

## СКАЛЯРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ КОРОТКОЗАМКНУТЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПО АКТИВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА СТАТОРА

*А.П. Емельянов, Б.А. Чуркин*

Представлен метод регулирования частоты вращения асинхронного короткозамкнутого электродвигателя, базирующегося на скалярных законах управления с обратными связями. Система обратных связей состоит из двух независимых каналов: канала регулирования частоты и канала регулирования напряжения, основанного на регулировании активной составляющей тока статора.

Представленная система управления асинхронным электродвигателем позволяет получить наибольшее быстродействие при скалярном способе управления, сравнимое с классической векторной системой.

*Ключевые слова:* асинхронный двигатель, скалярное управление, частотно-регулируемый электропривод, динамические характеристики, математическое моделирование.

### Введение

Современный частотно-регулируемый электропривод широкого применения состоит из асинхронного короткозамкнутого электродвигателя и статического преобразователя частоты (СПЧ) со звеном постоянного тока. Преобразователь частоты из постоянного напряжения звена постоянного тока формирует напряжение, переменное по частоте и амплитуде. Изменение частоты напряжения и его амплитуды приводит к изменению частоты вращения магнитного поля статора и, как следствие, к изменению скорости вращения вала электродвигателя. В настоящее время известны следующие законы частотного управления асинхронным короткозамкнутым двигателем:

- скалярное управление;
- векторное управление (FOC);
- прямое управление моментом (DTC).

Обычно современные преобразователи частоты дают возможность реализовать несколько законов управления электродвигателем, для этого в них заложено программное переключение известных законов.

Несмотря на успехи в области создания высокودинамичных электроприводов на основе векторного управления (FOC) и DTC, скалярные системы управления не утратили своего значения благодаря простоте реализации и настройки [1, 2]. Скалярные системы управления не требуют определения точных параметров схемы замещения асинхронного двигателя. Схема скалярного управления основана, как правило, на согласованном регулировании частоты и напряжения статора. В качестве входного независимого сигнала принимается задание по частоте. Для поддержания требуемых рабочих характеристик двигателя необходимо с изменением частоты одновременно соответственно изменять и амплитуду напряжения [3].

В скалярной системе управления оптимальным считается закон регулирования, при котором во всем диапазоне регулирования скорости под-

держивается постоянство перегрузочной способности двигателя. При таком регулировании перегрузочная способность, номинальные коэффициент мощности и КПД электродвигателя во всем диапазоне регулирования частоты вращения практически не изменяются. Недостатком данного способа регулирования считается отсутствие возможности точной регулировки частоты вращения вала, так как она зависит от нагрузки. Кроме того, при нагрузках, много меньших, чем номинальные, скалярные системы не позволяют работать электроприводу в наиболее благоприятном режиме, так как напряжение фиксируется на заданном уровне.

Для реализации векторной системы управления или системы управления с DTC необходим либо датчик скорости, встраиваемый в двигатель, либо наблюдатель координат на основе математической модели электродвигателя с использованием точных параметров схемы замещения. Для скалярных систем управления с целью расширения диапазона регулирования тоже применяют датчик скорости.

Ряд фирм выпускают асинхронные электродвигатели специально для работы от преобразователя частоты, в которые встраивают датчик скорости вала двигателя на этапе заводского изготовления. Эти встраиваемые в корпус двигателя датчики частоты вращения (инкрементальные энкодеры) имеют разрешение не менее 1024 метки на оборот. Типовая структурная схема скалярной системы управления [2] частотного регулирования с датчиком скорости представлена на рис. 1.

