

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТУРБОМЕХАНИЗМОМ С АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

Опейко О.Ф., к.т.н., доц.

Белорусский национальный технический университет

просп. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь

E-mail: oopeiko@bntu.by

Рассматривается синтез замкнутой по напору системы частотного управления асинхронным электродвигателем турбомеханизма. Результаты математического моделирования, представленные в работе, подтверждают приемлемость предложенного метода синтеза.

Ключевые слова: частотное управление, электропривод, адаптация, моделирование.

Введение. Частотное управление асинхронными короткозамкнутыми электродвигателями для турбомеханизмов (насосов, вентиляторов, компрессоров) находит все большее применение, поскольку дает значительную экономию энергии по сравнению с нерегулируемыми электроприводами.

Как асинхронному двигателю (АД), так и турбомеханизму свойственны нелинейность и изменение параметров в широких пределах в процессе функционирования [1-3]. Поэтому актуальной является задача синтеза системы управления напором, обеспечивающей робастность, то есть стабильность динамических свойств в условиях изменений параметров.

Анализ предыдущих исследований.

Актуальность построения адаптивных ПИД-регуляторов определяется их широким применением в системах промышленной автоматики и в электроприводах и подтверждается большим количеством опубликованных работ. В частности, в [4] предложен метод синтеза, основанный на анализе частотных характеристик. В [5] для билинейных объектов рассмотрены условия оптимальности настройки регулятора. В работе [6] разработан метод адаптации, основанный на использовании пробного воздействия. Методы синтеза адаптивного управления развиты в работах [7-9] и многих других. Несмотря на большое разнообразие описанных в литературе методов, проблема синтеза адаптивного ПИД-регулятора остается актуальной. Стабильность динамических свойств в условиях изменений параметров можно обеспечить применением адаптивного ПИД-регулятора [10].

Цель работы. Синтез адаптивного управления электроприводом турбомеханизма по выходной величине (напору), обеспечивающий стабильность

качества динамики при изменениях параметров объекта, является целью данной работы.

Материал и результаты исследования. Рассматривается структура системы частотного скалярного управления АД турбомеханизма с обратной связью по напору и ПИД-регулятором, на входе которой действует плавно изменяющийся сигнал задания. Учитывая постоянство потокосцепления ротора при частотном управлении, можно применить для синтеза упрощенную линейную модель АД [1, 3]. Тогда объект управления описывается дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} J\dot{\omega} &= M - M_c, \\ L_e \frac{di}{dt} &= -R_e i - kw + u, \\ h &= h_H (w/w_H)^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь w - скорость ротора, J - момент инерции, u - напряжение статора, M - электромагнитный момент двигателя, M_c - момент сил сопротивления, $L_e = sL_1$, $R_e = R_1 + R_2 k_2^2$ - эквивалентные значения индуктивности и сопротивления двигателя, s - коэффициент рассеяния, L_1, R_1, R_2 - индуктивность и сопротивление статора, сопротивление ротора, $k_2 = L_1/L_2$, $k = k_2 z$, z - число пар полюсов. Выходной величиной объекта является напор h , создаваемый насосом и выражаемый через скорость w , ее номинальное значение w_H . Момент сил сопротивления M_c зависит от скорости турбомеханизма и от напора и определяется, с учетом обозначения $n = w/w_H$, выражением [2]:

$$M_c = M_0 n^2 + (M_H - M_0) n \sqrt{\frac{h_0 n^2 - h_c}{h_0 - h_c}}. \quad (2)$$

Здесь h_0, h_c - значения напора, соответствующие отсутствию расхода и противодействию соответственно (для насосов). Выражение момента сил сопротивления в функции напора принимает вид:

$$M_c = \frac{h}{h_H} \left(M_0 + (M_H - M_0) \sqrt{\frac{h_0 - h_c h_H / h}{h_0 - h_c}} \right)$$

Объект (1), (2) является нелинейным. Однако для малых отклонений напора h в окрестности заданного значения h^* справедливы линеаризованные уравнения. При переходе в другой режим параметры линеаризованной модели будут изменяться. Способность регулятора к автоматической настройке позволяет сохранить стабильность показателей качества во всех режимах.

Передаточная функция ПИД-регулятора, как и в [10], имеет вид:

$$W_{\text{ПИД}}(p) = \frac{\bar{a}_0 + \bar{a}_1 p + \bar{a}_2 p^2}{p(tp + 1)}. \quad (3)$$

Параметры адаптивного регулятора $\bar{a}_0, \bar{a}_1, \bar{a}_2$ в процессе функционирования должны автоматически настраиваться.

