

УДК 621.3.07

РАЗРАБОТКА НАБЛЮДАТЕЛЯ СКОРОСТИ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ТИРИСТОРНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ

Козлова Л.Е., Тимошкин В.В., Глазырин А.С.

ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
Томск, e-mail: timvv@sibmail.com

В данной работе рассмотрены и наглядно представлены основные достоинства и недостатки тиристорного регулятора напряжения асинхронного двигателя по сравнению с преобразователем частоты. Исследован тиристорный регулятор напряжения асинхронного двигателя с замкнутым контуром скорости по сигналам с датчика и модифицированного наблюдателя Луюенбергера. В основе наблюдателя лежит математическая модель асинхронного электродвигателя в двухфазной неподвижной системе координат. На вход наблюдателя подаются сигналы с датчиков тока и напряжения, а невязки обрабатываются внутренними пропорционально-интегральными регуляторами. Для получения более достоверной формы напряжения, приложенного к обмоткам статора асинхронного двигателя, была разработана уточненная модель тиристорного регулятора напряжения, который позволяет регулировать скорость вращения двигателя, изменяя угол открытия ключей. Выявлены особенности работы системы «тиристорный регулятор напряжения – асинхронный двигатель», замкнутой по сигналу с наблюдателя, которые связаны с тем, что при регулировании скорости вращения не соблюдается постоянство мощностей и искажается форма напряжения, подаваемого на обмотки статора. Для повышения качества динамики и расширения диапазона регулирования системы управления асинхронным двигателем было предложено использовать адаптивный регулятор скорости.

Ключевые слова: наблюдатель Луюенбергера, тиристорный регулятор напряжения, асинхронный двигатель, математическая модель

SPEED OBSERVER DESIGN FOR CONTROL SYSTEM OF INDUCTION MOTOR DRIVES WITH THYRISTOR VOLTAGE REGULATOR

Kozlova L.E., Timoshkin V.V., Glazyrin A.S.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, , e-mail:timvv@sibmail.com

In this paper we discussed and graphically presents the main advantages and disadvantages of a thyristor voltage regulator induction motor is compared to the frequency converter. Investigated thyristor voltage induction motor with closed loop speed signals from the sensor and the modified Luenberger observer. At the heart of the observer is a mathematical model of two-phase induction motor in the fixed coordinate system. The input signals are fed to the observer's current and voltage sensors, and the residuals are processed by internal proportional-integral controllers. To obtain a more accurate form of the voltage applied to the stator windings of an induction motor has been developed refined model of thyristor voltage regulator, which allows you to adjust the motor speed by changing the opening angle of the keys. The features of the system «thyristor voltage regulator – induction motor», closed by a signal from the observer, are related to the fact that the speed regulation is not complied with constant power and distort the shape of the voltage applied to the stator windings. To improve the quality of the dynamics and extend the range of control system induction motor has been proposed to use an adaptive speed control.

Keywords: Luenberger Observer, a thyristor voltage regulator, induction motor, a mathematical model

При подробном изучении рынка электроприводов для асинхронных двигателей было выявлено, что активном спросом, как у нас, так и за рубежом, на сегодняшний день пользуются электроприводы на основе преобразователя частоты (ПЧ). Ранее данный тип электроприводов не находил массового применения, так как было два основных сдерживающих барьера: высокая стоимость и ограниченная мощность полупроводников. Сейчас можно найти ПЧ от нескольких киловатт до мегаватт по приемлемым ценам. К основным достоинствам ПЧ можно отнести высокую точность регулирования, большой диапазон, а к недостаткам – двойное преобразование энергии, большую частоту коммутаций полупроводниковых ключей, необходимое оборудование в виде дополнительных датчиков. Для реализации векторного управления с помощью ПЧ необходимо

иметь датчик скорости, датчики напряжения, потокосцепления и тока [1].

Область применения ПЧ практически ничем не ограничена, поэтому при модернизации и внедрении новых технологий их используют повсеместно. Есть механизмы, которые не требуют большого диапазона регулирования, но нуждаются в плавном пуске. В таких случаях хорошо подходит асинхронный электропривод (АЭП) на основе тиристорного регулятора напряжения (ТРН). Данные электроприводы широко используются для таких механизмов, как конвейеры, центробежные вентиляторы, насосы. Основным преимуществом ТРН над ПЧ является низкая стоимость.