В целях повышения коэффициента мощности асинхронных двигателей чрезвычайно важно, чтобы двигатель работал всегда, или, по крайней мере, значительную часть времени с нагрузкой, близкой к номинальной. Это можно обеспечить лишь при правильном выборе мощности двигателя. Если же двигатель работает значительную часть времени недогруженным, то для улучшения энергетических показателей целесообразно регу-

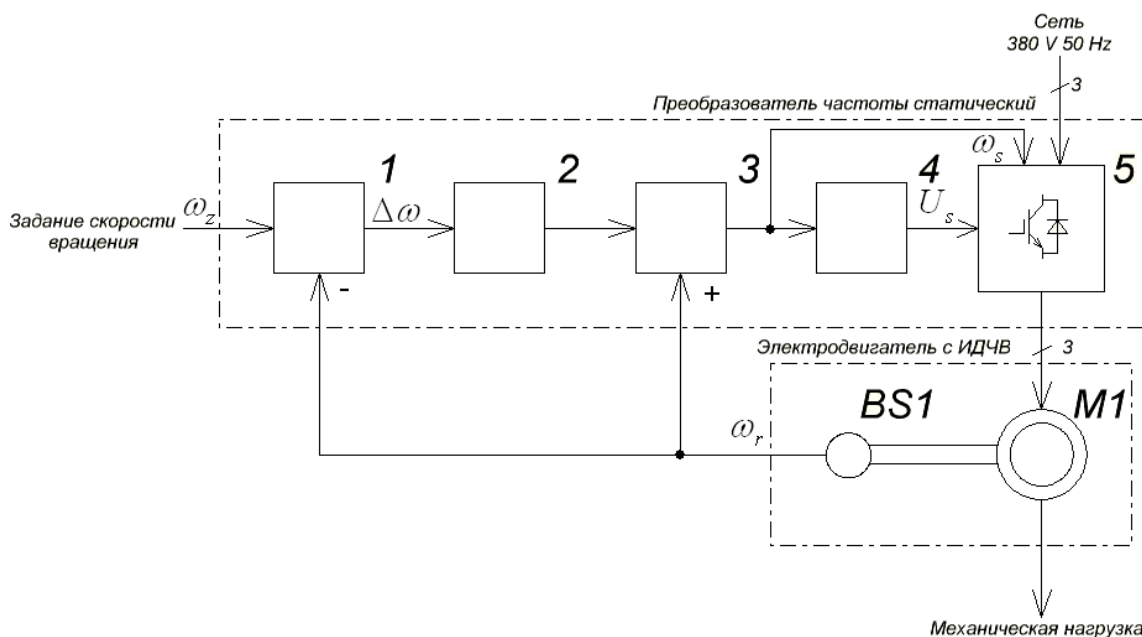


Рис. 1. Схема структурная скалярной системы управления с датчиком скорости: 1 – блок сравнения; 2 – блок регулятора; 3 – блок сумматора; 4 – блок функционального преобразователя; 5 – ШИМ-инвертор на полностью управляемых вентилях; BS1 – инкрементный датчик частоты вращения (ИДЧВ) и угла поворота; M1 – асинхронный электродвигатель

лизовать подводимое к двигателю напряжение в функции нагрузки. Скалярное управление асинхронным двигателем с датчиком скорости, как следует из рис. 1, довольно просто реализуется, но при достаточно низких частотах может произойти значительное снижение момента на валу двигателя. Основным недостатком такого управления является отсутствие возможности регулировать момент на валу двигателя в функции нагрузки. Кроме того, известные системы скалярного управления асинхронным двигателем характеризуются тем, что в них затруднительно осуществить независимое регулирование скорости и момента.

Ряд механизмов работает в условиях резкопеременных нагрузок. Для таких приводов зачастую выдвигаются дополнительные требования, такие как точная отработка скорости с компенсацией скольжения, поддержание заданной величины момента при малых частотах вплоть до нескольких Гц. Кроме того, с целью экономии электроэнергии необходимо регулировать амплитуду напряжения на статоре электродвигателя при малых нагрузках.

## Описание

Для осуществления независимого регулирования момента и скорости в скалярной системе управления надо иметь два канала управления – частотой и амплитудой напряжения.

