

**Вывод.** В данной работе приведена часть функций, встроенных в пакет для расчета динамики механизмов SW Motion. Помимо описанных, пакет так же позволяет учитывать силы притяжения, устанавливать имитации двигателей, демпферов, пружин кручения, прикладывать линейные, а также изменяемые по сложным законам моменты и силы, что позволяет рассчитать и получить информацию о работе практически любого механизма. Так же данный подход позволяет экономит время и ресурсы, затрачиваемые на проектирование, так как построение, дальнейшая корректировка моделей проектов и расчеты строятся в одном пакете на одном рабочем месте.

Сокращение ошибок и возможность прогнозирования влияния неблагоприятных факторов возможно благодаря проверки работоспособности системы как на первоначальном, так и на дальнейших этапах проектирования. Данный алгоритм является общим и применим в большинстве случаев.

**Библиографический список:**

1. Шипунов А.Г. Проектирование стрелково-пушечного вооружения / Тула: ТулГУ, 2008.—314с.
2. Solidworks. Программный продукт для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства [электронный ресурс];

УДК 629.7.02

**УПРАВЛЕНИЕ ВЕРТОЛЕТНЫМ СТЕНДОМ**

**Д.А. Марков**

*Научный руководитель д.т.н., профессор, Андриевский Борис Ростиславич*

*Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет*

*информационных технологий, механики и оптики, Санкт – Петербург,*

*Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт – Петербург*

**Введение.** Рассматриваемый объект имеет ряд сложностей для синтеза регулятора управлением движения: нелинейность, многомерность (два входа и два выхода) и значительная перекрестная связь между каналами управляемых величин.

**Объект управления.** Объект управления представляет собой двухроторную многомерную систему со значительным перекрестным взаимодействием.



Рис. 1. Объект управления

Двухроторная система напоминает вертолет, но угол атак ротора фиксированный. Аэродинамические силы управляются с помощью изменения скоростей двигателей. Значительное перекрестное взаимодействие наблюдается между действиями ротора. Каждым ротор влияет на положение наклонов. Объект управления описывается уравнениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 a_v}{dt^2} = \frac{c_1 \tau_1^2 + d_1 \tau_1 - M_g \sin(a_v) - B_{1a_v} \left( \frac{da_v}{dt} \right) - B_{2a_v} \operatorname{sign} \left( \frac{da_v}{dt} \right)}{I_1} - \frac{K_{gy} (c_1 \tau_1^2 + d_1 \tau_1) \left( \frac{da_h}{dt} \right) \cos(a_v)}{I_1} \\ \frac{d^2 a_h}{dt^2} = \frac{c_2 \tau_2^2 + d_2 \tau_2 - B_{1a_h} \left( \frac{da_v}{dt} \right) - B_{2a_h} \operatorname{sign} \left( \frac{da_h}{dt} \right) - M_R}{I_2} \\ \tau_1 = \frac{k_1}{T_{11}s + T_{10}} u_1 \\ \tau_2 = \frac{k_2}{T_{21}s + T_{20}} u_2 \\ \frac{dM_R}{dt} = \frac{\left( k_c - \frac{k_c T_0 T_{10}}{T_{11}} \right) \tau_1 + \frac{k_c T_0 k_1}{T_{11}} u_1 - M_R}{T_p} \end{array} \right. \quad (1)$$

В результате линеаризации системы (1) в особой точке равновесия получаем уравнение системы в форме состояний:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $x(t) = [a_v, a_h, \tau_1, \tau_2, M_R, \frac{da_v}{dt}, \frac{da_h}{dt}]$  - вектор состояний,  $u(t)$  - вектор входных воздействий,  $y(t)$  - выходной вектор системы,  $A$  - матрица состояний,  $B$  - матрица входных воздействий,  $C$  - матрица выхода,  $a_v$  - угол тангажа,  $a_h$  - угол рысканья,  $\tau_1$  - момент нагрузки на валу главного двигателя,  $\tau_2$  - момент нагрузки на валу хвостового двигателя,  $M_R$  - момент перекрестных связей.

