

УДК 681.5+621.52

Прокопеня О. Н., Прожижко О. Г., Олех А. Г., Лапука А. С.

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ОПТИМАЛЬНОГО ПРИВОДА
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Брестский государственный технический университет. Прокопеня О. Н. – заведующий кафедрой АТПиП, к.т.н., доцент, Прожижко О. Г. – аспирант, Олех А. Г. – старший преподаватель, Лапука А. С. – старший преподаватель.

Приводы постоянного тока широко применяются в станках и промышленных роботах. Их работа характеризуется частыми пусками и торможениями, во время которых происходит рост тока и, как следствие, имеют место повышенные потери энергии в якорной обмотке. Поэтому для данных приводов является актуальной задача снижения потерь.

Ранее была решена задача построения оптимального привода с регулируемой скоростью [1, 2] на основе решения задачи аналитического конструирования регулятора [3]. В результате получены аналитические зависимости для расчета оптимальных значений коэффициентов обратной связи по скорости и току двигателя

$$k_1 = \frac{1}{k_y} \left(\sqrt{c_e^2 + k_y^2 q_{11} / r} - c_e \right), \quad (1)$$

$$k_2 = \frac{R_{\text{Я}}}{k_{\text{У}}} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2c_{\text{М}} L_{\text{Я}} k_{\text{У}}}{J_{\text{ПП}} R_{\text{Я}}^2} \cdot k_1 + \frac{k_{\text{У}}^2}{R_{\text{Я}}^2} \frac{q_{22}}{r}} \right), \quad (2)$$

где $k_{\text{У}}$ – коэффициент передачи силового преобразователя;
 $c_{\text{е}}$ и $c_{\text{М}}$ – постоянные коэффициенты, зависящие от конструктивных параметров двигателя.

$R_{\text{Я}}$ – сопротивление якорной обмотки двигателя;

$J_{\text{ПП}}$ – приведенный к валу двигателя момент инерции привода;

$L_{\text{Я}}$ – индуктивность якорной обмотки двигателя;

q_{11} , q_{22} и r – элементы матриц Q и R , входящих в критерий оптимизации.

Данные матрицы имеют вид

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 \\ 0 & q_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R = [r] \quad (4)$$

При этом матрица Q позволяет воздействовать на показатели качества переходного процесса, а матрица R на затраты энергии на регулирование. Из (1) и (2) следует, что важны не абсолютные значения элементов матриц, а соотношения q_{11}/r , q_{22}/r . Это позволяет при расчете принимать, например $r=1$, и изменять q_{11} , q_{22} . В результате проведенного анализа [1] было выявлено, что снижение потерь в приводе вызывает уменьшение q_{11} и увеличение q_{22} при неизменном r . Соответственно, это сопровождается уменьшением k_1 и увеличением k_2 . Результаты были получены для одного типоразмера двигателя 2ПБ112М мощностью 0,75 кВт, поэтому представляет интерес, насколько они применимы для других типоразмеров двигателей.

Последующий анализ был выполнен с использованием (1), (2) и математической модели, представленной на рисунке 1, которая позволяет определять потери в приводе.

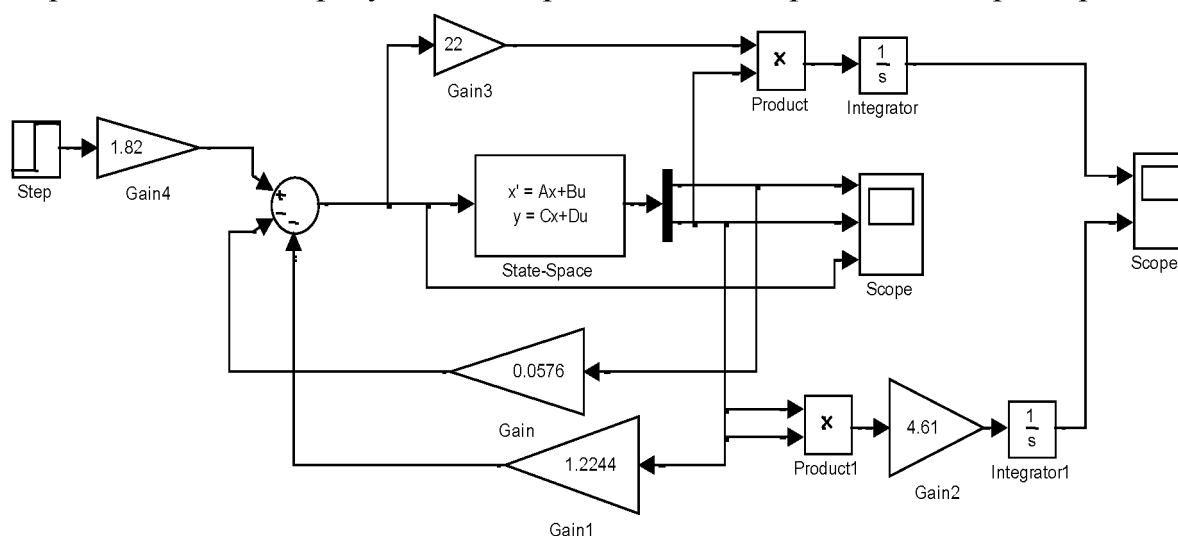


Рисунок 1 – Математическая модель привода в приложении Simulink.