На рис. 1 представлены графики зависимости стоимости от мощности для ТРН и ПЧ производителей электроприводов ABB и Siemens [2, 3].

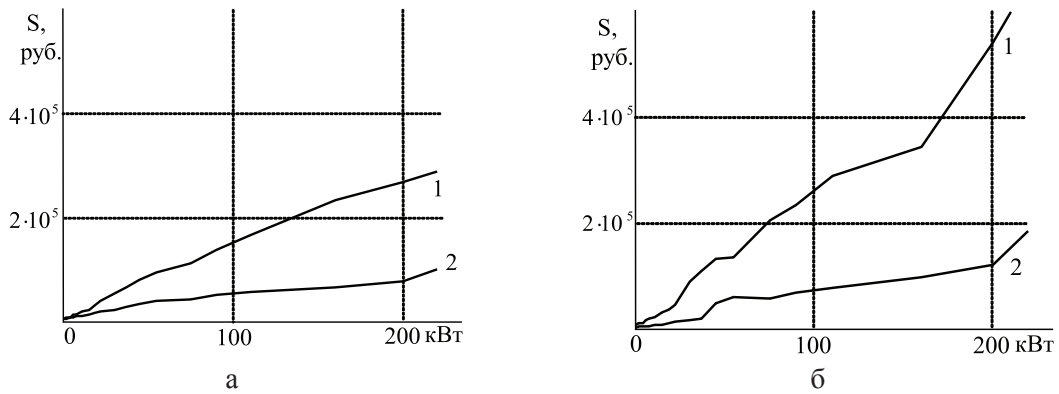


Рис. 1. Кривые стоимости преобразователя частоты и тиристорного регулятора напряжения от мощности: а – Siemens; б – ABB;

1 – преобразователи частоты; 2 – тиристорные регуляторы напряжения

Из рис. 1 видно, что до 5,5 кВт стоимость ПЧ и ТРН практически одинаковая, но с ростом мощности привода разница в цене начинает увеличиваться. У производителя электроприводов АВВ наблюдается наибольшая разница в цене ТРН и ПЧ по сравнению с Siemens. Так, например, для мощности 200 кВт она соответствует 420 600 тыс. руб., или 4 приводам ТРН-АД. Исходя из изложенного, можно сделать вывод, что при установке ТРН можно значительно сэкономить, при условии, что данный привод удовлетворяет технологическим требованиям.

Ко второму существенному достоинству ТРН можно отнести надежность. Так как ее оценить без статистических данных пробле-

матично, то в предположении, что силовые элементы, используемые в ТРН и ПЧ, эквиваленты, а также ввиду их большого количества и значительного числа коммутаций на один период, надежность ПЧ окажется меньше, чем надежность ТРН.

Цель исследования: разработка замкнутой по скорости системы управления асинхронным электроприводом с тиристорным регулятором напряжения и модифицированным наблюдателем Льюенбергера.

Имитационная модель системы ТРН-АД. Для проведения исследования была разработана имитационная модель в Matlab2007b/Simulink асинхронного электропривода по схеме ТРН-АД (рис. 2).