**Линейный квадратичный регулятор.** Суть оптимального управления заключается в минимизации некоторых параметров системы (время переходного процесса, расход топлива и т.д.), зачастую эта задача является противоречивой, поскольку минимизация одного параметра приводит к максимизации другого, вследствие для данной задачи составляется критерий оптимальности, который и будет являться компромиссом для минимизируемых параметров. Критерий качества задается выражением:

$$J(t, t_f) = \int_t^{t_f} (x(\tau)^T Q x(\tau) + u(\tau)^T R u(\tau)) d\tau, \quad (3)$$

где  $t$  и  $t_f$  - начальное и конечное значение времени соответственно,  $Q$  - квадратная симметричная матрица, называемая матрицей взвешивания состояний,  $R$  - квадратная симметричная матрица, называемая матрицей затрат на управление.

Вектор управления для регулятора обратной связи определяется как

$$u(t) = -Kx(t) \quad (4)$$

$K$  - матрица обратных связей должна минимизировать функционал (3).

Для нахождения оптимальных коэффициентов матрицы обратных связей необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} PA - PBR^T P = -A^T P - Q \\ K = R^{-1} B^T P \end{cases} \quad (5)$$

Первое уравнение системы (5) представляет собой уравнение Риккати, решение которого определяет симметричную положительно определенную матрицу  $P$ . При подстановке матрицы  $P$  во второе уравнение системы (5), находим коэффициенты регулятора, при использовании которого в системе гарантируется минимум функционала качества (3).

Данная постановка вопроса решает задачу регулирования выходных переменных объекта до значения уставки 0, что позволяет подобрать коэффициенты матриц  $Q$  и  $R$  критерия качества таким образом, чтобы улучшить показатели качества исследуемой системы.

**Оптимальный следящий регулятор.** Следящий регулятор представляется соотношением вида:

$$u = L_g \xi - Kx, \quad (6)$$

где  $\xi$  - вектор состояния генератора модели задающего воздействия,  $L_g$  - матрица прямых связей.

Модель генератора задающего воздействия находится методом последовательного дифференцирования функции, задающей траектории следования выходных сигналов объекта управления:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = \Gamma \xi \\ g = H \xi \end{cases} \quad (7)$$

Матрица связи находится из уравнения типа Сильвестра:

$$\begin{cases} (A - BK)M_g + BL_g = M_g \Gamma \\ H = CM_g \end{cases} \quad (8)$$

Нахождения матрицы прямых связей  $L_g$  гарантирует слежение за заданной траекторией с нулевой установившейся ошибкой.

**Алгоритм «Роение частиц».** Для численной реализации алгоритма необходимо выбрать матрицы Q и R таким образом, чтобы показатели качества имели оптимальное значение, но поскольку прямой связи между показателями качества и матрицами Q и R нет, будем использовать алгоритм оптимизации, позволяющий подобрать коэффициенты матриц Q и R.

Метод роя частиц – был разработан Джеймсом Кеннеди и Расселом Эберхартом в 1995г. Идея алгоритма была почерпнута из социального поведения некоторых живых особей – стаи птиц или косяка рыб.

Все возможные решения могут быть представлены как частицы в стае. Каждая частица имеет положение и вектор скорости, и координаты каждого положения представляет собой значение параметра. Частицы изменяют свою скорость и положение согласно расчетным формулам:

$$X_i(k + 1) = X_i(k) + V_i(k + 1) \quad ()$$

$$V_i(k + 1) = w(k) * V_i(k) + c_1 * rand_1(pbest_i - X_i(k)) + c_2 * rand_2(gbest - X_i(k)) \quad ()$$

Где  $pbest_i$  – наилучшая координата частицы,  $gbest$  – наилучшая координата стаи,  $X_i$  – координаты частицы,  $V_i$  – скорость частицы,  $w$  – вес инерции,  $c_1, c_2$  – когнитивный и социальный постоянные ускорения соответственно,  $rand_1, rand_2$  – случайные числа из диапазона [0,1].

Алгоритм был реализован согласно следующим пунктам:

1. Внешний цикл: Запуск популяции, вычисление целевой функции
2. Начальная популяция, начальные  $gbest$  и  $pbest$ ,
3. Цикл алгоритма,
4. Обновление  $w, v, x$ ,
5. Обработка нарушения границ,
6. Вычисление целевой функции,
7. Сравнение текущих значений целевой функции и  $pbest$  с наилучшими значениями,
8. Поиск лучшей частицы,
9. Фиксирование лучшего значения целевой функции,
10. Обновление лучших значений целевой функции и  $gbest$ ,

где целевая функция – абсолютная ошибка между выходом модели объект и выходом модели генератора задающего воздействия.

Применяя настроенный регулятор к объекту управления, видим, что угол тангажа (рисунок 3) и угол рысканья (рисунок 2) изменяются с согласно заданной траектории с нулевой установившейся ошибкой и оптимальным быстродействием.

