

## НАБЛЮДАТЕЛИ В СИСТЕМАХ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ ГЕРМЕТИЧНОГО ЭЛЕКТРОНАСОСА

Для герметичных электронасосов на основе синхронных частотно-регулируемых электроприводов, как правило, исключено использование непосредственно датчиков скорости либо положения, что предопределяет применение различных наблюдателей, позволяющих по известным управляющим воздействиям и некоторым прямо измеряемым переменным состояниям электропривода косвенно определять необходимые его координаты. Целью работы является оценка технических возможностей и показателей применяемых в общепромышленных системах векторного управления различного типа наблюдателей. Сравниваются: наблюдатель положения и скорости на основе оценки ЭДС двигателя с обычным инерционным фильтром первого порядка; наблюдатель положения и скорости на основе оценки ЭДС двигателя с применением фильтра Калмана; неустойчивый наблюдатель положения; неустойчивый наблюдатель положения с обнуляющимся интегратором и адаптивный наблюдатель. Анализ наблюдателей выполнен на примере разработанного в АО «Корпорация "ВНИЭМ"» частотно-регулируемого привода герметичного электронасоса с синхронным двигателем с постоянными магнитами. Показаны ограничения перечисленных наблюдателей и преимущество использования адаптивных наблюдателей.

**Ключевые слова:** герметичный электронасос, синхронный двигатель, преобразователь частоты, наблюдатель, математическая модель, векторное управление.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из вариантов обеспечения полной герметичности электронасосов с отсутствием уплотнения вала и возможностью утечки перекачиваемой среды является исполнение насоса и двигателя в едином конструктивном блоке. Как правило, электропривод подобных насосов синхронный частотно-регулируемый. При этом конструкция синхронного двигателя предполагает наличие между его статором и ротором двух (керамической или металлической) гильз, одна из которых жестко соединена с ротором, а вторая со статором. Металлическая гильза, подвижная относительно поля ротора, приводит к возникновению в ней вихревых токов и увеличению тепловых потерь в двигателе, которые необходимо учитывать. Герметичность же насоса не позволяет использовать датчики скорости либо положения и предопределяет применение бездатчиковой системы управления регулируемым приводом, где важнейшим элементом является наблюдатель [1]. Понятно, что для подобных конструкций синхронных машин необходимо оценить возможности наблюдателей, применяемых в общепромышленных системах векторного управления. Из множества видов наблюдателей, заметно различающихся по принципу своего построения, работы, методу наблюдения за не измеряемыми параметрами и их оценки, полезно выявить наиболее целесообразные с определением качества их работы.

### ПРИКЛАДНОЙ ОБЪЕКТ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ

Анализ наблюдателей выполнен на примере разработанного в АО «Корпорация "ВНИЭМ"» частотно-регулируемого привода герметичного электронасоса с синхронным двигателем с постоянными магнитами. Технические характеристики двигателя и преобразователя частоты для его питания приведены в **табл. 1** и **2**.

Как видно из **табл. 1** наибольшая мощность потерь в двигателе приходится на гильзу статора из-за её достаточного низкого сопротивления и протекания больших токов. Возможным способом уменьшения потерь в гильзе в векторной системе управления приводом могло быть введение задания на не нулевой ток по оси  $d$ . Но это повлечет за собой размагничивание машины и соответственно увеличение потребляемого из сети тока. Поэтому такой способ нецелесообразен и ограничен длительно допустимым током двигателя [3].

**Таблица 1**

### Технические данные синхронного электродвигателя

Мощность, кВт	150
Частота вращения, об/мин	4100
Напряжение фазное/линейное, В	202/350
Номинальный ток, А	386
КПД, %	71,4
Коэффициент мощности	0,9
Продольное индуктивное сопротивление $X_d$ , Ом	0,36
Поперечное индуктивное сопротивление $X_q$ , Ом	0,36
Активное сопротивление фазы (при 20°C), Ом	0,0044
Мощность потерь в обмотке, Вт	3800
Мощность потерь в стали, Вт	4400
Мощность потерь в гильзе статора, Вт	39000
Мощность потерь на трение ротора, Вт	13000

