

УДК 621.3.016

Алгоритмы и технические средства управления автоматизированным электроприводом турбомеханизмов

А.П. Емельянов, Б.Ю. Васильев
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: ale88706284@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время одним из наиболее актуальных вопросов в области электротехники и электромеханики является разработка энергоэффективных электроприводов переменного тока. Это связано с тем, что электроприводы переменного тока являются основными потребителями электроэнергии. Их доля в структуре энергопотребления составляет около 60 %. Таким образом, энергосбережение в электроприводе имеет самый большой потенциал снижения. Обеспечение энергосбережения в асинхронном электроприводе достигается как за счет применения специальных энергосберегающих электродвигателей, так и за счет применения новых технических средств в структуре электропривода и новых алгоритмов управления.

Материалы и методы: Для исследования использовались методы теории автоматического управления, теории электропривода, методы математического и имитационного компьютерного моделирования.

Результаты: Предложен энергосберегающий алгоритм управления переменной структуры на основе классического скалярного управления. Обоснована и исследована его эффективность в части энергосбережения. Установлено, что применение новых технических решений и алгоритмов управления позволит уменьшить потребление электроэнергии и удешевить процесс модернизации электропривода на основе имеющегося асинхронного двигателя.

Выводы: Система управления (микропроцессорная и силовая части, алгоритмическое обеспечение), разработанная на основе самых современных технических средств, позволяет реализовать ее с наименьшими стоимостными затратами. Использовать разработанный электропривод рекомендуется в электроприводах турбомеханизмов различной мощности для достижения наибольшей энергоэффективности и энергосбережения.

Ключевые слова: электропривод, турбомеханизм, алгоритм управления, энергосбережение.

Algorithms and Technical Control Means of Automatic Electric Drive of Turbomachines

A.P. Emelyanov, B.Yu. Vasilyev
National Mineral Resources University, St. Petersburg, Russian Federation
E-mail: ale88706284@yandex.ru

Abstract

Background: Nowadays, one of the most important issues in the field of electrical engineering and electromechanics is the development of energy-efficient AC drives. This is due to the fact that the AC drives are the major consumers of electricity. Its share in the energy consumption is about 60%. Thus, energy efficiency in the electric drive has the greatest potential to reduce. Support of energy saving in an asynchronous electric drive is achieved through the usage of special energy-saving motors, as well as through the use of new technologies in the structure of motor and new control algorithms. The application of new technical solutions and control algorithms will reduce energy consumption and the cost of the upgrade process from on base of electric induction motor.

Materials and methods: The methods of automatical control theory, the theory of the the electric drives, the methods of mathematical and computer simulation are used in the research.

Results: The proposed energy-saving variable structure control algorithm is based on the classical scalar control. Its efficiency in terms of energy saving is investigated. It is proved that the application of new technical solutions and control algorithms can allow reducing the energy consumption and costs of modernization process of electric drive on the basis of the asynchronous motor.

Conclusions: Control system (microprocessor and power section, algorithmic support), presented in the article, was developed on the basis of the advanced technical equipment and offers to implement it at the lowest costs. It is recommended to use the designed electric drive in electrical drives for turbomachines with different capacity to achieve the best energy efficiency and energy conservation.

Key words: electric drive, turbomachine, algorithm of control, energy saving.

Введение. В качестве приводов турбомеханизмов, например компрессоров и др., в настоящее время все больше используются частотно-регулируемые асинхронные приводы. Снабжение электроэнергией и управление координатами такого электропривода осуществ-

ляется с помощью полупроводникового преобразователя.

Энергосбережение в электроприводе турбомеханизмов с асинхронными двигателями достигается как за счет применения специальных энергосберегающих электродвигателей, так и за счет применения новых технических

средств в структуре электропривода и новых алгоритмов управления. Применение новых энергосберегающих двигателей в регулируемом электроприводе не всегда может дать ожидаемый эффект. Стоимость двигателей с повышенным КПД на 15–30 % выше, чем обычных серийно выпускаемых. Применение новых технических решений и новых алгоритмов управления позволит уменьшить потребление электроэнергии и удешевить процесс модернизации электропривода на основе имеющегося асинхронного двигателя [1, 2].