Канал регулирования частоты включает в себя внешний задатчик интенсивности, датчик скорости и регулятор скорости. Выходом регулятора скорости является задание по моменту двигателя. В асинхронном двигателе увеличение электромаг-

нитного момента сопровождается увеличением скольжения. На линейном участке механической характеристики момент пропорционален скольжению, поэтому для компенсации скольжения необходимо к заданной частоте прибавить вычисленную частоту скольжения.

Канал регулирования амплитуды напряжения опирается на измерение активной составляющей тока статора. Как видно из схемы замещения фазы статора двигателя (рис. 2), момент двигателя в основном создается активной составляющей тока статора. Регулируя активную составляющую тока статора, мы можем повысить перегрузочную способность электродвигателя во всем диапазоне рабочих частот электропривода.

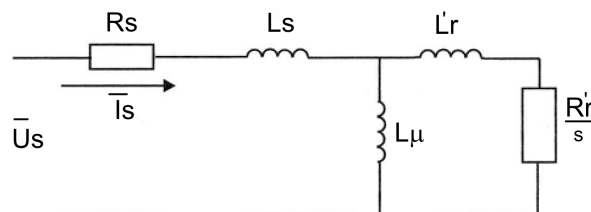


Рис. 2. Схема замещения фазы статора асинхронного электродвигателя

Известно, что каждой нагрузке соответствует определенное напряжение, при котором КПД может оставаться на номинальном уровне. Для управления с минимальными потерями при любой частоте статора необходимо изменять напряжение в соответствии с моментом нагрузки так, чтобы скольжение имело критическое значение [3]. Известна формула для момента двигателя [4]:

$$M_3 = \frac{mpU_s^2 \frac{R'_r}{s}}{\omega_s \left[ \left( R_s + \frac{R'_r}{s} \right)^2 + (x_s + x'_r)^2 \right]}, \quad (1)$$

где  $\omega_s$  – круговая частота;  $p$  – число пар полюсов;  $R_s, R'_r, x_s, x'_r$  – параметры схемы замещения;  $s$  – скольжение.

Из условия равенства мощностей следует:

$$M_3 \omega_r = 3U_s I_s \cos \varphi \cdot \eta, \quad (2)$$

где  $M_3$  – электромагнитный момент двигателя;  $\omega_r$  – скорость вала двигателя;  $U_s, I_s$  – напряжение и ток фазы статора;  $\cos \varphi, \eta$  – коэффициент мощности и КПД. Активная часть тока определяется как

$$I_{акт} = I_{sm} \cos \varphi; \quad I_{sm} = I_s \sqrt{2}. \quad (3)$$

Подставив (2) и (3) в (1), получим:

$$\frac{mpU_s^2 \frac{R'_r}{s} \omega_r \sqrt{2}}{\omega_s \left[ \left( R_s + \frac{R'_r}{s} \right)^2 + (x_s + x'_r)^2 \right]} = 3U_s I_{акт} \eta. \quad (4)$$

Учитывая, что  $\frac{p\omega_r}{\omega_s} \approx 1$ , выражение (4) можно переписать:

$$U_s = \frac{I_{акт} \eta \left[ \left( R_s + \frac{R'_r}{s} \right)^2 + (x_s + x'_r)^2 \right]}{\sqrt{2} \frac{R'_r}{s}}. \quad (5)$$

Известно выражение для критического скольжения [3]:

$$s_k = \frac{R'_r}{\sqrt{R_s^2 + (\omega_s L_k)^2}}, \quad (6)$$

где  $L_k = L_s + L'_r$ .

Подставив (6) в (5) и, пренебрегая малым значением  $R_s$ , получим:

$$U_s = \frac{I_{акт} \eta \left[ (\omega_s L_k)^2 + (\omega_s L_k)^2 \right]}{\sqrt{2} \omega_s L_k}, \quad (7)$$

или

$$U_s = K I_{акт} \omega_s, \quad (8)$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности.

Выражение (8) служит основой для организации эффективного управления напряжением в скалярной системе управления. Активный ток вычисляется на основании информации об угловом положении вектора напряжения и измеренных фазных токах статора.