**Таблица 2**

### Технические характеристики ПЧ

Наименование параметра	Значение
Номинальный выходной ток, А	386
Номинальное линейное напряжение на выходе, В	350
Номинальная частота выходного напряжения, Гц	342
Номинальная активная мощность на выходе, кВт	210
Рабочий диапазон частоты выходного напряжения, Гц	40...342
Максимальная полная мощность на выходе, кВА	247

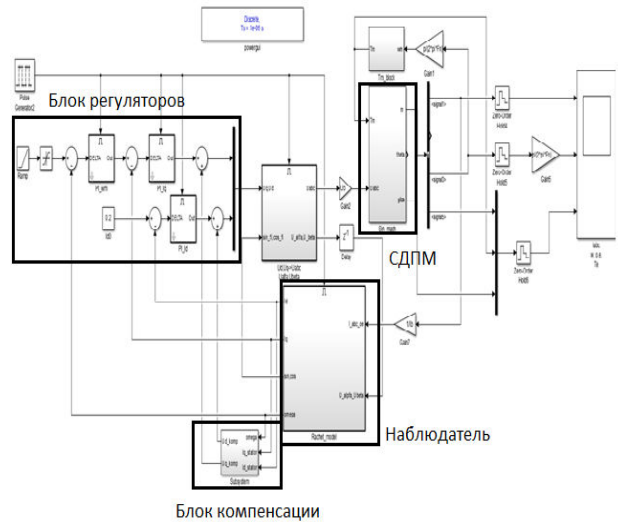
Учитывая сказанное, на **рис. 1** представлен функциональный состав модели электропривода герметичного электронасоса, содержащий блоки синхронного двигателя с постоянными магнитами СДПМ, формирования ШИМ-блок, в котором происходит перерасчет из относительных единиц в абсолютные и формируется выходное напряжение, пропорционально-интегральных регуляторов скорости, токов по осям q,d, а также блок наблюдателя положения ротора и оценки скорости привода, в котором реализована адаптивная система управления. При разработке модели все переменные и параметры электропривода представлены в относительных единицах, что при реализации в микропроцессорных системах является удобным при использовании расчетов с фиксированной точкой. Модель реализована для частоты расчета 10 кГц. В качестве базовых величин переменных были выбраны: для напряжения  $U_6 = \sqrt{2}U_{\phi,ном}$ , где,  $U_{\phi,ном}$  – номинальное фазное напряжение двигателя; для тока  $I_6 = \sqrt{2}I_{\phi,ном}$ , где,  $I_{\phi,ном}$  – номинальный фазный ток; для угловых скоростей и частот  $\Omega_6 = 2\pi f_{ном}$ , где  $f_{ном}$  – номинальная частота питания машины; для угла поворота  $\theta_6 = 2\pi$ ; для сопротивления  $Z_6 = U_6/I_6$ ; для потокоцепления  $\Psi_6 = U_6/\Omega_6$ ; для индуктивности  $L_6 = \Psi_6/I_6$ ; для времени  $T_6 = 1/\Omega_6$ ; для индуктивного сопротивления в относительных единицах  $X_{o.e.} = X_{abs}/X_6$ , где  $X_{abs}$  – значение индуктивного сопротивления в абсолютных единицах,  $X_6$  – базовое значение индуктивного сопротивления.

Электромагнитные процессы в двигатели описываются следующей системой уравнений. Данные уравнения построены на основе описания работы асинхронной и синхронной машин, так как взаимодействие статора и гильзы можно представить как асинхронную машину с короткозамкнутым заторможенным ротором.

