

Данный подход был применен при проектировании системы управления роботизированной установкой с шаговым конвейером, предназначенной для вторичной упаковки мороженого (рис. 4).



Рисунок 4 – Шаговый конвейер с серводвигателем

Таким образом, на практике подтверждена эффективность применения сервопривода в системах управления шаговыми конвейерами. Следует также отметить хорошую совместимость сервопривода с цифровыми системами управления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рассудов, Л. Н. Системы на кристалле: Новые возможности управления сервоприводом / Л. Н. Рассудов, А. П. Балковой // Труды VIII международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск, 07–09 октября 2014 г. Саранск, 2014. – Т.1 – С. 38–43.
2. Проектирование нестандартного оборудования: справочно-методическое пособие / Н. П. Игнатъев. – Азов: АзовПечать, 2013. – 483 с.
3. Обеспечение точности при проектировании приводов и механизмов: справочно-методическое пособие / Н. П. Игнатъев. – Азов: АзовПечать, 2012. – 110 с.

УДК 621.34-52

ОПТИМАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОСТОЯННОГО ТОКА

Супрунчук П. Д.¹, Прокопеня О. Н.¹, Прожижко О. Г.¹

1) Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь

Системы оптимального управления находят все большее применение в технике. Данные системы обеспечивают высокое качество регулирования, но достаточно трудоемки в проектировании. Поиск оптимального управления представляет собой сложную математическую задачу [1], решение которой основано на описании системы переменными состояниями [2]. На практике, как правило, используется частный случай ее решения, который именуется аналитическим конструированием регулятора. Под аналитическим конструированием регуляторов

понимают решение задачи оптимального управления для линейного объекта и квадратичного критерия [3]. Решение данной задачи актуально для приводов постоянного тока.

Эффективность решения данной задачи зависит от выбора коэффициентов матриц, входящих в критерий качества регулирования. Однозначных рекомендаций по их выбору нет, корректность выбора зависит от опыта проектировщика. В настоящее время является актуальной проблема экономии электроэнергии. Затраты энергии на регулирование определяются значением матрицы R , входящей в интегральный критерий. В данной работе выполнен количественный анализ влияния матрицы R на затраты энергии на регулирование применительно к конкретному приводу постоянного тока.

Пусть уравнения объекта

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t), \quad x(t_0) = x_0, \quad (1)$$

где $A(t)$ и $B(t)$ – матрицы объекта.

Критерий качества регулирования

$$I = \int_{t_0}^{t_k} (u^T R(t)u + x^T Q(t)x) dt + x^T(t_k) F_k x(t_k), \quad (2)$$

где $Q(t)$ – симметричная, неотрицательно-определенная весовая матрица;
 $R(t)$ – симметричная, положительно-определенная весовая матрица.

Минимальное значение критерия, соответствующее оптимальному управлению, ищется в виде квадратичной формы

$$I^*[x(t), t] = x^T P(t)x, \quad (3)$$

где $P(t)$ – весовая матрица.

Решением задачи нахождения минимума критерия является оптимальное управление

$$U^*(t) = -R^{-1}(t)B^T(t)P(t)x(t). \quad (4)$$

При этом матрица $P(t)$ находится из решения матричного нелинейного дифференциального уравнения Риккати [3]

$$-\dot{P}(t) = PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q. \quad (5)$$

Даже в случае, если объект является стационарным, а матрицы R и Q имеют постоянные коэффициенты, матрица P зависит от времени.

Матрица P может состоять из постоянных коэффициентов только при оптимизации на бесконечном интервале времени. В этом случае коэффициенты матрицы представляют собой установившееся решение уравнения (5), которое является решением алгебраического уравнения

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0. \quad (6)$$

Если обозначить установившееся решение \bar{P} , то при постоянных коэффициентах матриц оптимальное управление

$$U^*(t) = -R^{-1}B^T \bar{P}x(t). \quad (7)$$

Данное выражение можно представить в виде

$$U^*(t) = -Kx(t). \quad (8)$$

где $K = -R^{-1}B^T \bar{P}$.

Из (8) следует, что оптимальная система регулирования будет иметь такую же структуру, как и система, синтезированная методом размещения полюсов (с обратными связями по всем переменным состояниям). Однако коэффициенты в цепях обратной связи (коэффициенты матрицы K) вычисляются согласно (8).