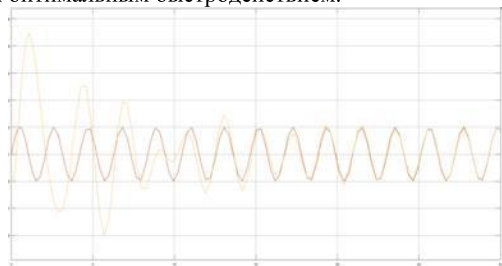


Рис. 2. Угол рысканья

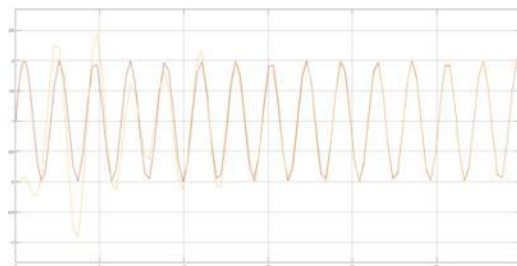


Рис. 3. Угол тангажа

**Фильтр Калмана-Бюси для непрерывного времени (регулятор по выходу).** Фильтр Калмана является наблюдателем, суть которого заключается в восстановлении состояния системы, что в последствии позволяет управлять исходной системой только по выходной величине, что безусловно является преимуществом, по сравнению с управлением по состоянию, поскольку некоторые состояния могут быть трудно доступны для измерения или недоступны вообще. Задачей фильтрации Калмана является выделение полезного, информационного сигнала из его смеси с помехой. Для синтеза наблюдателя предполагается что уравнения реальной системы имеют вид:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax(t) + Bu(t) + \omega_1(t) \\ y(t) = Cx(t) + \omega_2(t) \end{cases} \quad (9)$$

Наблюдатель имеет вид:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L[y(t) - C\hat{x}(t)] \quad (10)$$

Ошибка восстановления имеет вид:

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (11)$$

Среднее значение квадрата ошибки восстановления как критерия качества наблюдения задается выражением:

$$J = M\{e^T(t)Pe(t)\} \quad (12)$$

с заданной положительно определенной матрицей  $P$  является показателем того, насколько успешно наблюдатель восстанавливает состояние системы в момент времени  $t$ .

Автокорреляционные функции сигналов  $\omega_1(t)$  и  $\omega_2(t)$  имеют следующий вид:

$$R_{\omega_1} = M\{\omega_1(t)\omega_1^T(t)\} = W\delta(t - \tau), \quad (13)$$

$$R_{\omega_2} = M\{\omega_2(t)\omega_2^T(t)\} = V\delta(t - \tau), \quad (14)$$

где  $W$  и  $V$  - ковариационные матрицы сигналов  $\omega_1(t)$  и  $\omega_2(t)$  соответственно.

Решение задачи оптимального наблюдения, т.е. минимизации критерия качества (12), получается путем выбора матрицы коэффициентов усиления:

$$L = PC^T(t)V^{-1}, \quad (15)$$

где матрица  $P$  – решение матричного уравнения Риккати относительно ковариационных матриц шумов измерений и наблюдения:

$$AP + PA^T + GVG^T - PC^T V^{-1} CP = 0. \quad (16)$$

Т.о. найденная матрица  $L$  гарантирует оптимальность наблюдателя, обеспечивающего компромисс между быстротой сходимости восстанавливаемой и наблюдаемой переменных и нечувствительности наблюдателя к возможным помехам измерений и наблюдений.

**Линейный квадратичный Гауссовский регулятор.** Применяя совместно рассчитанный следящий регулятор и фильтр Калмана, появляется возможность управления системой по выходу, с помощью, так называемого линейного квадратичного Гауссова регулятора, система управления таким образом задается уравнениями(2), (10), (15):

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t), \\ \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L[y(t) - C\hat{x}(t)] \\ u = L_g \xi - Kx \\ \dot{\xi} = \Gamma \xi \end{cases} \quad (17)$$

На рисунке 4 представлены сигналы углов тангажа и азимута (пунктирные линии – с предположением, что вектор состояния измеряем, цветом изображены с применением фильтра Калмана).