Вычисление активной составляющей тока статора осуществляется по формуле:

$$I_{акт} = I_{s\alpha} \cos \gamma + I_{s\beta} \sin \gamma, \quad (9)$$

где  $\gamma$  – угловое положение обобщающего вектора напряжения, формируемого системой управления;  $I_{s\alpha}, I_{s\beta}$  – проекции обобщающего вектора тока статора в неподвижной системе координат.

Схема канала управления напряжением на основании (8) и (9) представлена на рис. 3.

### Результаты исследований

Рассмотренная выше скалярная система управления исследовалась на математической модели в среде MATLAB/Simulink. В схеме модели использовался асинхронный электродвигатель 4A250S4У3 с параметрами, представленными в таблице.

Полная схема модели для исследования предложенной скалярной системы представлена на рис. 4.

На модели исследовались режимы пуска с номинальным моментом, наброс и сброс нагрузки. На рис. 5 представлены графики переходных процессов в электроприводе в режиме пуска с номинальным моментом до частоты 40 Гц. На графиках сверху вниз представлены: ток одной фазы статора,

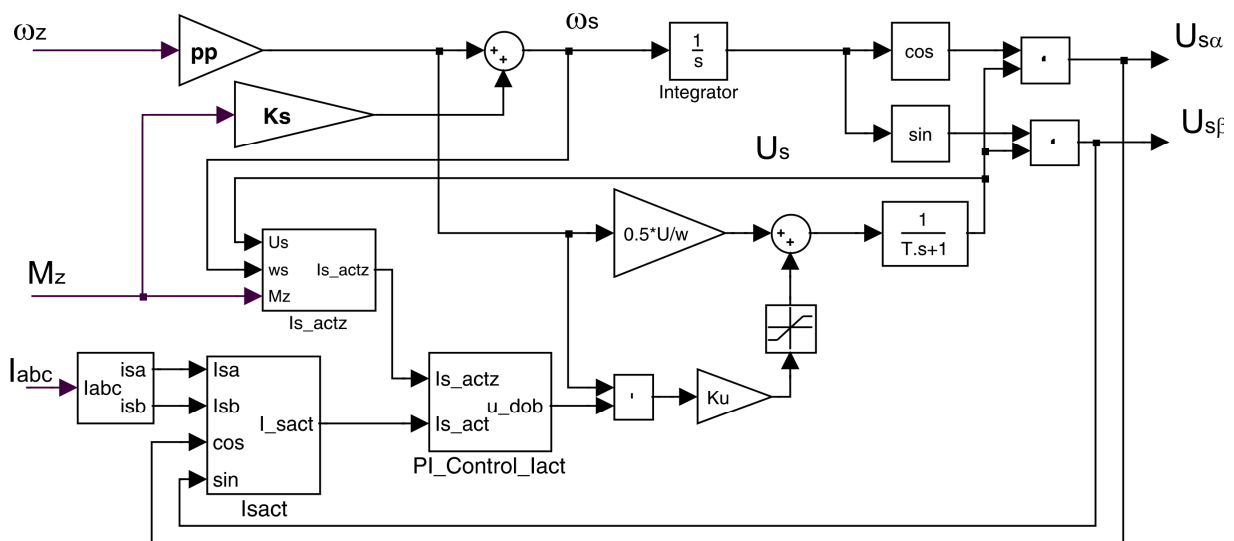


Рис. 3. Канал управления напряжением