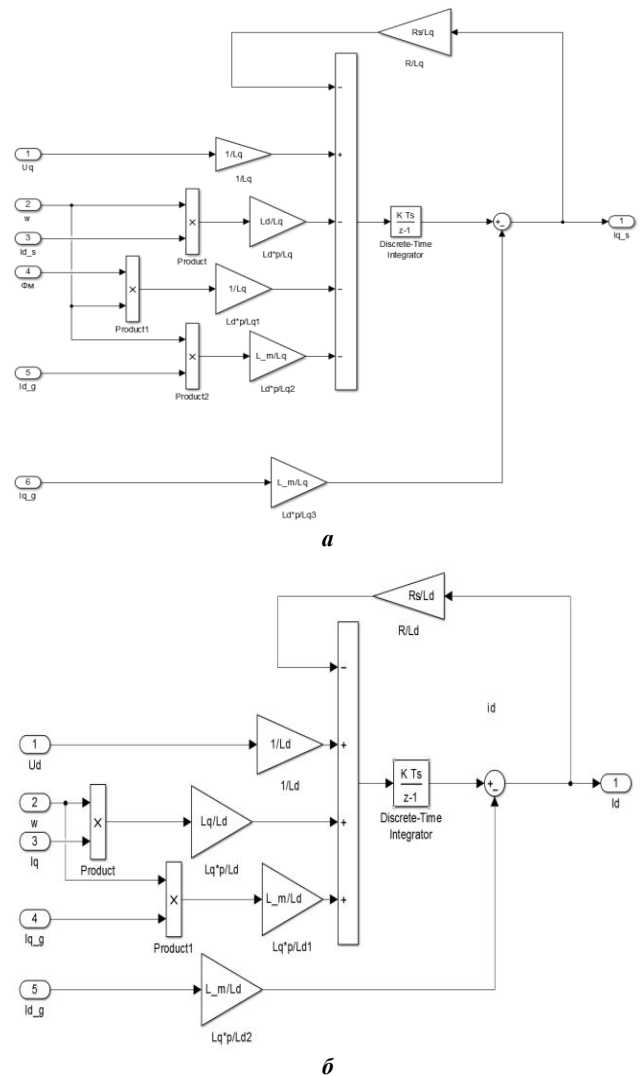
$$\begin{aligned}
 U_{sd} &= R_s I_{sd} - \omega_{eR} L_{sq} I_{sq} + \\
 &+ L_{sd} \frac{dI_{sd}}{dt} + L_m \frac{dI_{\Gamma d}}{dt} - \\
 &- \omega_{eR} L_m I_{\Gamma q}; \\
 U_{sq} &= R_s I_{sq} + \omega_{eR} L_{sd} I_{sd} + \\
 &+ \omega_{eR} \Psi_{n.m.} + L_{sq} \frac{dI_{sq}}{dt} + \\
 &+ L_m \frac{dI_{\Gamma q}}{dt} - \omega_{eR} L_m I_{\Gamma d},
 \end{aligned}$$

где  $U_{sd}, U_{sq}$  – напряжение по осям d, q;  $I_{sd}, I_{sq}$  – токи статора по осям d, q;  $I_{\Gamma d}, I_{\Gamma q}$  – токи гильзы по осям d, q;  $\omega_{eR}$  – электрическая скорость вращения поля;  $L_{sq}, L_{sd}$  – индуктивности статора по осям d, q;  $L_m$  – взаимная индуктивность между статором и гильзой.

Модель статора двигателя по осям q, d, построенная на основе этих соотношений, представлена на **рис. 2, а, б**. Для гильзы модель имеет такую же структуру как и для статора, только значение входных напряжений  $u_q, u_d$  равны нулю. В модели двигателя на **рис. 3** объединены модели статора и модели гильзы по осям q, d, на основе которых рассчитываются момент развиваемый двигателем, момент от гильзы, скорость и угол положения ротора.



**Рис. 1. Состав модели электропривода**



**Рис. 2. Модель статора двигателя:**  
а – по оси q; б – по оси d

На **рис. 4** представлен блок компенсации взаимовлияния каналов управления по осям d, q

В качестве регуляторов скорости и токов по осям q, d применяется ПИ-регулятор, представленный на **рис. 5**.

