

Наблюдатели магнитного потока в системе управления электроприводом с двигателем двойного питания

БОБРОВ М.А., ТУТАЕВ Г.М.

Представлена система векторного управления (СВУ) электроприводом на базе асинхронизированного вентильного двигателя без датчика магнитного потока. Рассмотрены структурные схемы и описаны две модели наблюдателей магнитного потока: наблюдатель магнитного потока по напряжению ротора и «токовая» модель наблюдателя. Наблюдатель по напряжению ротора чувствителен к изменению сопротивления и при отклонении его на 5–10% от номинального значения приводит СВУ в неустойчивое состояние. Применение «токовой» модели приводит к появлению ошибок не менее 15% в определении магнитного потока в области низких нагрузок, что сказывается на динамике и потерях в контуре намагничивания. Но в целом система остается устойчивой при достижении заданного магнитного потока. Определены границы устойчивости системы регулируемого электропривода методом D-разбиения при изменении активного сопротивления ротора. Исследовано влияние точности аппроксимации кривой намагничивания при идентификации магнитного потока «токовым» наблюдателем. Результаты теоретических исследований подтверждаются результатами моделирования в Matlab.

К л ю ч е в ы е с л о в а: асинхронизированный вентильный двигатель, математическая модель, характеристическое уравнение, бездатчиковое управление, наблюдатель магнитного потока

Развитие вычислительной микропроцессорной техники представляет новые возможности построения систем управления электроприводами (ЭП) переменного тока. В последние годы при реализации векторных принципов управления ЭП наметилась тенденция замены аппаратных решений программными. Для повышения надежности систем регулируемого привода вместо механических устройств и датчиков всё более широко применяются программно-реализованные наблюдатели состояний ЭП, разработке и исследованию которых посвящено много отечественных и зарубежных научных работ [1–6].

В ЭП на базе асинхронизированного вентильного двигателя (АВД), который является одним из вариантов машины двойного питания, существует возможность непрерывного измерения частоты токов и напряжений как в цепи ротора, так и в цепи статора. Это позволяет реализовать наблюдатель частоты вращения ротора, в котором вычисленное в микропроцессорной системе управления значение частоты вращения остается инвариантным к изменению параметров базовой электрической машины [7].

При реализации алгоритмов, обеспечивающих приводу высокую энергетическую эффективность, необходима информация о магнитном состоянии базовой машины.

Анализ системы ЭП на базе АВД проводим с учетом общепринятых допущений [8–10]. Обоснование выбора системы координат для описания привода проведено в [11, 12]. Наиболее целесообразно выбрать ортогональную систему координат x, y , ориентированную по вектору потокосцепления в воздушном зазоре Ψ_δ [13].

Функциональные схемы наблюдателей потока в ЭП на базе АВД представлены в [14]. Система уравнений ротора и статора в ортогональной системе координат x, y :

$$\begin{aligned} U_{sx} &= R_s i_{sx} + \frac{d\psi_{sx}}{dt} - \omega_1 \psi_{sy}; \\ U_{sy} &= R_s i_{sy} + \frac{d\psi_{sy}}{dt} + \omega_1 \psi_{sx}; \\ U_{rx} &= R_r i_{rx} + \frac{d\psi_{rx}}{dt} - \omega_2 \psi_{ry}; \\ U_{ry} &= R_r i_{ry} + \frac{d\psi_{ry}}{dt} + \omega_2 \psi_{rx}, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} \psi_{sx} &= L_{lx} i_{sx} + \psi_{\delta x}; \\ \psi_{sy} &= L_{ly} i_{sy} + \psi_{\delta y}; \\ \psi_{rx} &= L_{lr} i_{rx} + \psi_{\delta x}; \\ \psi_{ry} &= L_{lr} i_{ry} + \psi_{\delta y}. \end{aligned} \quad (2)$$

В ЭП с АД разделены каналы формирования электромагнитного момента и намагничивания двигателя, что позволяет определять потокоцепление при неподвижном роторе. Для синтеза наблюдателя потока используем пары последних уравнений из систем (1) и (2) соответственно, подставив значения проекций потока ротора в уравнения напряжений ротора:

$$U_{rx} = R_r i_{rx} + L_{lr} \frac{di_{rx}}{dt} + \frac{d\psi_{\delta x}}{dt} - \omega_2 \psi_{\delta y} - \omega_2 L_{lr} i_{ry};$$

$$U_{ry} = R_r i_{ry} + L_{lr} \frac{di_{ry}}{dt} + \frac{d\psi_{\delta y}}{dt} + \omega_2 \psi_{\delta x} + \omega_2 L_{lr} i_{rx}.$$

Представим полученные уравнения в форме Коши, выразив магнитный поток через остальные переменные уравнений:

$$\frac{d\psi_{\delta x}}{dt} = U_{rx} - R_r i_{rx} - L_{lr} \frac{di_{rx}}{dt} + \omega_2 L_{lr} i_{ry} + \omega_2 \psi_{\delta y};$$

$$\frac{d\psi_{\delta y}}{dt} = U_{ry} - R_r i_{ry} - L_{lr} \frac{di_{ry}}{dt} - \omega_2 L_{lr} i_{rx} - \omega_2 \psi_{\delta x}.$$