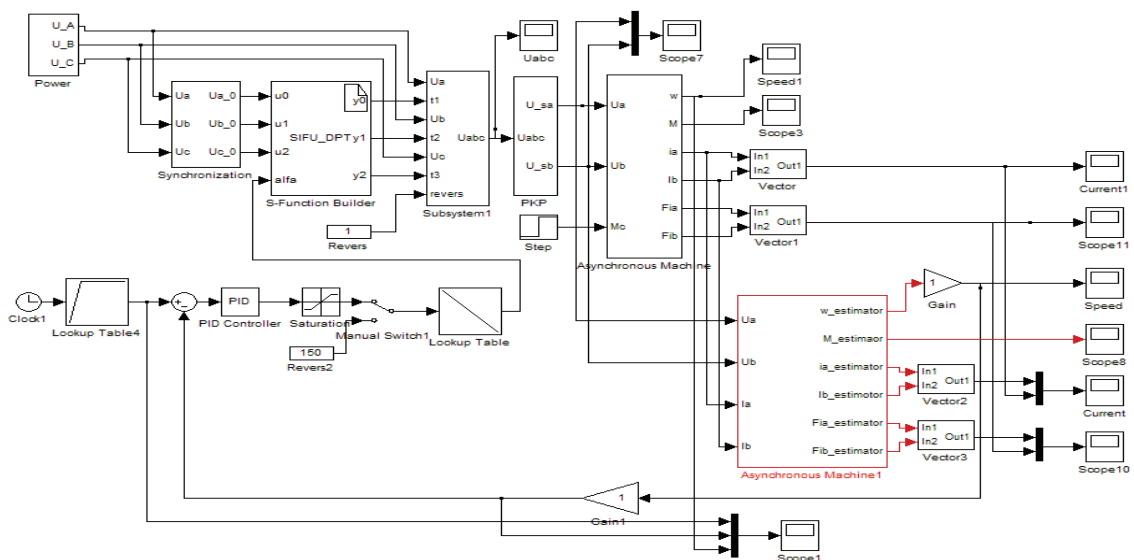
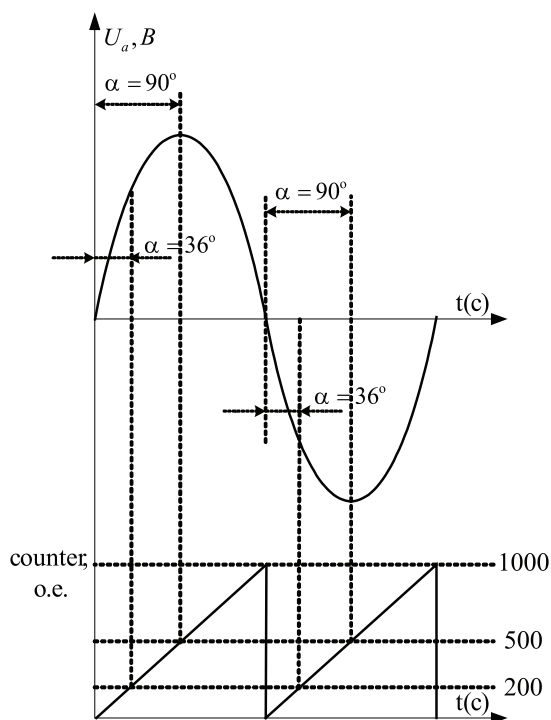


Рис. 2. Имитационная модель асинхронного электропривода по структуре ТРН-АД с наблюдателем скорости

Блок Power представляет собой источник питания, который формирует три фазы напряжения. Затем идет блок Synchronization,

который синхронизирует работу системы управления с сетью путем подачи коротких импульсов при прохождении синусои-

дального напряжения через ноль. Принцип работы данного устройства следующий: из текущего сигнала вычитается задержанный, затем формируется модуль ошибки, который с помощью компаратора сравнивается с ранее установленным значением 0,0001. Система управления была реализована с помощью блока S-function Builder программным методом с шагом дискретизации 0,00001. Принцип работы наглядно иллюстрирует рис. 3, а справа от него расположен программный



код. Работа системы управления осуществляется следующим образом: имеется три счетчика counter, counter1, counter2, которые запускаются в момент прохождения синусоиды через ноль и по истечении определенного момента времени формируют необходимый угол открытия ключей для каждой фазы. По завершении обработки заданного угла счетчики обнуляются, и процесс повторяется при повторном приходе импульса с блока синхронизации.

```
int static counter = 0, counter1 = 0, counter2 = 0 ;
int static mode = 2, mode1 = 2, mode2 = 2 ;
//Ua faze-----
if (u0[0] > 5) mode = 0;
if (mode == 0)
{
y0[0] = 0;
counter++;
if (counter >= alfa[0]) mode = 1;
}
if (mode == 1) {counter = 0; y0[0] = 1;}
//Ub faze-----
if (u1[0] > 5) mode1 = 0;
if (mode1 == 0)
{
y1[0] = 0;
counter1++;
if (counter1 >= alfa[0]) mode1 = 1;
}
if (mode1 == 1) {counter1 = 0; y1[0] = 1;}
//Uc faze-----
if (u2[0] > 5) mode2 = 0;
if (mode2 == 0)
{
y2[0] = 0;
counter2++;
if (counter2 >= alfa[0]) mode2 = 1;
}
if (mode2 == 1) {counter2 = 0; y2[0] = 1;}
```

Рис. 3

Полному открытию, или 180 градусам для счетчиков, соответствует значение, равное 1000, следовательно, для 90 градусов будет 500, а для 1 градуса – 5,5. Так как переменная counter инициализирована как integer (целочисленное число), то будет наблюдаться небольшая погрешность при регулировании. Переменные u[0], u1[0], u2[0] представляют собой сигналы, полученные с синхронизирующего блока, y[0],

y1[0], y2[0] – выходные импульсы, alfa[0] – входной сигнал задания угла. В блоке Subsystem1 реализована силовая часть тиристорного регулятора напряжения. Особенностью данного блока является использование идеальных ключей, которые открываются мгновенно и не имеют тока утечки. Блок РКР преобразует исходную трехфазную систему координат напряжения в двухфазную неподвижную.