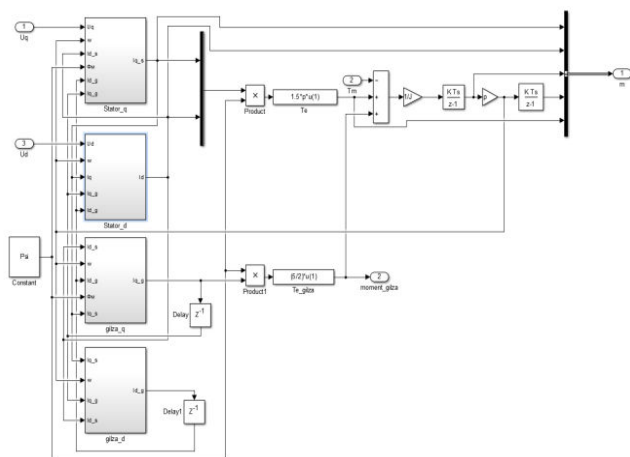


Рис. 3. Модель двигателя

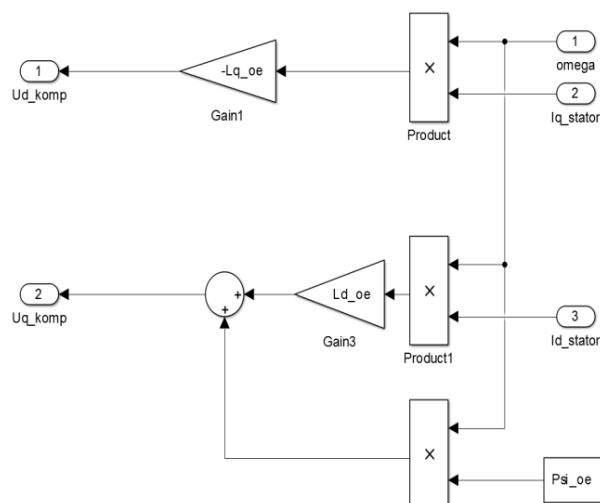


Рис. 4. Блок компенсации

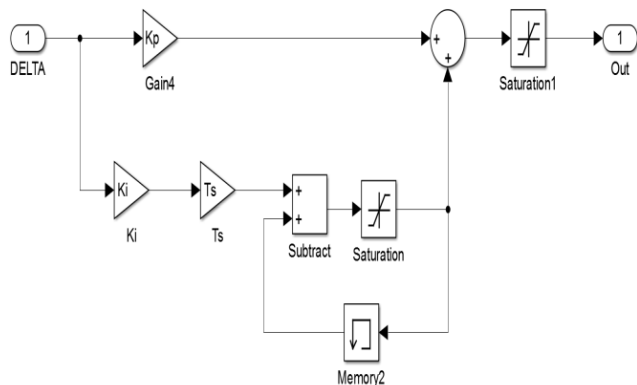


Рис. 5. ПИ-регулятор

АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ

Для оценки показателей различных вариантов наблюдателей сравниваются: наблюдатель положения и скорости на основе оценки ЭДС двигателя с обычным инерционным фильтром первого порядка, наблюдатель положения и скорости на основе оценки ЭДС двигателя с применением фильтра Калмана, неустойчивый наблюдатель положения, неустойчивый наблюдатель положения с обнуляющимся интегратором и адаптивный наблюдатель.

Наблюдатель положения и скорости на основе оценки ЭДС двигателя с обычным инерционным фильтром первого порядка (рис. 6) включает в себя два

наблюдателя ЭДС двигателя по осям  $\alpha$  и  $\beta$  и функцию арктангенса двух переменных для вычисления угла положения ротора [1].

Недостатком наблюдателя является невозможность его применения на низких скоростях, так как значение ЭДС двигателя при этом слишком мало. При фильтрации урезается и амплитуда ЭДС двигателя, происходит ее запаздывание (рис. 7), приводящее к ошибке в определении положения ротора машины (рис. 8). Уменьшение влияния фильтра возможно компенсацией постоянной времени  $T_\phi$  фильтра по соотношениям [1]:

$$\Delta\theta = a \tan(\omega T_\phi);$$

$$E = \sqrt{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \cdot \sqrt{1 + (\omega T_\phi)^2},$$

где  $\Delta\theta$  – компенсация угла положения;  $\omega$  – скорость рассчитанная наблюдателем;  $T_\phi$  – постоянная времени фильтра;  $E$  – вектор ЭДС;  $e_\alpha, e_\beta$  – ЭДС по осям  $\alpha, \beta$ .

Определение положения с учетом компенсации  $T_\phi$  представлено на рис. 9.