Заменив $\frac{d}{dt} = p$ и введя обозначение $T_{lr} = \frac{L_{lr}}{R_r}$,

получим выражения для проекций основного магнитного потока в системе координат xu :

$$\psi_{\delta x} = \frac{U_{rx}}{p} - (1 + T_{lr} p) \frac{i_{rx} R_r}{p} + \frac{\omega_2 L_{lr} i_{ry}}{p} + \frac{\omega_2 \psi_{\delta y}}{p};$$

$$\psi_{\delta y} = \frac{U_{ry}}{p} - (1 + T_{lr} p) \frac{i_{ry} R_r}{p} - \frac{\omega_2 L_{lr} i_{rx}}{p} - \frac{\omega_2 \psi_{\delta x}}{p}.$$

Учитывая, что система координат xu ориентирована по вектору основного магнитного потока $|\dot{\Psi}_{\delta}| = \Psi_{\delta x}$ и $\Psi_{\delta y} = 0$, передаточную функцию наблюдателя потока можно определить как

$$W_{\psi_{\delta x-U}}(p) = \frac{\psi_{\delta x}}{(\omega_2 L_{lr} i_{ry} + U_{rx}) \frac{1}{1 + T_{lr} p} - i_{rx} R_r} = \frac{1 + T_{lr} p}{p}.$$

Трансформаторная ЭДС $\omega_2 L_{lr} i_{ry}$ учитывается в блоке компенсаций системы управления, поэтому ее можно исключить. Тогда окончательно передаточная функция наблюдателя потока примет вид:

$$W_{\psi_{\delta x-U}}(p) = \frac{\psi_{\delta x}}{U_{rx} \frac{1}{1 + T_{lr} p} - i_{rx} R_r} = \frac{1 + T_{lr} p}{p}.$$

Функциональная схема модели электропривода на базе АД с наблюдателем магнитного потока по напряжению изображена на рис. 1. При этом модель ротора играет роль вспомогательного звена

для получения тока намагничивания i_{rx} , который в реальной системе управления, как и напряжение U_r , измеряется с помощью датчиков в фазах ротора [14].

Таким образом, модель контура управления потоком включает регулятор потока $W_{rp}(p)$, усилитель с коэффициентом $\frac{1}{K_{ur}^*}$, линеаризованную мо-

дель инвертора напряжения в ПЧ ротора $\frac{k_{\pi}}{T_{\pi} p + 1}$ и,

собственно, сам наблюдатель магнитного потока, охваченные отрицательной обратной связью.

Реализация модели электропривода на базе АД с наблюдателем магнитного потока по напряжению в Matlab представлена на рис. 2. В модели использованы параметры асинхронного двигателя с фазным ротором промышленной серии 4AK250SB4Y3 мощностью 55 кВт.

После синтеза системы бездатчикового векторного управления электроприводом на базе АД целесообразно проверить сходимость результатов, полученных с применением двух моделей – бездатчиковой (рис. 2) и модели, имеющей в своем составе стандартный блок извлечения измеряемых переменных двигателя (Machines Measurement Demux) из библиотеки Simulink [12], работающих параллельно (рис. 7). В качестве базовой машины в обеих моделях выбран двигатель с фазным ротором 4AK250SB4Y3. Результаты моделирования переходных процессов (сверху вниз) магнитного потока, электромагнитного момента, тока статора и скорости при разгоне двигателя и изменении момента до номинальных значений представлены на рис. 3.

До момента времени 0,2 с происходит намагничивание машины по цепи ротора при нулевой частоте вращения. Этого интервала достаточно, чтобы магнитный поток двигателя достиг номинального значения. Затем в систему управления статора подается сигнал на формирование электромагнитного момента и частоты вращения. Нагрузка при этом составляет 60% номинального значения. В начальный момент наблюдается небольшой провал в кривой частоты вращения, что вызвано насыщением инерционных звеньев модели (windup-эффект), методы устранения которого при практической реализации описаны в [15, 16]. Через 0,7 с моделирования происходит наброс нагрузки до номинального значения.

Полученные результаты говорят о полной сходимости переходных процессов в моделируемых системах электропривода – и при имитации измерения магнитного потока датчиками Холла, и при вычислении его синтезированным наблюдателем с

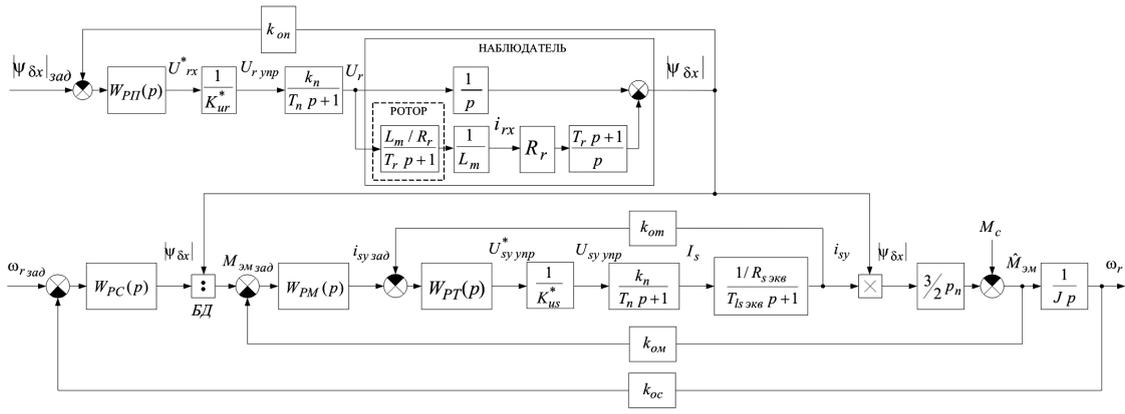


Рис. 1. Функциональная схема модели электропривода на базе АД с наблюдателем магнитного потока по напряжению