Таблица 1

Параметры электродвигателя

P_n , кВт	f , Гц	R_1 , Ом	R_2 , Ом	L_1 , Гн	L_2 , Гн	L_m , Гн	p	n , об/мин
4	50	1,272	1,9126	0,009568	0,00358	0,0994	4	1410

Асинхронный электродвигатель реализован с помощью блока Asynchronous Mashine1 в двухфазной неподвижной системе координат. Параметры электродви-

гателя представлены в табл. 1. Плавная скорость задания реализуется с помощью задатчика интенсивности Lockuptable4. Блок Pid Contoller представляет собой

элемент из стандартного набора библиотеки Simulink. Для ограничения скорости в контуре регулирования использовался блок Saturation. Блок Lockuptable1 позволяет реализовать обратную зависимость между углом и скоростью, так при максимальной скорости вращения, равной 157,3 рад/с, угол открытия должен быть равен 0.

Наблюдатель Люенбергера. На рис. 4 представлена структурная схема модифицированного наблюдателя Люенбергера, который состоит из двухфазной математической модели асинхронного двигателя, пропорционально интегральных регуляторов Рег.1, Рег.2, апериодического звена первого порядка, блока выделения модуля и соответствующих коэффициентов $k1a, k1b, k2a, k2b$ [4].