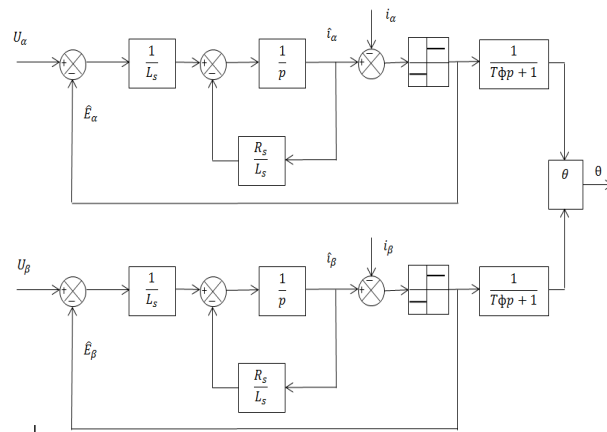


Рис. 6. Наблюдатель положения на основе оценки ЭДС двигателя с инерционным фильтром первого порядка

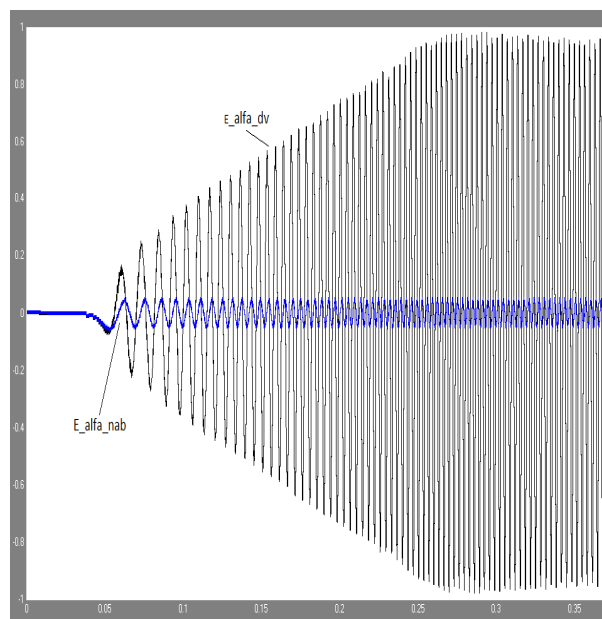


Рис. 7. ЭДС двигателя ( $e_{\alpha\_dv}$ ) и ЭДС, рассчитанное наблюдателем ( $e_{\alpha\_nab}$ )

Более сложным вариантом наблюдателя является структура, в которой вместо инерционных фильтров применяется фильтр Калмана [4]. Отличительной особенностью подобного наблюдателя является более точный расчет скорости самим фильтром, что позволяет применять этот наблюдатель при неизвестных параметрах магнитов двигателя. Наблюдатель не требует компенсации времени фильтра и каких-либо других дополнительных вычислений. Недостаток фильтра Калмана – в сложности его настройки и большем времени вычисления процессором, чем для обычного инерционного фильтра. Данный наблюдатель не может стабильно работать и на низких скоростях (начальный участок **рис. 10**). К тому же при фильтрации релейных сигналов ЭДС возникают большие значения в ковариационной матрице случайных воздействий в объекте, что может вызвать большие затруднения при программной реализации данного наблюдателя.

Рассматриваемые наблюдатели не решают проблему пуска привода в замкнутой бездатчиковой векторной системе управления. Одним из вариантов решения данной проблемы является неустойчивый наблюдатель (**рис. 11**), использующий следующие соотношения [1]:

$$\frac{d\Phi_\alpha}{dt} = u_\alpha - i_\alpha R_s;$$

$$\frac{d\Phi_\beta}{dt} = u_\beta - i_\beta R_s;$$

$$\cos\theta = \frac{\Phi_\alpha - i_\alpha L_s}{\Phi_{пм}};$$

$$\sin\theta = \frac{\Phi_\beta - i_\beta L_s}{\Phi_{пм}},$$

где  $\Phi_{пм}$  – потокосцепление постоянных магнитов;  $\Phi_\alpha, \Phi_\beta$  – потокосцепления по осям  $\alpha, \beta$ ;  $u_\alpha, u_\beta$  – напряжения, формируемые регуляторами по осям  $\alpha, \beta$ ;  $i_\alpha, i_\beta$  – токи, полученные с датчиков тока;  $R_s, L_s$  – параметры обмоток статора.

При математическом моделировании данный наблюдатель дает наилучшие результаты из рассмотренных ранее и имеет возможность работы на низких частотах и при пуске. Его минус – в наличии прямого интегрирования, поскольку на выходе датчиков тока и напряжения в реальности возможно присутствие постоянной составляющей, интегрирование которой приведет к смещению нуля и ошибке в расчетных  $\cos\theta$  и  $\sin\theta$ . При математическом моделировании данная ситуация может быть учтена введением в входные сигналы датчиков постоянной составляющей (**рис. 11**).

