. M.: Fizmatlit, 2001. 320 p.

3. Boev V.D., Sypchenko R.P. Komp'yuternoe modelirovanie [Computer modelling]. M.: Internet-Universitet Informatsionnykh Tekhnologij, 2010. 350 p.

4. Zhoga L.V., Bakulin P.A., Koreneva V.V., Zhoga V.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4459/.

5. Klevtsov S.I., Radchenko S.A., Klevtsova A.B. Izvestiya YUzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2005. №1 (45). pp. 67 – 70.

6. Lapshin V.P., Turkin I.A. Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Rus). 2013. №. 5-6 (74). pp. 125-130.

7. Modul' Pel't'e: tekhnicheskie kharakteristiki [Peltier module: specifications]. URL: fb.ru/article/228355/modul-pelte-tehnicheskie-kharakteristiki/.

8. Kaplya V.I., Burtsev A.G., Andriyanov S.A., Soboleva E.K. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4200/.

9. Simulink – graficheskaya sreda imitatsionnogo modelirovaniya [Simulink – a graphical simulation environment]. URL: matlab.ru/products/simulink/.

10. Gyurkovics, E. Periodica Mathematica Hungarica (2000) 40: 77. URL: doi.org/10.1023/A:1004846622180.

---



11. H. Gao, X. Wang. Intelligent Control and Automation Fifth World Congress, Volume 1, pp.:437 – 439, 15-19 June 2004.