

РАЗРАБОТКА НАБЛЮДАТЕЛЯ ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ БЕЗДАТЧИКОВЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ НА БАЗЕ ДВИГАТЕЛЯ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

Бобров М.А. к.т.н., старший преподаватель кафедры электроники и электротехники Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева, 430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68. e-mail: bobrovma92@mail.ru

Тутаев Г.М. д.т.н., профессор кафедры электроники и электротехники Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева, 430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68. e-mail: tutaevgm@mail.ru

Кулаев Н.А. студент кафедры электроники и электротехники Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева, 430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68. e-mail: kulaevna.ee@gmail.com

Аннотация. В статье представлены результаты исследований бездатчиковой системы векторного управления электроприводом на базе двигателя двойного питания. Приведены математические модели и синтезированные функциональные схемы двух моделей наблюдателей потокосцепления.

Ключевые слова: двигатель двойного питания, наблюдатель потокосцепления, бездатчиковое векторное управление, функциональная схема наблюдателя потокосцепления.

**DEVELOPMENT OF FLUX LINKAGE OBSERVER FOR SENSORLESS
CONTROL ALGORITHMS OF DOUBLE-FED INDUCTION MOTOR DRIVE
IMPLEMENTATION**

Bobrov M.A. senior lecture of the Department of electronics and electrical engineering of Ogarev Mordovia State University, 430005, Russia, Saransk, street Bolshevist, d. 68. e-mail: bobrovma92@mail.ru

Tutaev G.M. professor of the Department of electronics and electrical engineering of Ogarev Mordovia State University, 430005, Russia, Saransk, street Bolshevist, d. 68. e-mail: tutaevgm@mail.ru

Kulaev N.A. student of the Department of electronics and electrical engineering of Ogarev Mordovia State University, 430005, Russia, Saransk, street Bolshevist, d. 68. e-mail: kulaevna.ee@gmail.com

Abstract. The article presents the results of research of a sensorless vector control system for an electric drive based on a double-fed motor. Mathematical models and synthesized functional diagrams of two models of flux linkage observers are given.

Keywords: double-fed induction motor, flux linkage observer, sensorless FOC, functional scheme of flux linkage observer.

На сегодняшний день вопросы повышения энергоэффективности систем регулируемых электроприводов (РЭП) становятся все более актуальными. Это объясняется возрастающей ролью электропривода, как неотъемлемой части многих современных технологических процессов во многих производствах. В настоящее время активно ведутся исследования энергоэффективного РЭП переменного тока [1-8]. В ряде областей применения хорошо зарекомендовали себя РЭП на базе асинхронного двигателя с фазным ротором (АДФР), включенным по схеме двойного питания. Вариантом такой управляемой электрической машины является машина двойного питания (МДП) с двумя силовыми преобразователями частоты в цепях статора и ротора [3-8]. Функциональная схема и векторная диаграмма установившегося режима работы такого РЭП представлены на рис. 1.

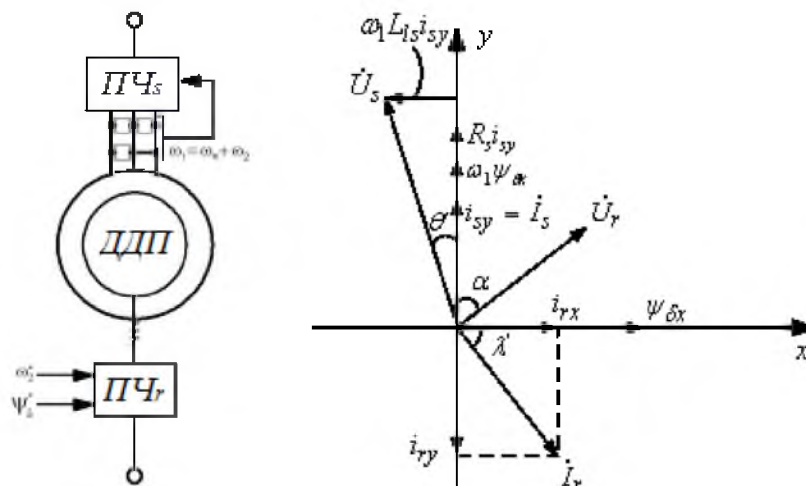


Рисунок 1 – Функциональная схема РЭП на базе МДП и векторная диаграмма установившегося режима работы

С развитием современных микроконтроллерных систем управления всё чаще находят применение бездатчиковых систем векторного управления (СВУ) с программной реализацией наблюдателей состояний электропривода [8]. При векторном управлении электроприводом на

базе АД опорным вектором служит вектор основного магнитного потока Ψ_δ . Для синтеза структуры наблюдателя потока наиболее часто находят применение два различных подхода – реализация «токовой модели» наблюдателя и «модели напряжений».