На **рис. 12** представлен результат расчета  $\cos\theta$  и  $\sin\theta$ . При этом в  $i_\alpha, i_\beta$  была введена постоянная составляющая напряжения, равная 0,5% от номинального значения. Параметры двигателя  $R_s, L_s$  были приняты равными 80% от номинальных значений.

Использованием более точных датчиков можно добиться неплохих результатов в начале пуска, но это не снимает вопроса применения данного наблюдателя на всем диапазоне работы двигателя. Одним из вариантов улучшения работоспособности наблюдателя по **рис. 11** является закорачивание выхода интегратора на себя. Это позволяет снять влияние постоянной составляющей и обеспечить определение положения ротора двигателя фактически совпадающее с реальным положением двигателя. Расчет положения таким наблюдателем представлен на **рис. 13**.

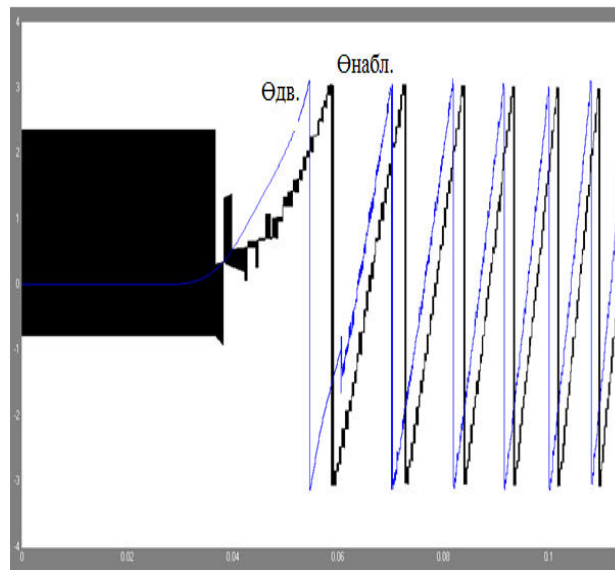


Рис. 8. Действительное ( $\theta_{дв}$ ) и наблюдаемое ( $\theta_{набл}$ ) положение ротора двигателя

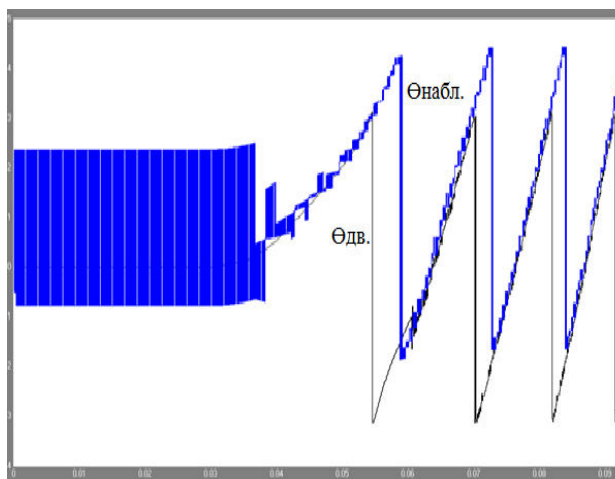


Рис. 9. Определение положения с учетом компенсации Тф

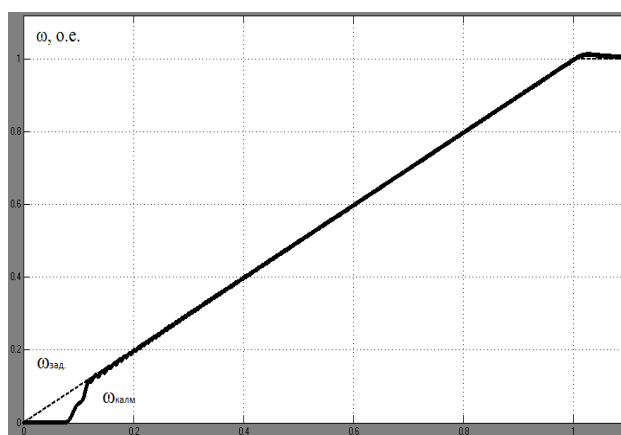


Рис. 10. Сравнение скорости двигателя и скорости, рассчитанной наблюдателем на выходе фильтра Калмана