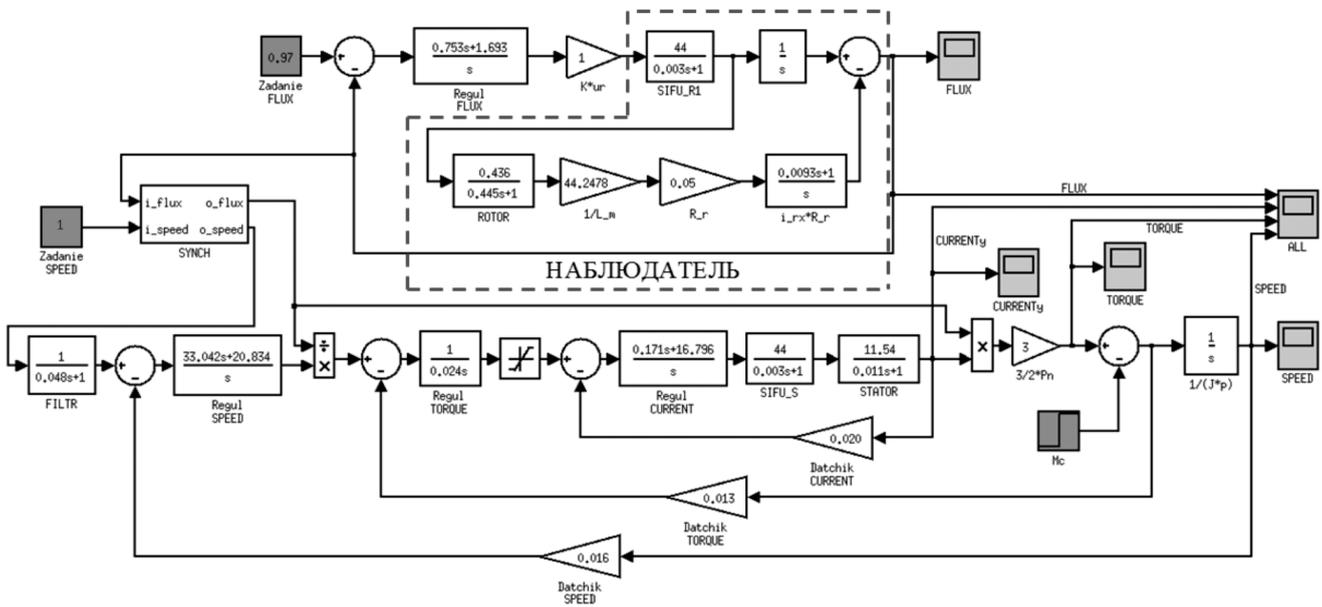


Рис. 2. Реализация электропривода на базе АД с наблюдателем магнитного потока по напряжению в Matlab

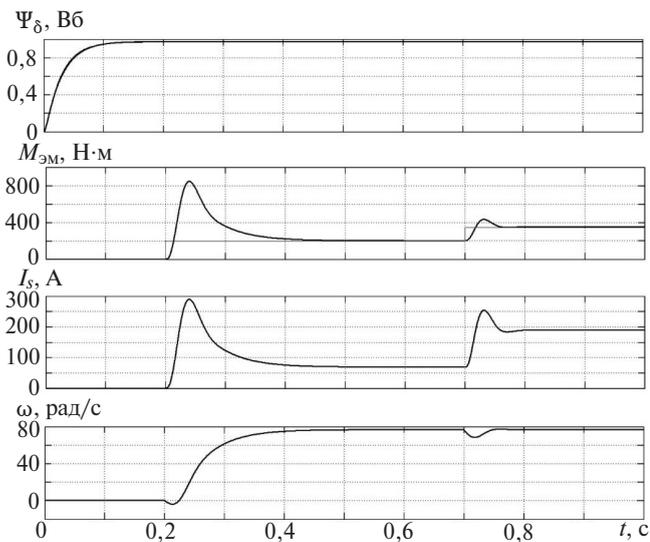


Рис. 3. Результаты моделирования переходных процессов (сверху вниз: поток, электромагнитный момент, ток статора и частота вращения)

использованием в модели номинальные значения сопротивления ротора R'_r .

В структуру модели наблюдателя не входит взаимная индуктивность, т.е. нелинейность кривой намагничивания при реализации энергоэффективного управления с изменяющимся магнитным потоком не будет приводить к появлению ошибки при определении потока. Однако значение сопротивления ротора R'_r в рабочих режимах может существенно изменяться по сравнению с номинальным [3, 8, 17, 18].

Для оценки робастности синтезированного наблюдателя необходимо найти область устойчивости системы по параметру R'_r методом D-разбиения. В [19] показано, что характеристические уравнения многоконтурной системы с подчинённым регулированием в цепи статора не содержат параметры R'_r и L'_m базовой машины, поэтому рассматривать необходимо лишь контур управления потоком.