Функциональная схема и особенности управления электроприводом турбомеханизмов. Использование электроприводов в технологических установках большой мощности особенно актуально в виду большого потенциала энергосбережения. Отказ от дроссельного регулирования, как показала практика, позволяет экономить от 20 до 30 % электроэнергии при регулировании скорости турбомеханизмов оператором или по графикам нагрузки. Еще больший эффект от внедрения регулируемого электропривода (по данным фирмы Данфосс экономия электроэнергии до 50 %) можно получить, если автоматически регулировать скорость турбомеханизмов в зависимости от технологических параметров (давления, расхода и т. д.).

Основной причиной использования регулируемого электропривода является переменный режим работы технологической установки. Так, например, применение электропривода турбокомпрессоров газоперекачивающих агрегатов на магистральных газопроводах характеризуется годовым и сезонным изменением газоподдачи и газопотребления, т.е. необходимо обеспечивать регулирование производительности агрегатов. Наиболее эффективно и экономично это можно реализовать с помощью регулируемых приводных электродвигателей переменного тока. Регулирование частоты вращения путем изменения частоты питающего напряжения по заданному алгоритму обеспечивает оптимальное изменение координат электропривода как при пуске и торможении, так и в установившемся режиме работы агрегата на номинальной и отличной от нее скорости.

На рис. 1 приведена схема системы управления электроприводом турбомеханизма.

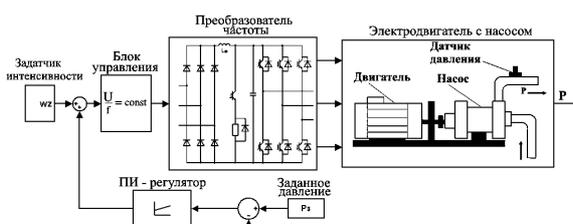


Рис. 1. Схема системы управления электроприводом турбомеханизма

В большинстве случаев применения частотно-регулируемого электропривода для турбомеханизмов используется скалярное управ-

ление. При скалярном управлении для поддержания требуемых рабочих характеристик двигателя необходимо одновременно с изменением частоты соответственно изменять и амплитуду напряжения. Управление напряжением двигателя при существенном изменении нагрузки позволяет дополнительно сэкономить до 30 % потребляемой электроэнергии за счет снижения потерь в двигателе. Режим энергосбережения особенно актуален для механизмов, которые часть времени работают с пониженной нагрузкой, как, например, в случае электроприводов газоперекачивающих агрегатов при постепенном вводе объектов газодобычи или потребителей. В большинстве случаев асинхронные двигатели в приводе турбомеханизмов выбираются с существенным запасом по мощности, как правило, на 20–30 % выше номинальной мощности самого турбомеханизма.

Алгоритм управления и структура энергосберегающей системы управления электроприводом. Одной из главных задач эффективного управления электроприводом, наряду с обеспечением высокого качества и точности управления его координатами, является поддержание высокого уровня энергетических характеристик, КПД и коэффициента мощности. На рис. 2 представлен график зависимости коэффициента мощности асинхронного двигателя от нагрузки.

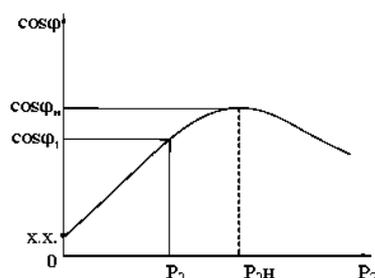


Рис. 2. График зависимости коэффициента мощности асинхронного двигателя от нагрузки

Анализ графика (рис. 2) показывает, что $\cos \varphi$ уменьшается при уменьшении нагрузки, при этом уменьшается также КПД. Каждой нагрузке соответствует оптимальное напряжение, при котором КПД и $\cos \varphi$ могут 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 номинальное значение [3]. Из условия равенства мощностей следует

$$M_3 \omega_r = 3U_s I_s \cos \varphi \cdot \eta, \quad (1)$$

где M_3 – электромагнитный момент двигателя; ω_r – скорость вала двигателя; U_s , I_s – напряжение и ток фазы статора; $\cos \varphi$, η – коэффициент мощности и КПД.