Системы координат РЭП на базе АД подробно рассмотрены в [6, 7]. При построении «токовой модели» наблюдателя проекции вектора основного магнитного потока Ψ_δ на оси системы координат α, β , неподвижной относительно статора, определяются как:

$$\begin{cases} \hat{\Psi}_{\delta\alpha} = L_m(\tilde{i}_{s\alpha} + \hat{i}_{r\alpha}), \\ \hat{\Psi}_{\delta\beta} = L_m(\tilde{i}_{s\beta} + \hat{i}_{r\beta}), \end{cases} \quad (1)$$

где L_m – взаимная индуктивность, $\tilde{i}_{s\alpha}, \tilde{i}_{s\beta}, \tilde{i}_{r\alpha}, \tilde{i}_{r\beta}$ – проекции мгновенных значений фазных токов статора и ротора на оси системы координат статора. Знак « $\hat{}$ » показывает, что переменная вычислена, знак « $\tilde{}$ » – переменная измерена датчиками тока, установленными в системе.

Проекции токов статора и ротора преобразуются из трехфазной в двухфазную систему координат:

$$\begin{cases} \tilde{i}_{s\alpha} = \tilde{I}_A; \\ \tilde{i}_{s\beta} = \frac{\tilde{I}_B - \tilde{I}_C}{\sqrt{3}}. \end{cases} \quad (2)$$

Для токов ротора преобразования будут более сложными:

$$\begin{cases} \tilde{i}_{rd} = \tilde{I}_a; \\ \tilde{i}_{rq} = \frac{\tilde{I}_b - \tilde{I}_c}{\sqrt{3}}. \end{cases}, \quad \begin{cases} \hat{i}_{r\alpha} = \tilde{i}_{rd} \cos\theta - \tilde{i}_{rq} \sin\theta; \\ \hat{i}_{r\beta} = \tilde{i}_{rd} \sin\theta + \tilde{i}_{rq} \cos\theta, \end{cases} \quad (3-4)$$

где θ – угол между системами координат α, β и d, q (угол поворота ротора).

$$\theta = \int_0^t \omega_e dt, \quad \omega_e = \omega_1 - \omega_2 \quad (5-6)$$

Знаки приведения параметров ротора к статору в выражениях (2)-(5) не указаны.

По выражениям (1-5) можно синтезировать функциональную схему наблюдателя магнитного потока (рис. 2).

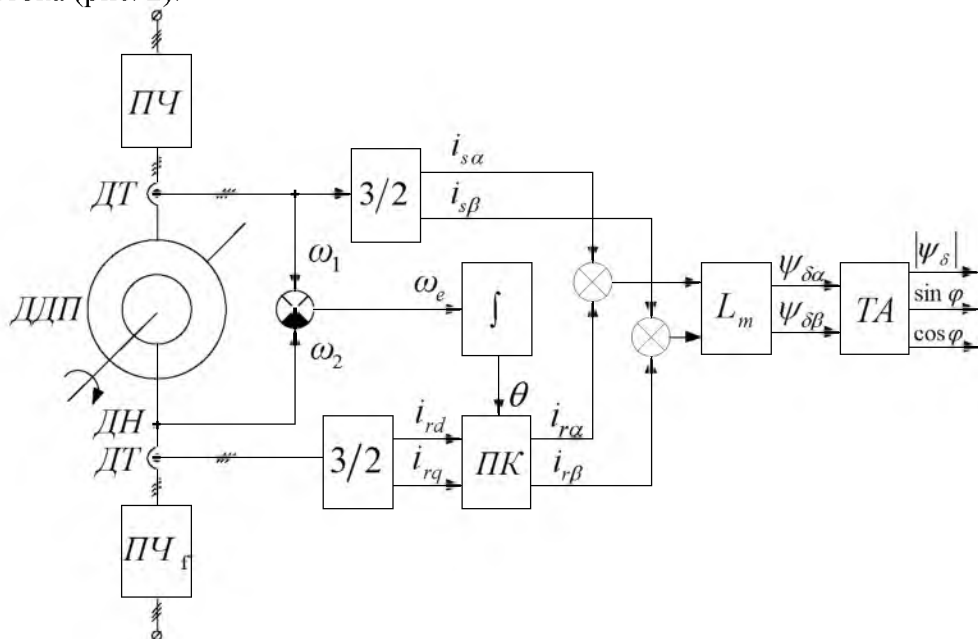


Рисунок 2 – Функциональная схема наблюдателя магнитного потока (токовая модель)