Передающая функция контура управления потоком имеет вид:

$$W_{\Sigma} = \frac{k_n k_{pn} (T_{pn} p + 1) (T_r p + 1 - R_r R_r' T_{lr} p - R_r R_r')}{T_{pn} p^2 (T_n p + 1) (T_r p + 1)} \times$$

$$\times \frac{T_{pn} p^2 (T_n p + 1) (T_r p + 1)}{T_{pn} p^2 (T_n p + 1) (T_r p + 1) + k_{on} k_{pn} k_n (T_{pn} p + 1)} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{1}{(T_r p + 1 - R_r R_r' T_{lr} p - R_r R_r')}.$$

Для определения области устойчивости рассмотрим характеристическое уравнение [20]:

$$H = T_{pn} p^2 (T_n p + 1) (T_r p + 1) + k_{on} k_n k_{pn} (T_{pn} p + 1) \times$$

$$\times (T_r p - R_r R_r' T_{lr} p - R_r R_r' + 1).$$

После преобразований и введения новой переменной $k_{on} k_n k_{pn} = a$ характеристическое уравнение примет вид:

$$H = T_{pn} T_n T_r p^4 + T_{pn} T_n p^3 + T_r T_{pn} p^3 + T_{pn} p^2 +$$

$$+ a T_r T_{pn} p^2 - a (T_{lr} T_{pn} R_r R_r' p^2 + T_{pn} p + T_r p -$$

$$- T_{pn} R_r R_r' p - T_{lr} R_r R_r' p - R_r R_r' + 1).$$

Для определения областей устойчивости согласно методу D-разбиения необходимо записать характеристическое уравнение исследуемой системы в виде

$$D(p) = N(p) + vS(p) = 0, \tag{3}$$

$$v = -\frac{N(p)}{S(p)} = R_r'.$$

Выразив сопротивление ротора из характеристического уравнения, получаем:

$$R_r' = \frac{T_{pn} T_n T_r p^4 + T_{pn} T_n p^3 + T_r T_{pn} p^3 + T_{pn} p^2 +}{-a (T_{lr} T_{pn} R_r p^2 - T_{pn} R_r p - T_{lr} R_r p - R_r)}$$

$$\rightarrow \frac{+a (T_r T_{pn} p^2 + T_{pn} p + T_r p + 1)}{}$$

Коэффициент a и постоянные времени контура регулирования являются известными числовыми значениями. Поэтому, сгруппировав выражение и подставив числовые значения постоянных времени и коэффициентов передачи модели ЭП на базе двигателя 4AK250SB4Y3, запишем его в следующем виде:

$$R_r' = \frac{0,000787_r p^4 + 0,2644_n p^3 + 9,293 p^2 + 34,3 p + 33,14}{0,009437 p^2 - 1,03 p + 1,7199}.$$

Согласно методу D-разбиения найдем область устойчивости системы по параметру R_r' . Характеристическое уравнение после замены $p = j\omega$ разделим на действительную и мнимую части и строим АФЧХ системы при изменении частоты ω в интервале $[-\infty; \infty]$:

$$D(j\omega) = X(\omega) + jY(\omega).$$

Для построения годографа (АФЧХ) системы применяем программный пакет LabVIEW. Годограф имеет классическую для инерционного звена форму и пересекает ось X в точке с координатами (0,00519; 0). Так как значения параметра R_r' являются действительными и всегда положительными, то наибольший интерес представляет положительная действительная полуось АФЧХ. Область внутри годографа претендует называться устойчивой, а точка пересечения годографом оси X – границей устойчивости. Определение корня характеристического уравнения (3) в указанной области является необходимым, но недостаточным условием устойчивости системы.

При решении характеристического уравнения с параметром $0 \leq R_r' \leq 0,00519$ все его корни являются «левыми», т.е. область внутри годографа действительно является областью устойчивости. Подстановка в характеристическое уравнение значений сопротивления ротора, больших граничного, приводит к появлению правых корней. Результаты моделирования системы управления в Matlab с $R_r' = 0,0065$, что на 15% больше граничного значения, показаны на рис. 4.

Очевидно, при превышении параметром R_r' граничных значений наблюдаемое значение магнитного потока Ψ_{δ} , Вб

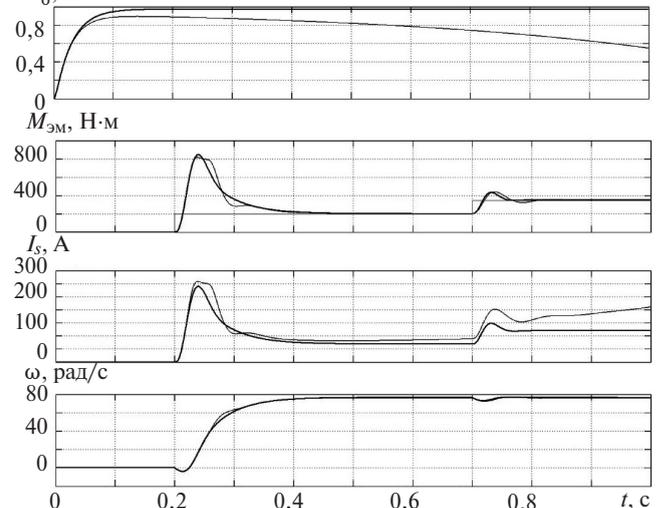


Рис. 4. Координаты привода при изменении R_r'

ного потока на участке насыщения кривой намагничивания существенно отклоняется от значения, полученного при моделировании системы с применением датчиков магнитного потока, и система становится неустойчивой.

Таким образом, бездатчиковая СВУ чувствительна к изменению сопротивления R_r' и при отклонении его на 5–10% от номинального значения становится неустойчивой.

Для решения данной проблемы в СВУ ЭП на базе АД справедливы методы, применяемые в других системах регулируемого ЭП:

для уменьшения ошибки вычислений значение сопротивления ротора двигателя в наблюдателе целесообразно задавать равным сопротивлению ротора в нагретом состоянии [3];

параметрическая адаптация к изменяющимся параметрам базовой машины [21, 22].

Однако эти подходы имеют недостатки – точное определение параметров машины затруднительно, а реализация адаптивных алгоритмов требует значительных затрат вычислительных ресурсов процессора.