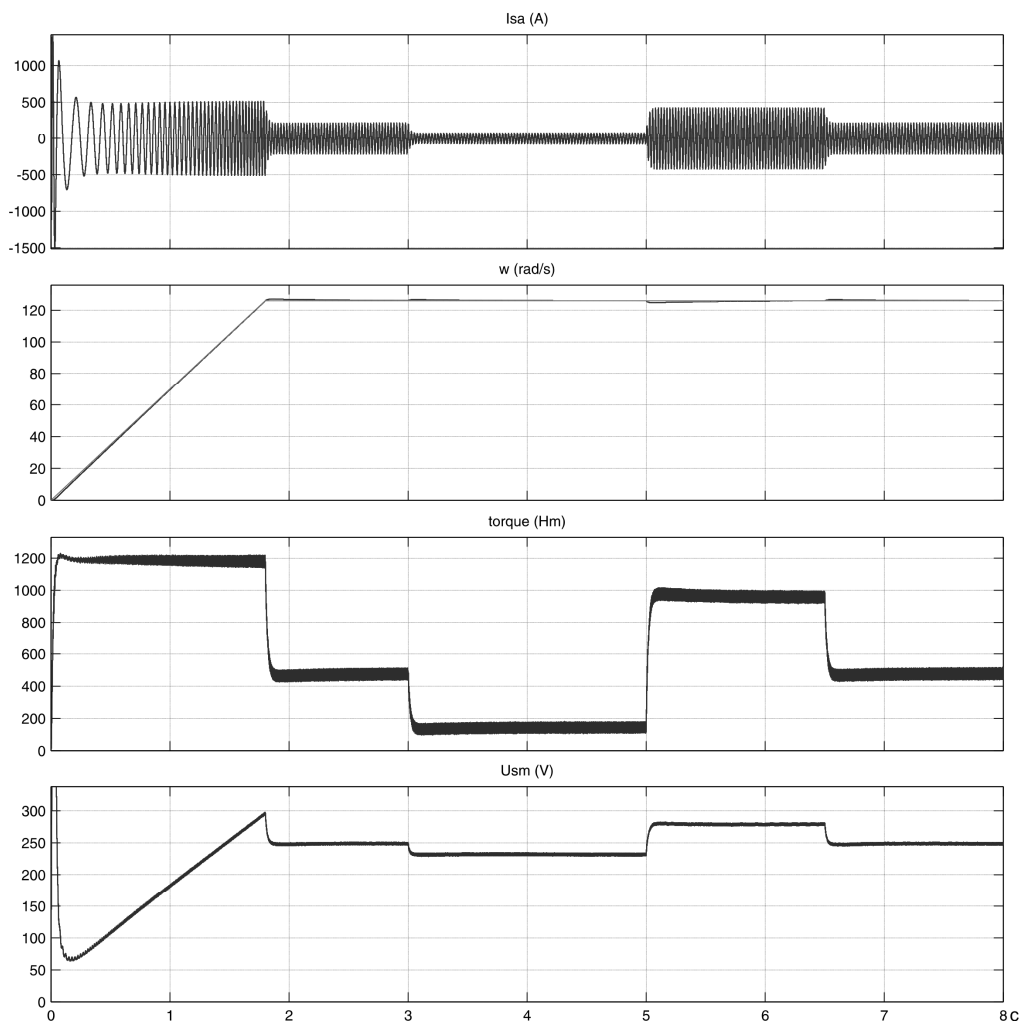


Рис. 6. Пуск электропривода с классической векторной системой управления до частоты 40 Гц

скорость заданная и измеренная, момент двигателя и амплитудное значение напряжения фазы двигателя. Пуск осуществлялся за время 1,8 с, через 3 с производился сброс нагрузки до значения  $0,3M_n$ , через 5 с нагрузка увеличивалась до значения  $2M_n$ , через 6 с нагрузка возвращалась к номинальному значению.

Надо отметить, что при частоте тока статора 50 Гц и при нагрузке, равной  $M_n$ , устанавливается максимальное напряжение статора.

Для сравнения переходных процессов предложенной скалярной системы управления (см. рис. 5) с векторной системой управления было выполнено исследование классической векторной системы управления с четырьмя ПИ-регуляторами, с ориентированием по полю ротора, при тех же условиях пуска и нагрузки с таким же электродвигателем. Результаты моделирования приведены на рис. 6.

По сравнению с предложенной скалярной системой (см. рис. 5) переходные процессы в векторной системе управления (см. рис. 6) протекают плавно без перегуливания, хотя по быстродействию и перегрузочной способности они практически одинаковы.