Активная часть тока определяется как

$$I_{акм} = I_{sm} \cos \varphi, \quad I_{sm} = I_s \sqrt{2}. \quad (2)$$

Значение электромагнитного момента трехфазного асинхронного двигателя определяется по формуле [4]

$$M_3 = \frac{3pU_s^2 \frac{R_r'}{s}}{\omega_s \left[\left(R_s + \frac{R_r'}{s} \right)^2 + (x_s + x_r')^2 \right]}, \quad (3)$$

где ω_s – круговая частота; p – число пар полюсов; R_s, R_r', x_s, x_r' – параметры схемы замещения; s – скольжение.

Подставим в (1) выражения (3) и (2), получим

$$\frac{3pU_s^2 \frac{R_r'}{s} \omega_r \sqrt{2}}{\omega_s \left[\left(R_s + \frac{R_r'}{s} \right)^2 + (x_s + x_r')^2 \right]} = 3U_s I_{акм} \eta. \quad (4)$$

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

можно переписать:

$$U_s = \frac{I_{акм} \eta \left[\left(R_s + \frac{R_r'}{s} \right)^2 + (x_s + x_r')^2 \right]}{\sqrt{2} \frac{R_r'}{s}}. \quad (5)$$

Известно выражение для критического скольжения [4]:

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

где $L_k = L_s + L_r'$.

Подставим (6) в (5) и, пренебрегая малым значением R_s , получим [2]

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

или

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

где K – коэффициент пропорциональности.

Выражение (8) служит основой для организации оптимального управления напряжением в скалярной системе управления, при этом на низких частотах следует учитывать влияние активного сопротивления статора. Такое управление (на основе выражения (8)) организовано с помощью блока оптимального регулятора. Функциональная схема электропривода представлена на рис. 3.

Активный ток вычисляется на основании информации об угловом положении вектора напряжения и измеренных фазных токах статора в блоке «Вычислитель активного тока статора». Угловое положение вектора напряжения задается системой управления электроприводом с помощью блока «Вычислитель проекций вектора напряжений».

Пуск и останов электродвигателя осуществляется по скалярному алгоритму управления с помощью блока «U/f». При разгоне электродвигателя увеличиваются нагрузка электродвигателя и активный ток статора. При достижении определенного значения система управления с помощью блока переключений переходит в режим энергосбережения. В этом режиме уровень напряжения формируется с помощью блока оптимального регулятора на основе выражения (8).