Для реализации модели наблюдателя магнитного потока по значениям токов необходима информация об угловой скорости ротора или об угле поворота ротора. В электроприводе на базе АД значения частот токов статора ω_1 и ротора ω_2 известны. Соотношение (1) показывает, что в вычислениях присутствует один из параметров машины – взаимная индуктивность обмоток L_m , которая, в общем случае, зависит от режима работы двигателя. Использование токовой модели наблюдателя потока оправдано, когда ЭП постоянно работает в режимах, близких к номинальным ($\Psi_\delta = \Psi_{\delta n} = const$ и $L_m = L_{mn} = const$). Но при реализации энергоэффективных алгоритмов управления необходимо обеспечивать изменение основного магнитного потока в функции скорости или требуемого электромагнитного момента $\Psi_\delta = f(M_{эм})$. При этом диапазон возможного изменения L_m может достигать $\pm 30\%$ от L_{mn} . Это вызывает необходимость текущей идентификации этого параметра в реальном масштабе времени. При использовании в системе векторного управления второго подхода к реализации наблюдателя потока для его математического описания применим уравнения напряжений ротора, записанные в системе координат d, q :

$$\begin{cases} \tilde{u}_{rd} = R_r \tilde{i}_{rd} + \frac{d\hat{\Psi}_{rd}}{dt}, \\ \tilde{u}_{rq} = R_r \tilde{i}_{rq} + \frac{d\hat{\Psi}_{rq}}{dt}, \end{cases} \text{ где } \begin{cases} \hat{\Psi}_{rd} = L_{lr} \tilde{i}_{rd} + \hat{\Psi}_{\delta d}, \\ \hat{\Psi}_{rq} = L_{lr} \tilde{i}_{rq} + \hat{\Psi}_{\delta q}. \end{cases}$$

После подстановки значений проекций потокосцепления ротора в уравнения напряжения получим:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{\Psi}_{\delta d}}{dt} = \tilde{u}_{rd} - R_r \tilde{i}_{rd} - L_{lr} \frac{d\tilde{i}_{rd}}{dt}, \\ \frac{d\hat{\Psi}_{\delta q}}{dt} = \tilde{u}_{rq} - R_r \tilde{i}_{rq} - L_{lr} \frac{d\tilde{i}_{rq}}{dt}. \end{cases}$$

Проинтегрировав левую и правую части полученных соотношений, получим значения проекций вектора основного магнитного потока на оси системы координат d, q , неподвижной относительно вращающегося ротора:

$$\begin{cases} \hat{\Psi}_{\delta d} = \int_0^t (u_{rd} - R_r i_{rd}) dt - L_{lr} i_{rd}, \\ \hat{\Psi}_{\delta q} = \int_0^t (u_{rq} - R_r i_{rq}) dt - L_{lr} i_{rq}. \end{cases}$$

Модуль и направляющие косинус и синус опорного вектора определяются соотношениями:

$$|\dot{\Psi}_\delta| = \sqrt{\dot{\Psi}_{\delta d}^2 + \dot{\Psi}_{\delta q}^2}, \quad \cos \phi = \frac{\dot{\Psi}_{\delta d}}{|\dot{\Psi}_\delta|}, \quad \sin \phi = \frac{\dot{\Psi}_{\delta q}}{|\dot{\Psi}_\delta|},$$

где ϕ – угол между вектором $\dot{\Psi}_\delta$ и действительной осью системы координат d, q . При построении СВУ в координатах x, y этот угол определяется частотой возбуждения ω_2 .

При реализации этой модели наблюдателя используется операция интегрирования, что при отсутствии обратных связей приводит к накоплению ошибки. Особенно это сказывается на низких частотах, когда период изменения токов и напряжений ротора достаточно велик, и вносимая погрешность наиболее значительна. Компенсация ошибки обеспечивается введением в интегратор отрицательной обратной связи. Также необходимо осуществлять текущую идентификацию параметров машины, входящих в подынтегральное выражение – R_r ,