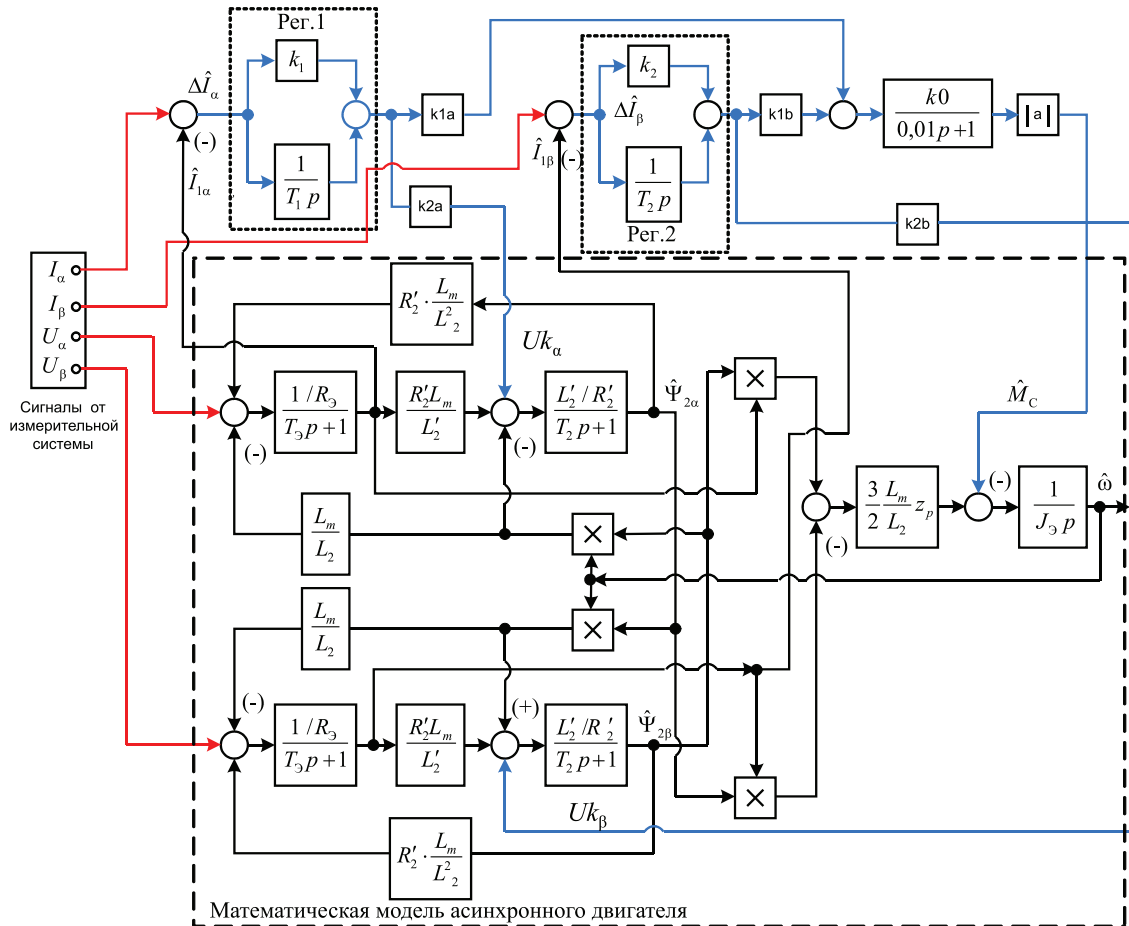


Рис. 4 Структурная схема наблюдателя

Для синтеза модифицированного наблюдателя Люенбергера необходимо знать параметры двигателя. Если их нет, то можно произвести идентификацию с помощью генетических алгоритмов методом наименьших квадратов или методом градиентного спуска [5, 6].

Модифицированный регулятор Люенбергера работает следующим образом: с двигателя в режиме реального времени снимаются и преобразуются в двухфазную систему координат сигналы токов I_α, I_β и напряжений с каждой фазы U_α, U_β . Напряжения U_α, U_β подаются сразу непосредственно на модель асинхронного двигателя, а с помощью токов I_α, I_β происходит корректировка оценок момента нагрузки M_c и пото-

косцеплений $\hat{\Psi}_{2\alpha}, \hat{\Psi}_{2\beta}$ с помощью сигналов модели Uk_α, Uk_β .

Оценка текущей нагрузки на валу двигателя \hat{M}_c происходит по следующему принципу: вначале обрабатываются невязки для каждой фазы по току с помощью Рег.1 и Рег.2, которые затем умножаются на соответствующие коэффициенты $k1a, k1b$, затем суммируются, проходят через апериодический фильтр с постоянной времени $T = 0,01$ с, в конечном итоге выделяется модуль и итоговый сигнал подается на математическую модель.

Корректировка магнитной цепи в модифицированном наблюдателе Люенбергера осуществляется путем умножения выход-

ного сигнала с регуляторов Reg.1 и Reg.2 на коэффициенты k_{2a} , k_{2b} и подачи сигналов Uk_{α} , Uk_{β} на модель. Принцип корректиров-

ки магнитной цепи показан в системе дифференциальных уравнений модифицированного наблюдателя Льюенбергера (1).

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\hat{\omega}}{dt} &= \frac{1}{J_{\Sigma}} \cdot [\hat{\psi}_{2\alpha}(t) \cdot \hat{i}_{1\beta}(t) - \hat{\psi}_{2\alpha}(t) \cdot \hat{i}_{1\beta}(t)] \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p - M_C(t) \\ \frac{d\hat{\psi}_{2\alpha}(t)}{dt} &= \frac{L_m}{L_2'} \cdot R_2' \cdot \hat{i}_{1\alpha}(t) - \hat{\psi}_{2\beta}(t) \cdot \hat{\omega}(t) \cdot z_p - \frac{R_2'}{L_2'} \cdot \hat{\psi}_{2\alpha}(t) + Uk_{\alpha} \\ \frac{d\hat{\psi}_{2\beta}(t)}{dt} &= \frac{L_m}{L_2'} \cdot R_2' \cdot \hat{i}_{1\beta}(t) + \hat{\psi}_{2\alpha}(t) \cdot \hat{\omega}(t) \cdot z_p - \frac{R_2'}{L_2'} \cdot \hat{\psi}_{2\beta}(t) + Uk_{\beta} \\ \frac{d\hat{i}_{1\alpha}(t)}{dt} &= \frac{U_{1\alpha}}{\sigma \cdot L_1} + \frac{d\hat{\psi}_{2\alpha}(t) \cdot R_2' \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2'} + \frac{L_m \cdot \hat{\psi}_{2\beta}(t) \cdot \hat{\omega}(t) \cdot z_p}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} - \frac{\hat{i}_{1\alpha}(t) \cdot R_{\Sigma}}{\sigma \cdot L_1} \\ \frac{d\hat{i}_{1\beta}(t)}{dt} &= \frac{U_{1\beta}}{\sigma \cdot L_1} + \frac{d\hat{\psi}_{2\beta}(t) \cdot R_2' \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2'} + \frac{L_m \cdot \hat{\psi}_{2\alpha}(t) \cdot \hat{\omega}(t) \cdot z_p}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} - \frac{\hat{i}_{1\beta}(t) \cdot R_{\Sigma}}{\sigma \cdot L_1} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Настройка коэффициентов наблюдателя Reg.1, Reg.2, а также k_{1a} , k_{1b} , k_{2a} , k_{2b} , k_0 происходит методом подбора таким образом, чтобы при набросе нагрузки в разомкнутом состоянии просадка по нагрузке, как в двигателе, так и в наблюдателе, была одинаковая.