### Заключение

Предложенный скалярный метод регулирования частоты вращения асинхронным двигателем с датчиком скорости позволяет снизить рабочую частоту электропривода до 2 Гц и обеспечить наилучшие показатели системы «электродвигатель – статический преобразователь частоты» во всем частотном диапазоне. Перегрузочная способность электропривода сохраняется во всем диапазоне частот, в том числе и в момент пуска двигателя. Для реализации системы управления не надо знать параметры схемы замещения и тем более их корректировать в процессе работы. По быстродействию предложенная система управления приближается к векторной системе управления, при этом она нечувствительна к температурным изменениям параметров электродвигателя. Данная скалярная система управления может быть применена в горной промышленности для электропривода транспортеров, комбайнов, подъемных механизмов и др., а также в качестве гребного электропривода.

### Литература

1. Булгаков, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / А.А. Булгаков. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с.
2. Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – М.: Энергия, 1978. – 832 с.
3. Костенко, М.П. Работа многофазного асинхронного двигателя при переменном числе периодов / М.П. Костенко // *Электричество*. – 1925. – № 2. – С. 87.
4. Holtz, J. Sensorless Control of Induction Motor Drives / J. Holtz // *Proceedings of the IEEE*. – Aug. 2002. – Vol. 90, no. 8. – P. 1359–1394.
5. Ben Hamed M. A Digital Phase Locked Loop Speed Control of Three Phase Induction Motor Drive: Performances Analysis, *International Journal of Energy and Power Engineering* / M. Ben Hamed, L. Sbita // *EPE Journal*. – Brussel, 2011. – № 3. – P. 61–68.

**Емельянов Александр Петрович**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника, электроэнергетика, электромеханика», Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург; ale88706284@yandex.ru.

**Чуркин Борис Анатольевич**, аспирант кафедры «Электротехника, электроэнергетика, электромеханика», Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург; boris-churkin@mail.ru.

Поступила в редакцию 23 июля 2014 г.

---

**Bulletin of the South Ural State University**  
**Series “Power Engineering”**  
**2014, vol. 14, no. 3, pp. 85–90**

---

## SCALAR CONTROL OF SQUIRREL-CAGE INDUCTION MOTOR WITH STATOR ACTIVE CURRENT

**A.P. Emelianov**, National Mineral Resources University (University of Mines), Saint-Petersburg, Russian Federation, ale88706284@yandex.ru,

**B.A. Churkin**, National Mineral Resources University (University of Mines), Saint-Petersburg, Russian Federation, boris-churkin@mail.ru

The paper presents regulation technique for squirrel-cage induction motor speed; the technique is based on scalar feedback control principles. Feedback system consists of two independent paths: frequency regulation path and voltage regulation path based on stator active current regulation.

Presented induction motor control system allows of achieving maximum operation speed at scalar control comparable to traditional vector system.

*Keywords:* induction motor, scalar control, variable-frequency electric drive, dynamical characteristics, mathematical modeling.

### References

1. Bulgakov A.A. *Chastotnoye upravlenie asinkhronnymi dvigatelyam* [Frequency Induction Motor Control]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 216 p.
2. Vol'dek A.I. *Elektricheskie mashiny* [Electrical Machines]. Moscow, Energiya Publ., 1978. 832p.
3. Kostenko M.P. [Job Multiphase Induction Motor with a Variable Number of Periods]. *Electrical Technology Russia*, 1925, no. 2, pp. 87.
4. Holtz J. Sensorless Control of Induction Motor Drives. *Proceedings of the IEEE*, Aug. 2002, vol. 90, no. 8, pp. 1359–1394.
5. Ben Hamed M., Sbita L. A Digital Phase Locked Loop Speed Control of Three Phase Induction Motor Drive: Performances Analysis, *International Journal of Energy and Power Engineering. EPE Journal*. Brussel, 2011, no. 3, pp. 61–68.

Received 23 July 2014