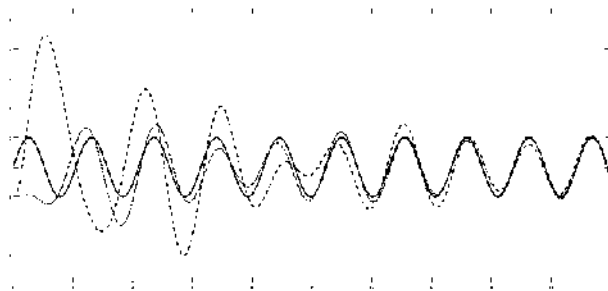


Рис. 4. – Выходные сигналы системы

**Заключение.** Результатом проделанной работы является оптимальный линейный квадратичный следящий регулятор и наблюдатель, восстанавливающий вектор состояния объекта управление. Совместное использование регулятора и наблюдателя позволяет получить регулятор по выходу системы, что позволяет избежать измерение остальных переменных, входящих в вектор состояния модели системы. Оптимальный выбор весовых коэффициентов матриц, характеризующих критерий оптимальности системы, позволяет повысить показатели качества системы.

#### **Библиографический список:**

- 1 Chalupa P., Prikryl J., J.Novak. Modelling of twin rotor MIMO system // 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, DAAAM 2014. DAAAM, 2014. P. 249 – 258.
- 2 Pandey S., Laxmi V. Optimal control of twin rotor MIMO system using LQR technique // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2014. Vol. 1. P. 11–21.
- 3 Shaik F., Purwar S., Pratap B. Real-time implementation of Chebyshev neural network observer for twin rotor control system // Expert Systems with Applications. 2011. Vol. 38. P. 13043–13049.
- 4 Rahideh A., Shaheed M. Constrained output feedback model predictive control for nonlinear systems // Control Engineering Practice. 2012. Vol. 20. P. 431–443.
- 5 Rahideh A., Bajodah A., Shaheed M. Real time adaptive nonlinear model inversion control of a twin rotor MIMO system using neural networks // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2012. Vol. 25. P. 1289–1297.
- 6 Tao C., Taur J., Chen Y. Design of a parallel distributed fuzzy LQR controller for the twin rotor multi input multi-output system // Fuzzy Sets and Systems. 2010. Vol. 161. P. 2081–2103.
- 7 Juang J., Tu K. Design and realization of a hybrid intelligent controller for a twin rotor mimo system // Journal of Marine Science and Technology. 2013. Vol. 21, no. 3. P. 333–341.
- 8 Juang J., Tu K., Liu W. Hybrid intelligent PID control for MIMO system // Springer-Verlag. 2006. Vol. 3. P. 654–663.
- 9 Juang J., Lin R., Liu W. Comparison of classical control and intelligent control for a MIMO system // Applied Mathematics and Computation. 2008. Vol. 205. P. 778–791.
- 10 Juang J., Chiang Y. Reinforcement learning with FCMAC for TRMS control // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 2013. Vol. 5. P. 1383–1389.
- 11 Квасернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. - М.: Мир, 1977.
- 12 Мирошник И.В., Никифоров В.О. Синтез линейных систем автоматического управления. - СПб: СПбГИТМО, 2000.

**УДК 004.021**

#### **АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ СОСТОЯНИЯ ОПЕРАТОРА СИСТЕМЫ ПО СИГНАЛУ, ОТОБРАЖАЮЩЕМУ ДВИЖЕНИЕ ЕГО ГЛАЗ**

**Моисеева Н.М., Яфясов Р.Р.**

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова*

Проблема оценивания состояния человека, находящегося на ответственном объекте всегда была актуальной, особенно, если оператор находится вне досягаемости от оценивающих специалистов, когда нет возможности повлиять на работу человеко-машинной системы, где человек выполняет важнейшую роль, что может привести к нежелательным последствиям. Поэтому возникает потребность в разработке технологии оценки состояния оператора удаленно. Для этого возможно применить технологию обработки сигналов, посредством использования корреляционного анализа. Корреляционный анализ дает возможность установить наличие в сигналах определенной взаимосвязи или же ее отсутствия, что и позволит оценить степень соответствия оператора норме.

Данный метод подразумевает нахождение коэффициента взаимной корреляции между показателями предполагаемой нормы и показателями самого оператора. Таким образом, решение задачи сводится к тому, что необходимо найти коэффициент взаимной корреляции двух сигналов: один из них сигнал, в котором заложена информация о "норме" состояния, другой сигнал - случайный процесс. Для осуществления данной технологии требуется задать сигнал, который будет содержать информацию о предполагаемой норме, которая состоит из показателей, принимающих определенные значения, в конкретный момент времени. Данные сведения должны быть представлены в виде