Результаты исследования. На рис. 5 представлены переходные процессы скорости системы, замкнутой по сигналам дат-

чика и модифицированного наблюдателя Льюенбергера. В ходе исследования было установлено, что на больших скоростях система с наблюдателем обрабатывает задание практически так же, как и с датчиком, но на малых скоростях появляются автоколебания, которые приводят к нестабильной работе. Для уменьшения автоколебаний и увеличения диапазона регулирования был введен адаптивный регулятор скорости.

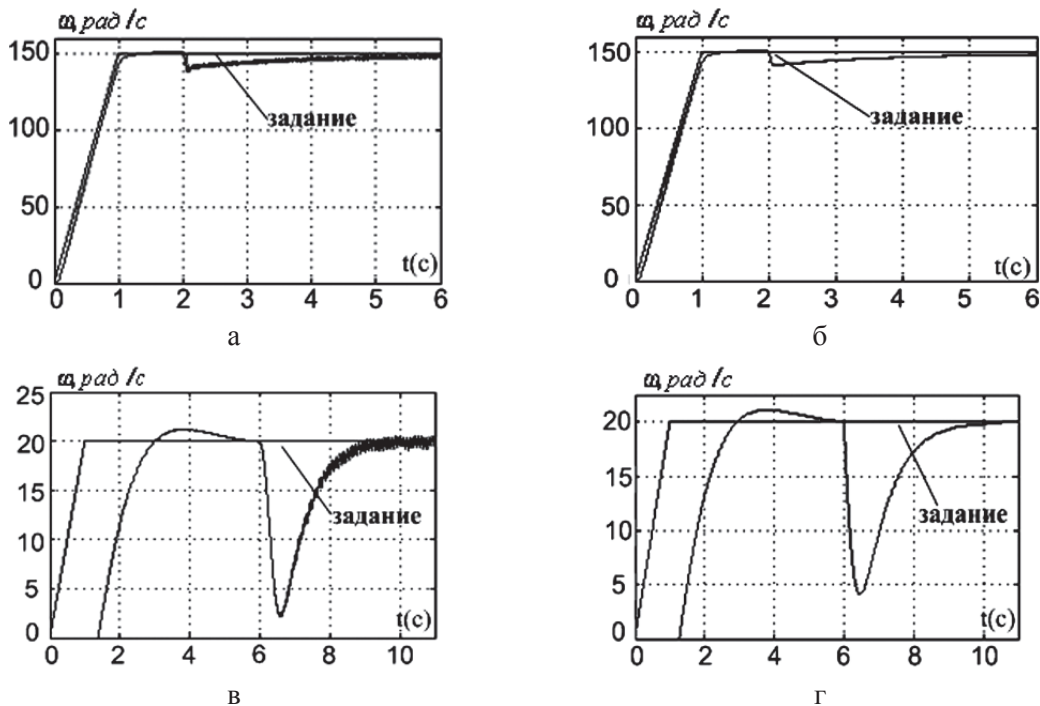


Рис. 5 Переходные процессы по скорости с наблюдателем:
 а – $\omega_{зад} = 150 \text{ рад/с}$, $M_C = 100\%$; в – $\omega_{зад} = 20 \text{ рад/с}$, $M_C = 100\%$;
 с датчиком скорости:
 б – $\omega_{зад} = 150 \text{ рад/с}$, $M_C = 100\%$; г – $\omega_{зад} = 20 \text{ рад/с}$, $M_C = 100\%$

Использовано два набора параметров регулятора скорости для следующих диапазонов: больших скоростей – от 60 до 150 рад/с, малых скоростей – менее 60 рад/с. Такой вариант позволил расширить диапазон регулирования до 1:8.