Кроме того, напряжение ротора имеет постоянную составляющую, интегрирование которой приводит к накоплению ошибки на выходе интегратора и, как следствие, к неверному определению потокосцепления. Для коррекции работы интегратора и устранения влияния постоянной составляющей необходимо вводить в интегратор слабую отрицательную обратную связь. Результаты моделирования приведены на рис. 5.

Определение границ устойчивости наблюдателя к искажениям интегрируемого сигнала требует более глубоких исследований и в данной работе не рассматривается.

Учитывая указанные недостатки наблюдателя потокосцепления с моделью напряжения, рассмот-

рим так называемую «токовую» модель наблюдателя магнитного потока. Скалярная форма записи уравнений (1) в ориентированной по вектору главного магнитного потока ($\Psi_{\delta y} = 0$) системе координат xu примет вид:

$$\begin{aligned} L_{ls} \frac{di_{sx}}{dt} &= U_{sx} - R_s i_{sx} - \frac{d\Psi_{\delta x}}{dt} + \omega_1 L_{ls} i_{sy}; \\ L_{ls} \frac{di_{sy}}{dt} &= U_{sy} - R_s i_{sy} - \omega_1 L_{ls} i_{sx} - \omega_1 \Psi_{\delta x}; \\ \frac{d\Psi_{\delta x}}{dt} &= -\frac{R_r}{L_r} \Psi_{\delta x} + \frac{L_m}{L_r} R_r i_{sx} + L_{lr} \frac{L_m}{L_r} \frac{di_{sx}}{dt} - \\ &\quad - \omega_2 L_{lr} \frac{L_m}{L_r} i_{sy} + \frac{L_m}{L_r} U_{rx}; \\ 0 &= \frac{L_m}{L_r} R_r i_{sy} + L_{lr} \frac{L_m}{L_r} \frac{di_{sy}}{dt} - \omega_2 \Psi_{\delta x} + \\ &\quad + \omega_2 L_{lr} \frac{L_m}{L_r} i_{sx} + \frac{L_m}{L_r} U_{ry}. \end{aligned}$$

Из третьего уравнения системы определим передаточную функцию наблюдателя потока.

В электроприводе с АД намагничивание двигателя осуществляется по цепи ротора ($i_{sx} = 0$), а ЭДС $\omega_2 L_{lr} \frac{L_m}{L_r} i_{sy}$ компенсируется в блоке компенсаций системы управления, следовательно, окончательная передаточная функция будет выглядеть следующим образом:

$$W_{\psi_{\delta-i}}(p) = L_m' i_{rx} \frac{1}{T_r p + 1}.$$

В данной модели наблюдателя потока присутствует параметр взаимной индуктивности L_m' , который изменяется в зависимости от режима работы двигателя (перемещение по кривой намагничива-

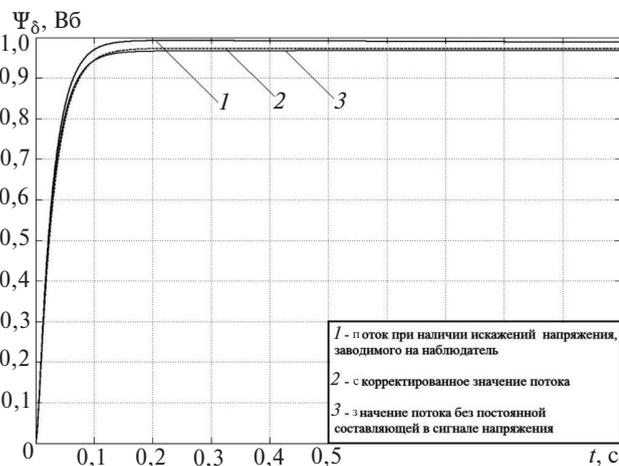


Рис. 5. Компенсация влияния постоянной составляющей напряжения ротора на определение потокосцепления

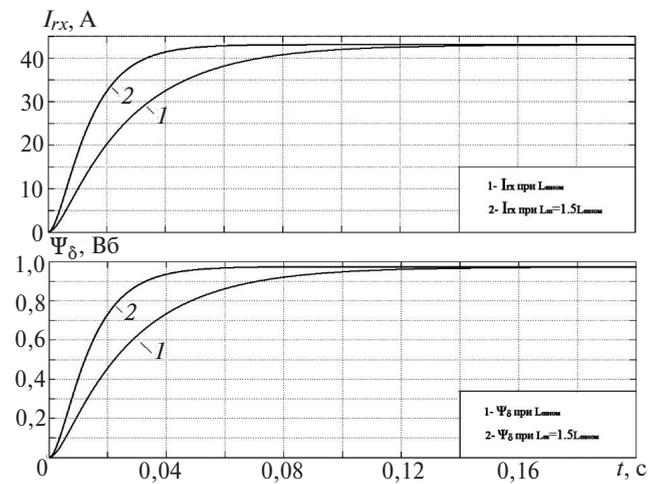


Рис. 6. Сравнение магнитных потоков и токов намагничивания при изменении параметра L_m'