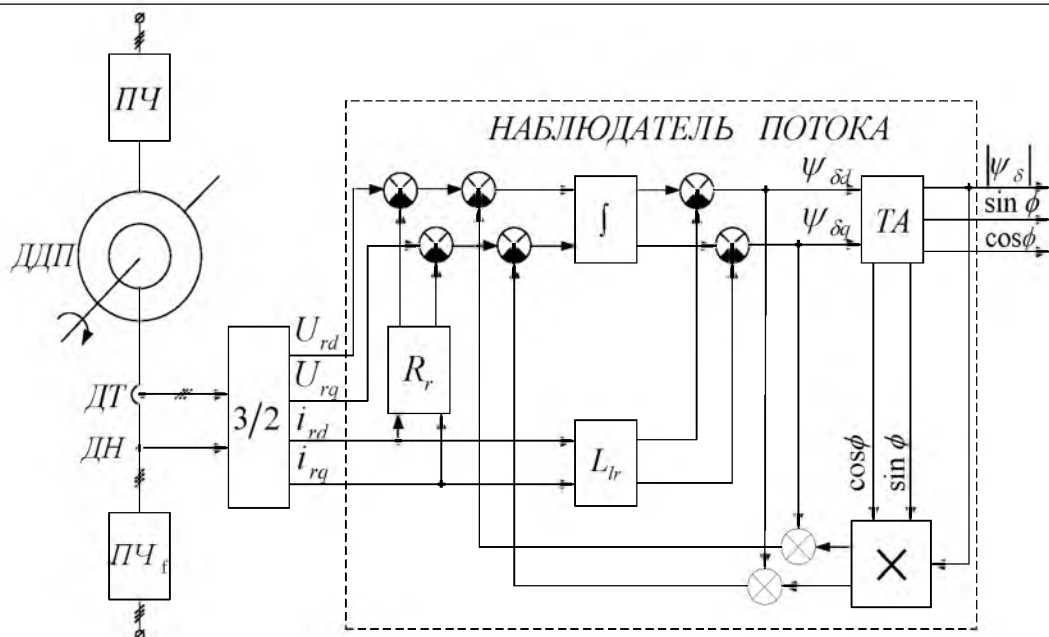


Рисунок 3 – Функциональная схема наблюдателя магнитного потока (модель напряжения)

Функциональная схема наблюдателя потока с компенсацией ошибок интегрирования приведена на рис. 3.

При использовании данной модели наблюдателя магнитного потока изменение активного сопротивления ротора может оказать влияние на точность ориентации системы по вектору основного магнитного потока. Поэтому в области малых нагрузок более эффективным будет применение наблюдателя с моделью напряжений, когда влияния температурных изменений на значения R_r незначительны. Токтовую модель наблюдателя целесообразно использовать, когда ЭП работает в режимах, близких к номинальным ($\Psi_\delta = \Psi_{\delta n} = const$ и $L_m = L_{mn} = const$).

Таким образом, разработанные алгоритмы вычисления основного магнитного потока позволяют исключить из системы управления электроприводом на базе АД датчик магнитного потока и применить в качестве базовой машины серийный двигатель с фазным ротором. Для точной оценки значений магнитного потока систему управления необходимо дополнить идентификатором параметров машины.

Библиографический список

1. Браславский И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. – М.: АСАДЕМА, 2004. – 256 с.
2. Поляков В. Н. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов переменного тока / В. Н. Поляков, Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, РГПИУ, 2012. – 222 с.
3. Tutaev G. M. Energy-efficient control options of electric drive based on asynchronous converter-fed motor / G.M. Tutaev, A.V. Volkov, M.A. Bobrov – В сборнике: труды XIII международной научно-технической конференции актуальные проблемы электронного приборостроения Proceedings: in 12 volumes. 2016. С. 88–93.
4. Тутаев Г. М. Исследование энергоэффективных режимов работы электропривода на базе асинхронизированного вентильного двигателя / Г.М. Тутаев, И.С. Юшков, М.А. Бобров – В сборнике: Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом. Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической

конференции. 2017. С. 68-72.

5. Tutaev G. Optimization task definition of double inverter-fed motor drive based on energy criterions / G. Tutaev, M. Bobrov / 25th International workshop on electric drives: optimization in control of electric drives, IWED 2018, p 1–7.

6. Тутаев Г. М. Наблюдатели магнитного потока в системе управления электроприводом с двигателем двойного питания / Г.М. Тутаев, М.А. Бобров/ Электричество, 2018, №2, 44–51 с.

7. Тутаев Г. М. Анализ устойчивости наблюдателя магнитного потока в системе управления электроприводом на базе машины двойного питания/ Г.М. Тутаев, М.А. Бобров/ Научно-технический вестник Поволжья, 2018, №1, 140–143 с.

8. Tutaev G. Sensor less speed estimation in electric drive based on double inverter-fed induction motor/ G. Tutaev, M. Bobrov / Journal of advanced research in dynamical and control systems, 2018, Issue 4, p 1448–1455.