В табл. 2 приведены основные показатели переходных процессов по

скорости, из которых видно, что статическая ошибка у наблюдателя с уменьшением скорости задания увеличивается. При малых скоростях при набросе нагрузки в варианте системы, замкнутой по сигналу с наблюдателя, имеется больший провал скорости, чем в случае с наблюдателем.

Таблица 2

Показатели переходных процессов АЭП с контуром скорости, замкнутым по сигналам датчика и наблюдателя

	Задание на скорость $\omega_{зад}$, рад/с	Нагрузка, % от M_n	Динамическая ошибка, % от ω_n	Статическая ошибка, % от ω_n	Провал скорости, % от ω_n
Датчик	20	10%	21%	0,5%	79%
Наблюдатель	20	10%	23%	5	88%
Датчик	150	100%	2%	1%	7,5%
Наблюдатель	150	100%	2%	1,5%	8%

Модифицированный наблюдатель вырабатывает оценку скорости с запаздыванием, что приводит к большему провалу скорости при набросе нагрузки в диапазоне малых скоростей.

Заключение

1. В данной работе был разработан модифицированный наблюдатель Люенбергера скорости для асинхронного электропривода с тиристорным регулятором напряжения, который позволяет, используя только сигналы токов и напряжения идентифицировать скорость в диапазоне 1:8 с погрешностью не более 5%.

2. В ходе исследования было установлено, что параметры регулятора в контуре скорости влияют на работу модифицированного наблюдателя. Для более устойчивой работы наблюдателя на низких скоростях было предложено использовать адаптивный регулятор скорости.

Список литературы

1. Афанасьев К.С., Глазырин А.С. Экспериментальное апробирование алгоритмов идентификации асинхронного электродвигателя на основе фильтра Калмана и наблюдателя Люенбергера // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: труды Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Т 1. Радиоэлектроника, электротехника и электроэнергетика, Томск, 6-8 Октября 2011. – Томск: СПБ Графикс, 2011 – С. 326–329
2. Прайс-лист приводов Abb URL: <http://privod.szemo.ru> (дата обращения: 18.02.2012).
3. Прайс-лист приводов Siemens ООО «СпецТрейдИмпорт» URL: www.mechprivod.ru (дата обращения: 18.02.2012).
4. Рогозин Г.Г. Определение электромагнитных параметров машин переменного тока. Новые экспериментальные методы. – К.: Техника, 1992. – 168 с.

5. Шубенко В.А. Shubenko V.A. Тиристорный асинхронный электродвигатель с фазовым управлением / Браславский И.Я. – М.: Энергия, 1972. – 200 с.

References

1. Afanas'ev K.S., Glazyrin A.S. Radiojelektronika, jelektrrotehnika i jenergetika: trudy Mezhdunarodnoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh. «Jeksperimental'noe aprobirovanie algoritmov identifikacii asinhronnogo jelektrodvigatelja na osnove fil'tra Kalmana i nabljudatelja Ljuenbergera, Radiojelektronika, jelektrrotehnika i jenergetika: trudy Mezhdunarodnoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh» (Proceedings of the International Conference of Students and Young Scientists. T 1. Electronics, electrical engineering and power, «Experimental testing of algorithms for the identification of induction motor based on the Kalman filter and observer Lyuenbergera»). Tomsk, 2011, pp. 326–329.)
2. Price list of drives Abb Available at: <http://privod.szemo.ru> (accessed 18.02.2012).
3. Price list of drives Siemens ООО «СпецТрейдИмпорт» Available at: www.mechprivod.ru (accessed 18.02.2012).
4. Rogozin G.G. Opredelenie jelektromagnitnyh parametrov mashin peremennogo toka. Novye jeksperimental'nye metody [Identification of electromagnetic parameters of AC machines. New experimental methods]. Kemerovo, tech., 2011.
5. Shubenko V.A., Braslavskij I.Ja. Tiristornyj asinhronnyj jelektroprivod s fazovym upravleniem [Thyristor asynchronous electric drive with phase control]. Moscow, energy, 1972.

Рецензенты:

Аристов А.В., д.т.н., профессор кафедры электропривода и электрооборудования ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск;

Исаев Ю.Н., д.ф.-м.н., профессор кафедры электрических сетей и электротехники ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Работа поступила в редакцию 03.08.2012.