Замкнутая линеаризованная система, содержащая объект управления (1), (2) и регулятор (3), если пренебречь малым параметром t , может быть описана уравнением:

$$\dot{x} = A_c x + B h^*. \quad (4)$$

Здесь $x = (x_0, x_1, x_2)^T$ - переменные состояния системы, а именно - интеграл x_0 рассогласования по напору, рассогласование по напору $x_1 = h - h^*$, производная рассогласования x_2 . Матрицы A_c, B имеют вид:

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix}.$$

Здесь a_0, a_1, a_2, b зависят от значений h, \dot{h} в точке линеаризации:

$$a_0 = \bar{a}_0; \quad a_1 = \frac{1}{T_e T_M};$$

$$a_2(h, \dot{h}) = \frac{1}{T_e} + \frac{2\sqrt{hh_H}}{Jw_H} \left(\frac{M_c}{T_e} + \frac{\partial M_c}{\partial h} \right) - \frac{\dot{h}}{2h};$$

$$b = \frac{2\sqrt{hh_H}}{kw_H T_e T_M}.$$

Для замкнутой системы (4) функция Ляпунова может быть выбрана в виде:

$$V(x) = x^T P x + a^T \Lambda a.$$

Матрица P удовлетворяет уравнению

$$A_c^T P + P A_c + Q = 0.$$

Здесь P, Λ, Q - симметричные положительные матрицы, причем $\Lambda = \text{diag}(I_0, I_1, I_2)$ содержит постоянные множители, влияющие на интенсивность адаптации, $a = (\bar{a}_0, \bar{a}_1, \bar{a}_2)^T$. Матрица Q , а, следовательно, и P определяют критерий качества замкнутой системы. Обозначим $s = P x$, $s = (s_0, s_1, s_2)^T$.

Производная по времени от функции Ляпунова принимает вид:

$$\dot{V}(x) = \dot{s}^T s + x^T \dot{s} + \dot{a}^T \Lambda a + a^T \dot{\Lambda} a \leq 0. \quad (5)$$

Отрицательность этой величины достаточна для устойчивости системы. После преобразований, с учетом системы (4), и, принимая во внимание, что

$$\dot{s}^T s + x^T \dot{s} \leq 0,$$

получаются уравнения для настройки параметров, обеспечивающие асимптотическую устойчивость системы:

$$I_i \dot{s}_i = x_i s_2, \quad (i=0, 1, 2). \quad (6)$$

Эти уравнения позволяют построить структуру адаптивного ПИД-регулятора, применимую для широкого класса объектов управления.

Функциональная схема системы показана на рис. 1.

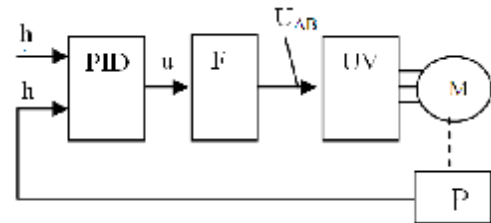


Рисунок 1 – Функциональная схема системы

На вход регулятора PID поступают сигналы заданного h^* и фактического h значения напора. Регулятор формирует сигнал u на входе звена F формирования закона частотного управления. На выходе F формируется трехфазное синусоидальное напряжение для управления инвертором UV . От инвертора получает питание электродвигатель M насоса P .

Система управления турбомеханизмом с адаптивным ПИД-регулятором исследована

методом математического имитационного моделирования для асинхронного электродвигателя мощностью 11 кВт, 1480 об/мин при скалярном частотном управлении. Результаты моделирования представлены на рис. 2-4.

На рис. 2 показаны заданное h^* и фактическое h значения напора в процессе разгона, а также рассогласование $x_1 = h - h^*$.

Рисунок 2 – Заданный и фактический напор в процессе разгона

Изменение настраиваемых параметров регулятора представлено на рис. 3. Параметры представлены в относительных единицах в приращениях по отношению к исходным расчетным значениям.

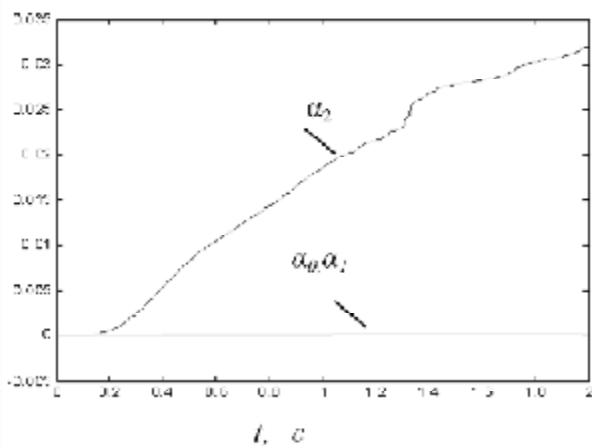


Рисунок 3 – Настраиваемые параметры регулятора

На рис. 4 показаны момент и скорость двигателя при разгоне, а на рис. 5 – годограф вектора потокосцепления.

Результаты моделирования показывают, что динамические свойства системы остаются в

допустимых пределах при изменениях параметров объекта.