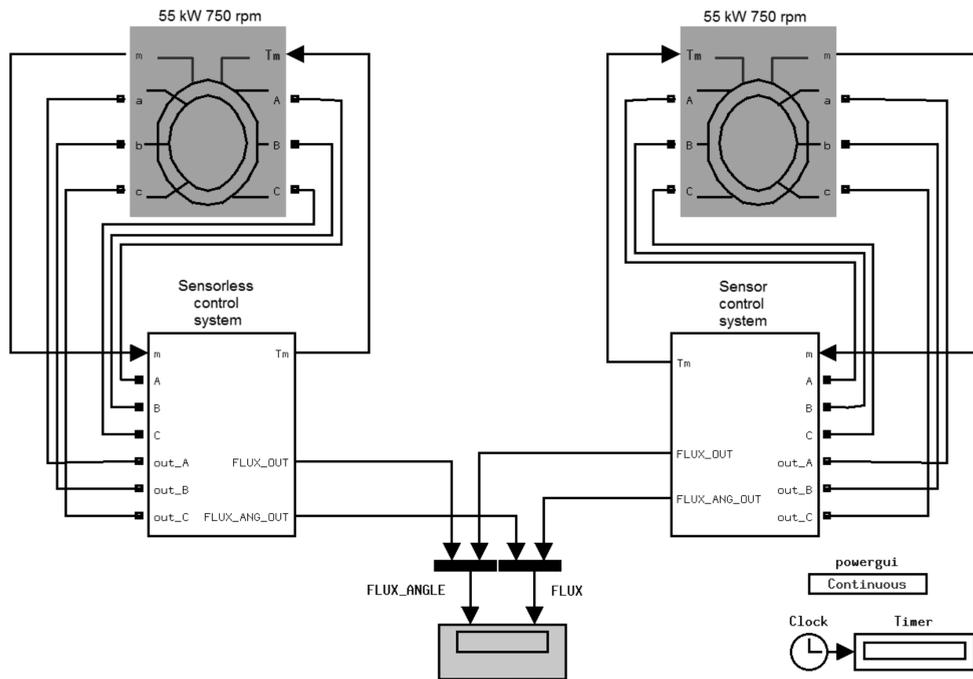


Рис. 7. Имитационная модель двух систем РЭП

ния). Результаты моделирования показывают ошибку не менее 15% в определении магнитного потока в области низких нагрузок при изменении L'_m на 50% от номинального значения, что сказывается на динамике (рис. 6) и потерях в контуре намагничивания [17]. Но в целом система остается устойчивой при достижении заданного магнитного потока.

На рис. 7 представлена имитационная модель двух систем РЭП – с моделями наблюдателей и с

блоком Machines Measurement Demux в качестве датчика потока. В последней параметры двигателя равны их номинальным значениям, а в бездатчиковой изменены в пределах, рассмотренных выше. Результаты моделирования магнитных потоков показаны на рис. 8, 9.

Выводы. 1. Предложенные алгоритмы вычисления основного магнитного потока позволяют исключить из системы управления ЭП датчик потока и применить в качестве базовой машины серийный двигатель с фазным ротором.

2. Наблюдатель по напряжению ротора чувствителен к изменению сопротивления и при отклонении его на 5–10% от номинального значения приводит СВУ в неустойчивое состояние.

3. Сильное влияние на оценку потокосцепления оказывает наличие постоянной составляющей в напряжении ротора. Для компенсации ошибки интегрирования необходимо вводить обратную связь в структуру интегратора.

4. Применение «токовой» модели приводит к появлению ошибок не менее 15% в определении магнитного потока в области низких нагрузок, что сказывается на динамике и потерях в контуре намагничивания. Но в целом система остается устойчивой при достижении заданного магнитного потока.

5. Оба предложенных варианта наблюдателей позволяют определять значение основного потокосцепления при неподвижном роторе.

Исследование выполнено за счёт средств гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-20057).

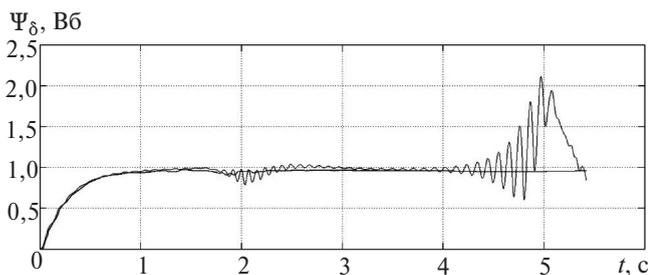


Рис. 8. Результаты моделирования магнитных потоков в ЭП при превышении параметром R'_r границы устойчивости (модель по напряжению)