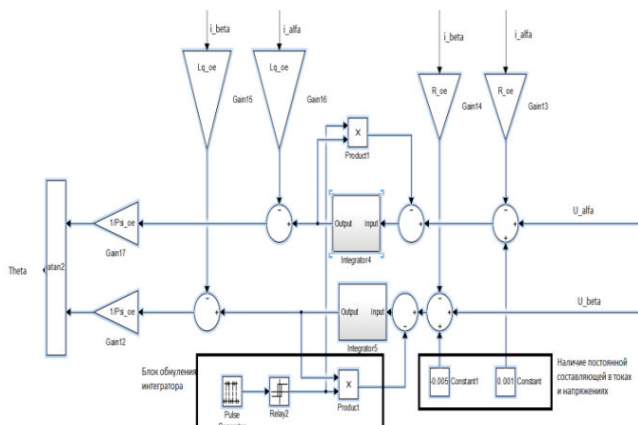


Рис. 11. Модель неустойчивого наблюдателя при наличии в входных сигналах постоянной составляющей

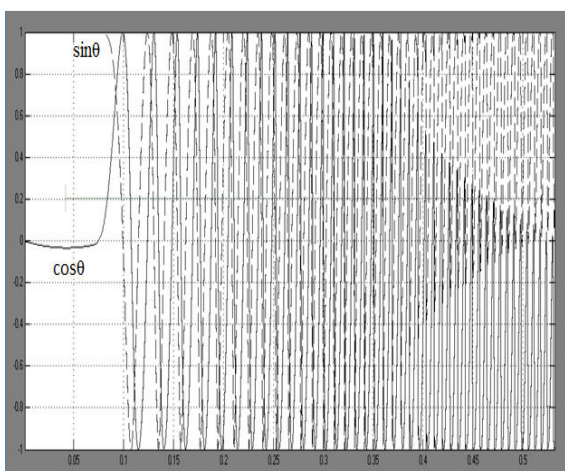


Рис. 12.  $\cos\theta$  и  $\sin\theta$  неустойчивого  $\theta$  наблюдателя для модели по рис. 11

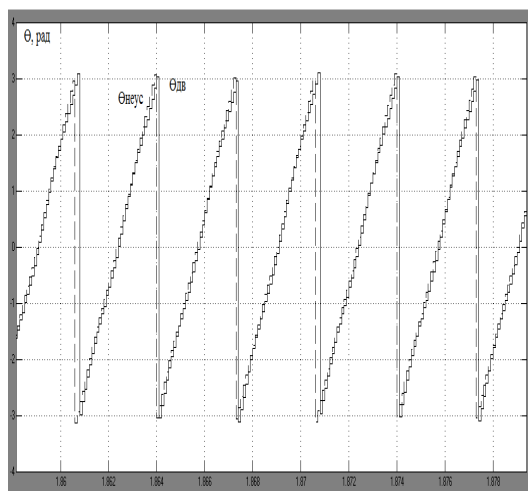


Рис. 13. Положение рассчитанное неустойчивым наблюдателем с закорачивающимся интегратором

Наилучшие результаты работы имеет адаптивный наблюдатель [2], для которого неточность при определении активного сопротивления статорной обмотки не имеет существенного влияния на работу структуры. На рис. 14 для данного наблюдателя показаны токи по фазам, переходной процесс скорости и момента.