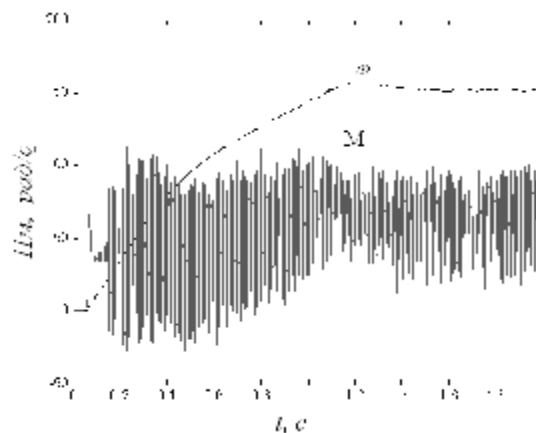


Рисунок 4 – Момент и скорость в процессе разгона

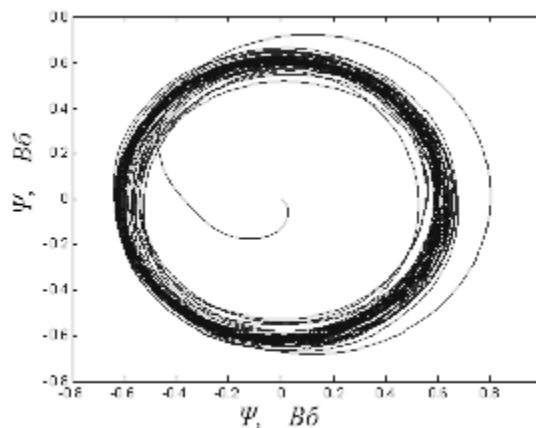


Рисунок 5 – Годограф вектора

Выводы. Применение адаптивного регулятора позволяет обеспечить стабильные динамические свойства системы управления турбомеханизмом в процессе функционирования, однако характеризуется значительными пульсациями тока статора при высоких коэффициентах усиления в контуре регулирования.

Рассмотренный метод адаптации не требует знания параметров и частотных характеристик объекта, а также не требует пробных сигналов. Метод опирается только на желаемое качество замкнутой системы.

Особенности предложенного метода делают его просто реализуемым программными средствами на микроконтроллерах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фираго Б. И. Теория электропривода: Учеб. пособие / Б. И. Фираго., Л. Б. Павлячик. - Мн.: Техноперспектива, 2004. - 527 с.
2. Фираго Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго., Л. Б. Павлячик. - Мн.: Техноперспектива, 2006. - 363 с.
3. Фираго Б. И. Синтез системы скалярного управления асинхронным электроприводом / Б. И. Фираго, О. Ф. Опейко. // Энергетика. Изв. высш. учебных заведений и энергетических объединений СНГ, №5 (сент.-октябрь), 2007. - С. 26-36.
4. L.H. Keel, S. P. Bhattacharyya Controller Synthesis Free of Analytical Models: Three Term Controllers, IEEE Trans. On AC- v.53 N 6, 2008, p. 1353-1369.
5. Чайковский М. М. Оптимальная настройка ПИД-регуляторов для многосвязных билинейных объектов управления / М. М. Чайковский, И. Б. Ядыкин. // Автоматика и телемеханика, №1, 2009. - С. 130-146.
6. Денисенко В. В. Непараметрическая модель объекта управления в ПИД регуляторах с автоматической настройкой. Приборы и системы / В. В. Денисенко. Управление, контроль, диагностика, №6, 2009. - С. 9-13.
7. Фомин В. Н. Адаптивное управление динамическими объектами / В. Н. Фомин, А. Л. Фрадков, В. А. Якубович. - М.: Наука, 1981. - 447 с.
8. Адаптивное управление в сложных системах / А. Л. Фрадков. М., 1990. - 296 с.
9. Борцов Ю. А. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением / Ю. А. Борцов, Н. Д. Поляхов, В. В. Путов. - Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1984. - 216 с.
10. Опейко О. Ф. Частотное управление асинхронным электродвигателем с адаптивным регулятором / О. Ф. Опейко. // Вісник КДУ імені Михайла Остроградського. Випуск 3/2010 (62). - Ч. 1. - С. 26-29.

АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ ТУРБОМЕХАНІЗМОМ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ

Опейко О.Ф., к.т.н., доц.

Білоруський національний технічний університет

просп. Незалежності, 65, 220013, м. Мінськ, Білорусь

E-mail: oopeiko@bntu.by

Розглядається синтез замкнутої по напору системи частотного керування асинхронним електродвигуном турбомеханізма. Результати математичного моделювання, представлені в роботі, підтверджують прийнятність запропонованого методу синтезу.

Ключові слова: частотне керування, електропривод, адаптація, моделювання.

THE ADAPTIVE CONTROL OF TURBOMECHANISM WITH INDUCTION MOTOR

Opeiko O.F., Cand. of Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

Belarusian national technical university

Nezavisimosti av., 65, 220013, Minsk, Belarus

E-mail: oopeiko@bntu.by

The synthesis of closed loop adaptive control is defined for turbomechanism. The simulation results, presented in this work, demonstrate the acceptability of synthesis method.

Key words: frequency control, electrical drive, adaptation, simulation.