В критерии качества (2) принимаем

$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, а матрицу R будем изменять в процессе анализа.

В качестве объекта регулирования принят двигатель постоянного тока 2ПБ112МУХЛ4, для которого

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 106 \\ -26,6 & -145 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 15 \end{bmatrix};$$

При подстановке значений матриц в (6) получаем

$$\begin{aligned} PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q &= \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 & 106 \\ -26,6 & -145 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -26,6 \\ 106 & -145 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \end{bmatrix} \\ &- \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 15 \end{bmatrix} * [R]^{-1} * \begin{bmatrix} 0 & 15 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} -53.2p_{12} + 1 - 225p_{12}^2/R & -26.6p_{22} + 106p_{11} - 145p_{12} - 225p_{12}p_{22}/R \\ -26.6p_{22} + 106p_{11} - 145p_{12} - 225p_{12}p_{22}/R & 212p_{12} - 290p_{22} - 225p_{22}^2/R \end{bmatrix} = 0. \end{aligned}$$

Приравниваем к нулю элементы полученной матрицы

$$-53.2p_{12} + 1 - 225p_{12}^2/R = 0$$

$$-26.6p_{22} + 106p_{11} - 145p_{12} - \frac{225p_{12}p_{22}}{R} = 0$$

$$212p_{12} - 290p_{22} - \frac{225p_{22}^2}{R} = 0.$$

Решением данных уравнений при заданном значении матрицы R находятся значения коэффициентов матрицы P и матрицы K , соответствующие оптимальному управлению (8). Результаты вычислений для различных R приведены в таблице 1.

Для оценки качества переходных процессов и энергопотребления привода разработана математическая модель в приложении SIMULINK, которая представлена на рисунке 1.

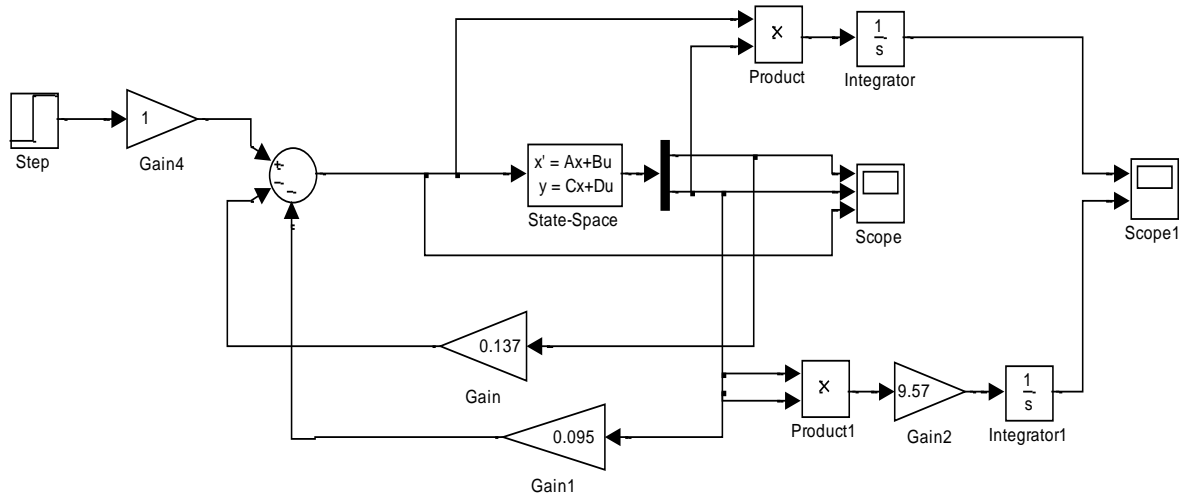


Рисунок 1 – Математическая модель привода в приложении SIMULINK

В модели предусмотрены блоки для вычисления потребляемой энергии и потерь в приводе. Они вычислялись за фиксированный интервал времени после пуска без нагрузки. При этом осуществлялась отработка заданного значения скорости, которое также поддерживалось постоянным. График зависимости потребленной приводом энергии от времени при пуске без нагрузки имеет вид, приведенный на рисунке 2.