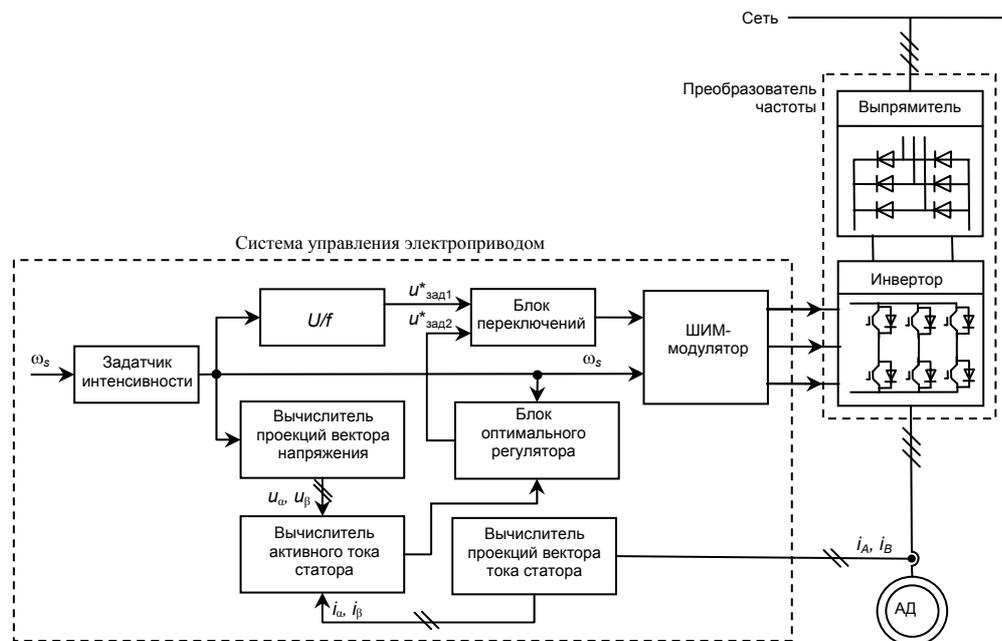


Рис. 3. Функциональная схема электропривода

Техническая реализация энергосберегающей системы управления. В качестве силового модуля преобразователя частоты используется блок MINI SKIIP. В блоке установлены трехфазный неуправляемый выпрямитель, тормозной блок (чофер) и трехфазный инвертор, построенный на IGBT ключах. В качестве звена постоянного тока используются четыре конденсатора общей емкостью 1,880 мF. Транзисторные ключи инвертора имеют напряжение коллектор-эмиттер при замкнутом затворе с эмиттером 1200 В, ток коллектора 66 А. Обратные диоды в инверторе имеют прямой ток 66 А (при температуре 25°C), максимальный повторяющийся прямой ток 120 А. Аналогичные полупроводниковые ключи установлены в тормозном блоке.

Система управления (рис. 4) была реализована с использованием встраиваемого модуля, разработанного на базе 32-разрядного сигнального микроконтроллера TMS320F28335 Delfino™ фирмы Texas Instruments. Модуль включает микроконтроллер TMS320F28335, мост USB-UART. Модуль имеет интерфейсы RS-485 и CAN, внешнюю SPI флэш-память, отладочный разъем JTAG.

Отличительными особенностями микроконтроллера TMS320F28335 являются: ядро C28x+FPU с тактовой частотой 150 МГц и сопроцессором арифметики с плавающей точкой, 512 Кбайт флэш-памяти для программ, 68 Кбайт RAM-памяти, 12-разрядный АЦП (16 каналов), 3x UART, SPI, I2C, 2x CAN, блока ШИМ.

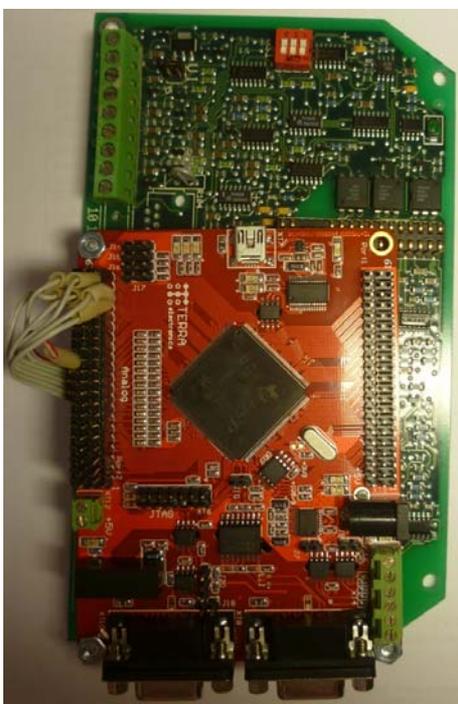


Рис. 4. Микропроцессорная система управления электроприводом

Отличительные особенности модуля: микроконтроллер TMS320F28335 (LQFP-176);

SPI флэш-память AT45DB161D (16 Мбит); разъем miniUSB и мост USB-UART на микросхеме FTDI232RL (развязка на ISO7221); разъем DRB9FA и интерфейс RS-485 (развязка на ISO15); разъем DRB9FA и интерфейс CAN (развязка на ISO7221); разъем JTAG (2x7 выводов) для загрузки и отладки программ; разъем и стабилизатор питания +5 В.

Результаты исследования. На рис. 5 приведены графики переходных процессов в приводе со скалярным управлением при включении режима энергосбережения. Привод разгоняется за полторы секунды по закону $U/f = \text{const}$, через одну секунду нагрузка увеличивается до номинального значения. Через 2 с включается режим энергосбережения. Через 3 с момент скачком падает до значения $M = 0,1 M_n$, через 5,5 с момент скачком возрастает до номинального значения. Двигатель 4A250S4Y3 мощностью 75 кВт имеет следующие номинальные параметры: $s_n = 0,012$; $\eta_n = 0,93$; $\cos \varphi_n = 0,9$.