Было исследовано влияние постоянной $c_{\text{е}}$, которая зависит от числа пар полюсов и существенно изменяется даже в пределах одного типоразмера двигателя, на коэффициенты k_1 , k_2 . Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчета для двигателя 2ПБ112М.

$P_H, \text{кВт}$	0,34	0,45	0,75	1,1	1,4
c_e	2,390	1,763	1,274	0,890	0,665
k_1	0,3515	0,3742	0,3930	0,4086	0,4170
k_2	0,3741	0,3568	0,3609	0,3829	0,4032

Оба коэффициента увеличиваются по мере уменьшения c_e , но это увеличение не столь значительно. Для двигателя максимальной мощности из данной серии (2ПБ180М, 12 кВт) при тех же значениях матриц Q и R коэффициенты $k_1=0,420$; $k_2=0,446$. Таким образом, при неизменных значениях матриц Q и R значения k_1 , k_2 располагаются в довольно узком диапазоне, что можно учитывать при настройке привода.

Особенностью приводов промышленных роботов, манипулирующих объектами различной массы, является то, что приведенный момент инерции привода может изменяться в довольно широких пределах. Результаты анализа влияния приведенного момента инерции на настройки привода и потери энергии для двигателя 2ПБ112М (0,75 кВт) приведены в таблицах 2-4. Приведенный момент инерции изменялся кратно моменту инерции ротора J_P .

Таблица 2. Влияние приведенного момента инерции на настройки привода.

$J_{\text{пр}}$	J_P	$2J_P$	$4J_P$	$10J_P$
k_1	0,9437	0,9437	0,9437	0,9437
k_2	0,9053	0,8598	0,8362	0,8219

Десятикратное увеличение момента инерции приводит к снижению k_2 в пределах 10%. Вследствие этого, построение адаптивного привода, в котором k_2 перестраивается в зависимости от $J_{\text{пр}}$, может показаться неоправданным. Поэтому было оценено влияние изменения момента инерции на величину потерь при фиксированных настройках привода на минимальный и максимальный момент инерции. Результаты приведены в таблицах 3-4.

Таблица 3. Зависимость потерь от приведенного момента инерции при настройке привода на $J_{\text{пр}}=J_P$ ($k_1=0,9437$; $k_2=0,9053$)

$J_{\text{пр}}$	J_P	$2J_P$	$4J_P$	$10J_P$
$t_P, \text{с}$	0,055	0,115	0,230	0,590
$\Delta P, \text{Дж}$	276	552	1105	2761

Таблица 4. Зависимость потерь от приведенного момента инерции при настройке привода на $J_{\text{пр}}=10J_P$ ($k_1=0,9437$; $k_2=0,8219$).

$J_{\text{пр}}$	J_P	$2J_P$	$4J_P$	$10J_P$
$t_P, \text{с}$	0,050	0,105	0,220	0,540
$\Delta P, \text{Дж}$	298	597	1194	2984

Полученные результаты показывают, что при любой настройке величина потерь строго пропорциональна приведенному моменту инерции. В то же время, при настройке на максимальный момент инерции величина потерь на 8% выше. Поэтому, целесообразно выполнять настройку привода (вычислять оптимальные значения k_1 , k_2)

на минимальное значение момента инерции. Применять адаптивное управление в данном случае не целесообразно.

Следует также отметить, что во всех случаях снижение потерь сопровождается практически пропорциональным увеличением длительности переходного процесса (времени регулирования). Поэтому максимально допустимое время регулирования фактически является тем фактором, который ограничивает возможность дальнейшего снижения потерь, хотя это можно осуществить за счет изменения значения матрицы Q .

Все вышеизложенное позволяет сделать вывод, что оптимальный регулируемый по скорости привод постоянного тока с минимальным энергопотреблением может быть построен инженерным методом с использованием зависимостей (1), (2) и рекомендаций по выбору матриц Q и R , изложенных в [1].

Список использованных источников

1. Оптимизация привода постоянного тока с регулируемой скоростью. О. Н. Прокопеня, Л. И. Вабищевич, А. В. Францевич, О. Г. Прожижко, А. С. Лапука // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2023. – № 2. – С. 93–96.
2. Оптимальный электропривод постоянного тока. П. Д. Супрунчук, О. Н. Прокопеня, О. Г. Прожижко // Новые технологии и материалы, автоматизация производства : сборник статей / Брестский государственный технический университет – Брест : Издательство БрГТУ, 2021. – С. 20–25.
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.