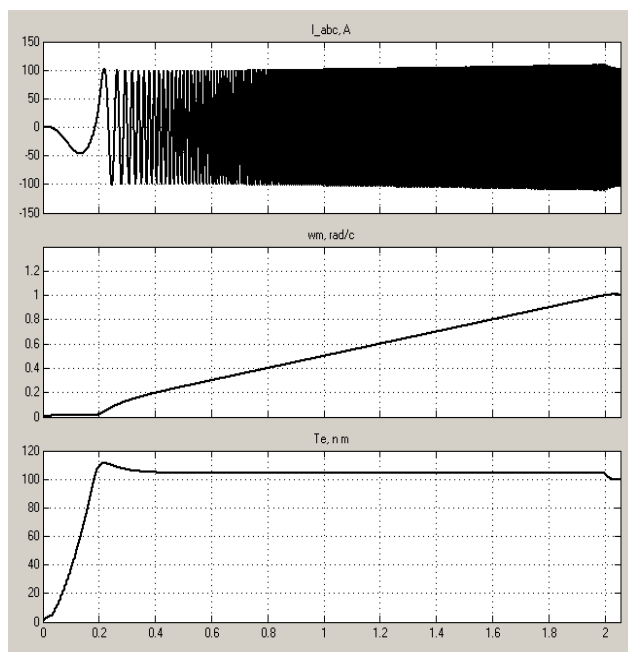


Рис. 14. Осциллограммы тока в фазе, скорости и момента при работе адаптивной модели

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из рассматриваемых наблюдателей технически наиболее прост наблюдатель положения и скорости на основе оценки ЭДС двигателя с обычным инерционным фильтром первого порядка. Он целесообразен для систем управления приводом, где не требуется большой диапазон регулирования и высокая точность поддержания скорости.

Лучшими характеристиками обладает наблюдатель с фильтром Калмана, но он более сложен в настройке и реализации.

Неустойчивый наблюдатель подходит для режима начального пуска привода, но для его работоспособности необходимо иметь достаточно хорошую аппаратную часть и точные параметры двигателя. Его вариант с закорачивающимся интегратором показал при моделировании, что он работоспособен, но требует более тщательной проверки на реальном объекте.

Адаптивный наблюдатель для рассматриваемого электропривода отличается более высокими показателями и может быть рекомендован для его технической реализации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 373 с.
2. Калачев Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе. М., 2015. 60 с.
3. Токарев Б.В. Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1990. 624 с.
4. Балакришнан А.В. Теория фильтрации Калмана. М.: Мир, 1988. 168 с.

Поступила в редакцию 18 июля 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

---

OBSERVERS IN SYSTEMS OF VECTOR CONTROL OF A SYNCHRONOUS VARIABLE FREQUENCY DRIVE SEALED PUMP

Evgeny V. Volodin

Engineer, «VNIIEМ Corporation», Moscow, Russia.

Oleg I. Osipov

D.Sc. (Engineering), Professor, the department of automatic electric drive, Scientific research university “MEI”, Moscow, Russia.

Sealed pumps based on synchronous variable frequency drives, as a rule, do not use speed sensors, or position, that determines the use of different observers, allowing for known control inputs and some directly measurable state variables of the actuator to indirectly determine the necessary coordinates. The aim of this work is to assess the technical possibilities and the indicators used in General systems of vector control of different types of observers. The authors compared the observer position and velocity based on the assessment of EMF motor with a conventional inertial filter of the first order; the observer position and velocity based on the evaluation of the EMF of the motor using a Kalman filter; an intermittent observer status; observer unstable situation zeroed integrator and an adaptive observer. The analysis of observers is made using the example developed in JSC "Corporation "VENIAM" variable frequency drives sealed pump with synchronous motor with permanent magnets. The research shows the limitations of the listed observers and the ad-

vantages of using adaptive observers.

**Keywords:** Leak-proof motor, synchronous motor, frequency Converter, observer, mathematical model, vector control.

REFERENCES

1. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Control System of electric drives]: the textbook for high schools. Moscow: MPEI Publishing house, 2015. 373 p. (In Russian)
2. Kalachev Y.N. *Nablyudateli sostoyaniya v vektornom elektroprivode* [State observers in vector actuator]. Moscow, 2015. 60 p. (In Russian)
3. Tokarev B.V. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 624 p. (In Russian)
4. Balakrishnan A.V. *Teoriya filtratsii Kalmana* [Theory of Kalman filtering]. Moscow: Mir, 1988. 168 p. (In Russian)

---

Володин Е.В., Осипов О.И. Наблюдатели в системах векторного управления синхронным частотно-регулируемым приводом герметичного электронасоса // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 3(36). С. 17–22. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-17-22](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-17-22)

Volodin E.V., Osipov O.I. Observers In Systems Of Vector Control Of A Synchronous Variable Frequency Drive Sealed Pump. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 3(36), pp. 17–22 (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-17-22](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-17-22)

---