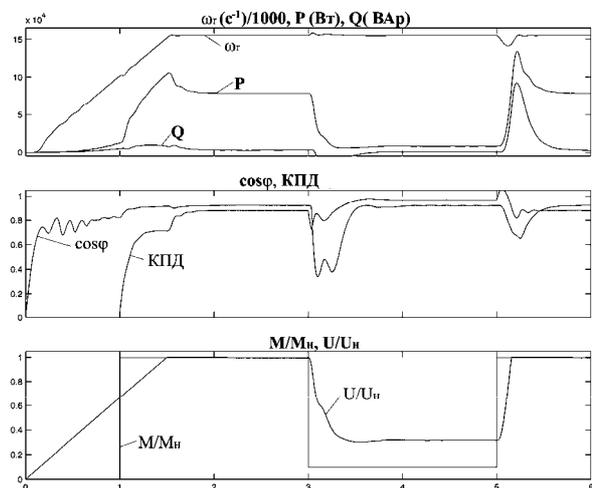


Рис. 5. Скалярная система управления с режимом энергосбережения

Без режима энергосбережения (при моменте $M = 0,1 M_n$): активная мощность, потребляемая двигателем, $P = 11,5$ кВт; реактивная мощность $Q = 12,2$ кВАр; полная мощность $S = 16,8$ кВА; $\eta = 0,46$; $\cos \varphi = 0,4$.

При включении режима энергосбережения (при моменте $M = 0,1 M_n$): активная мощность, потребляемая двигателем, $P = 7,9$ кВт; реактивная мощность $Q = 0,3$ кВАр; полная мощность $S = 7,9$ кВА; $\eta = 0,94$; $\cos \varphi = 0,92$.

Таким образом, в режиме энергосбережения экономия электроэнергии по полной мощности составляет 47 %. Полученный алгоритм управления напряжением обеспечивает поддержание электродвигателя в режиме номинального КПД.

Заключение

Применение энергосберегающих алгоритмов управления позволит уменьшить по-

требление электроэнергии и удешевить процесс модернизации электропривода на базе имеющегося асинхронного двигателя.

Регулирование скорости в электроприводе турбомеханизмов в зависимости от технологических параметров позволяет получить экономично электроэнергию до 50 %.

Оптимальные алгоритмы управления напряжением в скалярной системе управления электроприводом позволяют экономить электроэнергию при значительных снижениях нагрузки электродвигателя.

Данные исследования производятся в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 по теме «Энергоэффективность и энергосбережение объектов магистрального газопровода».

Список литературы

1. Емельянов А.П. Энергосберегающие алгоритмы управления электроприводом // Электроприводы перемен-

ного тока: тр. XV Междунар. конф. – Екатеринбург, 2012. – С. 201–205.

2. Козярук А.Е., Васильев Б.Ю. Повышение энергоэффективности электропривода переменного тока // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – № 11. – С. 16–21.

3. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с.

4. Вольдек А.И. Электрические машины. – М.: Энергия, 1978. – 832 с.

References

1. Emel'yanov, A.P. Energosberegayushchie algoritmy upravleniya elektroprivodom [Energy Saving Control Algorithms of Electric Drives]. *Trudy mezhdunarodnoy XV konferentsii «Elektroprivody peremennogo toka»* [Works of the XVth International Conference «Electric Drives of Alternating Current»]. Ekaterinburg, 2012, pp. 201–205.

2. Kozyaruk, A.E., Vasil'ev, B.Yu. Povyshenie energoefektivnosti elektroprivoda peremennogo toka [Increasing Energy Efficiency of Electric Drives of Alternating Current]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2011, № 11, pp. 16–21.

3. Bulgakov, A.A. *Chastotnoye upravlenie asinkhronnymi dvigatelyami* [Frequency Steering of Asynchronous Motors]. Moscow, Energoizdat, 1982. 216 p.

4. Vol'dek, A.I. *Elektricheskie mashiny* [Electric Machines]. Moscow, Energiya, 1978. 832 p.

Емельянов Александр Петрович,
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,
кандидат технических наук, доцент кафедры ЭЭЭ,
адрес: Россия, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., д. 2,
e-mail: ale88706284@yandex.ru

Васильев Богдан Юрьевич,
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,
аспирант кафедры ЭЭЭ,
адрес: Россия, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2,
e-mail: vasilev.bu@mail.ru