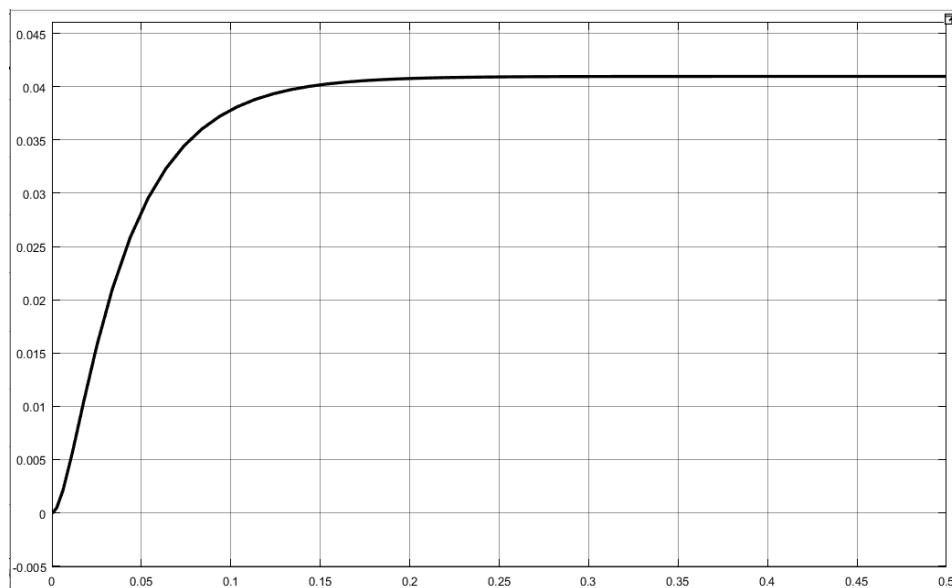


Рисунок 2 – Потребление энергии приводом в процессе разгона

Предполагается, что при достижении установившейся скорости двигатель работает в режиме идеального холостого хода, ток принимает нулевое значение, и потребление энергии прекращается. Установившееся значение на рисунке 2 соответствует энергии, потребленной за время пуска. Результаты расчета для различных значений R приведены в таблице 1.

В таблице 1 приведено также время регулирования при допустимом отклонении 5 %, характеризующее длительность переходного процесса. Во всех случаях обеспечивалось нулевое перерегулирование (монотонный переходной процесс).

Таблица 1 – Результаты вычислений потерь энергии

R	0,1	0,3	0,5	0,8	1,0	2,0
K_1	1,859	0,776	0,498	0,326	0,265	0,137
K_2	1,273	0,555	0,354	0,239	0,189	0,095
$Q_{\text{ПОТР}}, \text{Дж}$	2,360	1,975	1,860	1,804	1,782	1,730
$Q_{\text{ПОТЕРЬ}}, \text{Дж}$	1,505	1,126	1,017	0,957	0,935	0,883
$t_{\text{рег}}, \text{с}$	0,070	0,089	0,106	0,112	0,118	0,127

Результаты моделирования показывают, что с увеличением значения R снижается энергопотребление привода за счет уменьшения потерь. Разность между количеством потребленной энергии и величиной потерь постоянна и равна кинетической энергии ротора при установившейся скорости. При изменении R от 0,1 до 2,0 потери снижаются в 1,7 раза. Переходный процесс растягивается с 0,071 до 0,127 с (в 1,8 раза). В таблице 1 приведены соответствующие значения коэффициентов в цепях обратной связи K_1 и K_2 .

Таким образом, в ходе исследования установлено, что увеличивая значение матрицы R , можно снижать энергопотребление привода, что сопровождается увеличением длительности переходного процесса. Это дает возможность в каждом конкретном случае обеспечивать минимальное энергопотребление при заданном времени регулирования. Для расчета можно использовать полученные на основе решения уравнения Риккати алгебраические уравнения, а также разработанную в приложении SIMULINK математическую модель.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании оптимальных систем регулирования на основе двигателей постоянного тока.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник: в 5 т. / под ред. П. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. – 2-е изд. перераб. и доп. Т. 4: теория оптимизации систем автоматического управления. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 744 с.
2. Филлипс, Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филлипс, Р. Харбор. – М.: Лабора-тория базовых знаний, 2001. – 616 с.
3. Солодовников, В. В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / В. В. Солодовников, В. Н. Плотников, А. В. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с.