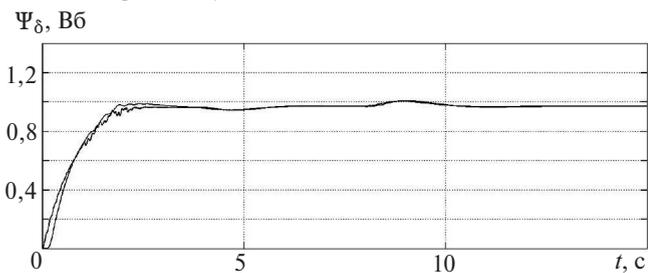


Рис. 9. Результаты моделирования магнитных потоков в ЭП при изменениях параметра L'_m («токовая модель»)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sobhan Mohamadian** A novel flux observer and switching scheme for LCI-fed synchronous motor drives, 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), 2017, pp. 425–430.
2. **Zhen Xin, Rende Zhao, Frede Blaabjerg, Longlong Zhang, Poh Chiang Loh.** An Improved Flux Observer for Field-Oriented Control of Induction Motors Based on Dual Second-Order Generalized Integrator Frequency-Locked Loop. – IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, vol. 5, iss. 1, p. 513–525.
3. **Мешеряков В.Н., Безденежных Д.В.** Наблюдатель потока сцепления для машины двойного питания, управляемой по статорной и роторной цепям. – Вестник Воронежского гос. тех. ун-та, 2010, т. 6, № 11, с. 170–173.
4. **Mengoni M., Zarri L., Tani A., Serra G., Casadei D.** Sensorless speed observer based on third-order spatial field harmonic for multiphase induction motor drives. – IEEE Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED), 2016, pp. 1–6.
5. **Афанасьев К.С., Глазырин А.С.** Идентификация скорости асинхронного электродвигателя лабораторного стенда с помощью фильтра Калмана и наблюдателя Люенбергера. – Электротехнические комплексы и системы управления, 2012, № 4, с. 66–69.
6. **Douglas D. de Oliveira, Rodrigo P. Vieira, Hilton A. Gröndling** A quasi-sliding mode speed and position observer with a chattering elimination filter. – IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), 2015, pp. 1–6.
7. **Tutaev G., Bobrov M.** Rotor speed estimation in control system of electric drive based on induction inverter-fed motor. – IX International Conference on Power Drives Systems (ICPDS), 2016, pp. 1–4.
8. **Шрейнер Р.Т.** Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000, 654 с.
9. **Ботвинник М.М., Шакарян Ю.Г.** Управляемая машина переменного тока. – М.: Наука, 1969, 352 с.
10. **Копылов И.П.** Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 2001, 327 с.
11. **Безденежных Д.В.** Разработка и исследование электропривода на базе машины двойного питания с подключением обмоток статора и ротора к преобразователям частоты: Дис. ... канд. техн. наук. – Липецк, 2011, 200 с.
12. **Гуляев И.В., Тутаев Г.М.** Системы векторного управления электроприводом на основе асинхронизированного вентильного двигателя. – Саранск, 2010, 200 с.
13. **Рудаков В.В., Столяр И.М., Дартау В.А.** Асинхронный электропривод с векторным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, 1992, 296 с.
14. **Бобров М.А., Тутаев Г.М.** Разработка наблюдателя основного магнитного потока для реализации бездатчиковых принципов управления электроприводом на базе асинхронизированного вентильного двигателя. – Сб. научных трудов по итогам Международной научно-практической конф. «Актуальные вопросы науки и техники». – Самара, 2017, с. 42–46.
15. **Sergio A. Diaz, Cesar A. Silva, Jorge Juliet, Hernan M. Delpino.** Novel anti-windup scheme for stator flux control in surface permanent magnet machines. Power and Energy Conference (TPEC). – IEEE Texas, 2017.
16. **Ming Yang, Li Niu, Dian-guo Xu.** A novel piecewise Anti-Windup design for speed loop PI controller of PMSM servo system, Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012 15th International.
17. **Тутаев Г.М., Бобров М.А., Гуляев И.В.** Оценка энергетических характеристик асинхронизированного вентильного двигателя при различных способах аппроксимации кривой намагничивания. – Электротехника, 2017, № 6, с. 2–6.
18. **Тутаев Г.М., Юшков И.С., Бобров М.А.** Исследование энергоэффективных режимов работы электропривода на базе асинхронизированного вентильного двигателя. – Сб. научных трудов по итогам Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом». – Новосибирск, 2017, с. 68–72.
19. **Бобров М.А.** Исследование влияния параметров базовой машины на многоконтурную систему управления электроприводом на базе асинхронизированного вентильного двигателя. Сб. научных трудов по итогам Международной научно-практической конференции «Проблемы и достижения в науке и технике». – Омск, 2017, с. 78–82.
20. **Бесекерский В.А., Попов Е.П.** Теория систем автоматического управления: Учебник. – СПб.: Профессия, 2003, 752 с.
21. **Калачев Ю.Н.** Наблюдатели состояния в векторном электроприводе. – ООО «Гамем», 2015, 80 с.
22. **Saihi L., Bouter A.** Robust sensorless sliding mode control of PMSM with MRAS and Luenberger extended observer, 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC).

[11.09.2017]

Авторы: Бобров Максим Андреевич окончил факультет электронной техники Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва (г. Саранск) в 2014 г. Аспирант кафедры электроники и нанoeлектроники МГУ им. Н.П. Огарёва.

Тутаев Геннадий Михайлович окончил факультет электроники и автоматики МГУ им. Н.П. Огарёва в 1986 г. В 2002 г. защитил кандидатскую диссертацию. Доцент кафедры электроники и нанoeлектроники МГУ им. Н.П. Огарёва.

Elektrichestvo (Electricity), 2018, No. 2, pp. 44–51

DOI:10.24160/0013-5380-2018-2-44-51

Magnetic Flux Observers in the Drive Control System Equipped with a Double-Fed Motor

BOBROV Maksim A. (Mordva State University named N.P. Ogarev – MSU, Saransk, Russia) – Ph.D. Student

TUTAYEV Gennadii M. (MSU named N.P. Ogarev, Saransk, Russia) – Associate Professor

The article presents a vector-based control system for an electric drive on the basis of an asynchronous switched motor without a magnetic flux sensor. Structural diagrams are considered, and two magnetic flux observer models are described: a magnetic flux observer using the field voltage as the input parameter and

a current-based observer model. The field voltage-based observer is sensitive to changes in the resistance and brings the vector control system in unstable state if deviates from its nominal value by 5–10%. Application of the current-based model results in that the magnetic flux values are determined with an error of no less than 15% in the range of low loads, which has an adverse effect on the dynamic performance and loss in the magnetization loop. But on the while, the system remains stable once the specified magnetic flux is reached. The adjustable drive control system stability boundaries in varying the field winding resistance are determined using the D-decomposition method. The influence of the magnetization curve approximation accuracy in identifying the magnetic flux by the current-based observer is investigated. The theoretical investigation results are confirmed by the results of simulation carried out in the Matlab software system environment.

Key words: asynchronized switched motor, mathematical model, characteristic equation, sensorless control, magnetic flux observer

REFERENCES

1. **Sobhan Mohamadian** A novel flux observer and switching scheme for LCI-fed synchronous motor drives, 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), 2017, pp. 425–430.
2. **Zhen Xin, Rende Zhao, Frede Blaabjerg, Longlong Zhang, Poh Chiang Loh.** An Improved Flux Observer for Field-Oriented Control of Induction Motors Based on Dual Second-Order Generalized Integrator Frequency-Locked Loop. – IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, vol. 5, iss. 1, p. 513–525.
3. **Meshcheryakov V.N., Bezdenezhnykh D.V.** *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – in Russ. (Bulletin of Voronezh State Technical University)*, 2010, vol. 6, No. 11, pp. 170–173.
4. **Mengoni M., Zarri L., Tani A., Serra G., Casadei D.** Sensorless speed observer based on third-order spatial field harmonic for multiphase induction motor drives. – IEEE Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED), 2016, pp. 1–6.
5. **Afanas'yev K.S., Glazyrin A.S.** *Elektrotekhnicheskiye komplekсы i sistemy upravleniya – in Russ. (Electrotechnical Complexes and Controlled Systems)*, 2012, No. 4, pp. 66–69.
6. **Douglas D. de Oliveira, Rodrigo P. Vieira, Hilton A.** Губиндлинг A quasi-sliding mode speed and position observer with a chattering elimination filter. – IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), 2015, pp. 1–6.
7. **Tutaev G., Bobrov M.** Rotor speed estimation in control system of electric drive based on induction inverter-fed motor. – IX International Conference on Power Drives Systems (ICPDS), 2016, pp. 1–4.
8. **Shreiner R.T.** *Matematicheskoye modelirovaniye elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty (Mathematical Modeling of AC Drives with Semiconductor Frequency Converters)*. Yekaterinburg, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 2000, 654 p.
9. **Botvinnik M.M., Shakaryan Yu.G.** *Upravlyayemaya mashina peremennogo toka (Controlled AC machine)*. Moscow, Publ. «Nauka», 1969, 352 p.
10. **Kopylov I.P.** *Matematicheskoye modelirovaniye elektricheskikh mashin (Mathematical modeling of electrical machines)*. Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 2001, 327 c.
11. **Bezdenezhnykh D.V.** *Razrabotka i issledovaniye elektroprivoda na baze mashin dvoynogo pitaniya...: Dis... kand. tekhn. nauk (Development and research of the electric drive on the basis of machines of a double food ...: Diss. for the Degree of Cand. Sci. (Eng.))*. Lipetsk, 2011, 200 p.
12. **Gulyayev I.V., Tutayev G.M.** *Sistemy vektornogo upravleniya elektroprivodom na osnove asinkhronizirovannogo ventil'nogo dvigatelya (Vector control systems for electric drives based on an asynchronous valve motor)*. Saransk, 2010, 200 p.
13. **Rudakov V.V., Stolyarov I.M., Dartau V.A.** *Asinkhronnyi elektroprivod s vektornym upravleniyem (Asynchronous electric drive with vector control)*. Leningrad, Energoatomizdat, 1992, 296 p.
14. **Bobrov M.A., Tutayev G.M.** *Sb. nauchnykh trudov po itogam Mezhdunarodn. nauchno-prakticheskoi konf. «Aktual'nye voprosy nauki i tekhniki – in Russ. (Proc. of the Intern. scientific-practical conf. «Timely problems of science and technology»*. Samara, 2017, pp. 42–46.
15. **Sergio A. Diaz, Cesar A. Silva, Jorge Juliet, Hernan M. Delpino.** Novel anti-windup scheme for stator flux control in surface permanent magnet machines. Power and Energy Conference (TPEC). – IEEE Texas, 2017.
16. **Ming Yang, Li Niu, Dian-guo Xu.** A novel piecewise Anti-Windup design for speed loop PI controller of PMSM servo system, Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012 15th International.
17. **Tutayev G.M., Bobrov M.A., Gulyayev I.V.** *Elektrotekhnika – in Russ. (Power Engineering)*, 2017, No. 6, pp. 2–6.
18. **Tutayev G.M., Yushkov I.S., Bobrov M.A.** *Sb. nauchnykh trudov po itogam Mezhdunarodn. nauchno-prakticheskoi konf. «Aktual'nye problemy tekhnicheskikh nauk v Rossii i za rubezhom» – in Russ. (Proc. of the Intern. scientific-practical conf. «Timely problems of technical sciences in Russia and abroad»*. Novosibirsk, 2017, pp. 68–72.
19. **Bobrov M.A.** *Sb. nauchnykh trudov po itogam Mezhdunarodn. nauchno-prakticheskoi konf. «Problemy i dostizheniya v nauke i tekhnike» – in Russ. (Proc. of the Intern. scientific-practical conf. «Problems and achievements in science and technology»*. Omsk, 2017, pp. 78–82.
20. **Besekerskii V.A., Popov Ye.P.** *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya ((The theory of automatic control systems)*. St. Petersburg, Publ. «Professiya», 2003, 752 p.
21. **Kalachev Yu.N.** *Nablyudateli sostoyaniya v vektornom elektroprivode (Observers of the state in a vector electric drive)*. LLC «Gamem», 2015, 80 p.
22. **Saihi L., Bouter A.** Robust sensorless sliding mode control of PMSM with MRAS and Luenberger extended observer, 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC).

[11.09.2017]