

M. P. Belov, D. D. Truong, N. V. Lanh
Saint Petersburg Electrotechnical University

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL AND CONTROL BY THE METHOD OF SEPARATION OF THE CONTROL LAW FOR THE EXOSKELETON

Explores the possibility of using a nonlinear controller based on the separated control of an exoskeleton electric drive, which allows to exclude all nonlinear components and cross-connections. One of the significant difficult problems in control algorithms is the design of linear controllers for nonlinear systems. The exoskeleton is a powerful nonlinear control object with many uncertain parameters, so the application of traditional control methods is extremely difficult. To reduce these difficult problems, a nonlinear controller is built on the basis of the method of separated control. However, the application of this method requires the construction of an accurate kinematic model of the object to provide the necessary torque. The process of constructing a model of motion dynamics is considered using the example of a two-joint module of the lower extremity exoskeleton with disturbances. An exoskeleton regulator has been built with high accuracy and energy saving, in accordance with management requirements. The exoskeleton regulator was simulated in Matlab & Simulink.

Exoskeleton, motion dynamics, mathematical model, electric drive, mechatronic system, structural exoskeleton, exoskeleton control, separation of the control law

УДК 681.3:62-52

Н. И. Татаринцев, Д. С. Карасев
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Применение энергосберегающего режима в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе

Рассматриваются пути снижения энергопотребления электроприводов промышленных агрегатов, в частности асинхронных частотно-регулируемых электроприводов. Проведена оценка экономического потенциала энергосбережения в рассматриваемых приводах. Показана необходимость снижения энергопотребления в рассматриваемых агрегатах. Подробно излагается возможный метод реализации энергосберегающего режима работы при скалярном управлении с пропорциональным законом регулирования. Производится анализ применения принципов скалярного управления, а также представленного метода снижения энергопотребления в промышленных преобразователях частоты. Представлена временная диаграмма работы электропривода при переходе в энергосберегающий режим и выходе из него, демонстрирующая влияние параметров энергосбережения на работу привода в представленном экономном режиме. Выявлен недостаток рассмотренного энергосберегающего режима и возможные последствия его использования.

Частотно-регулируемый асинхронный электропривод, энергосберегающий электропривод, скалярное управление, функция энергосбережения в преобразователе частоты

На сегодняшний день в развитых странах основными потребителями всей вырабатываемой электроэнергии являются электроприводы. При огромном расходе электричества, темпы которого постоянно возрастают ввиду роста производственной и иной деятельности человека, становится актуальной задача минимизации их энергопотребления. Энергосбережение представляет собой в первую очередь снижение бесполезных потерь энергии. Применение энергосберегающих

методов в рабочих циклах приводов не только способствует эффективному использованию энергетических ресурсов страны и их значительной экономии, но и является одним из возможных направлений решения экологических проблем, связанных с производством электроэнергии.

Объектом рассмотрения служит достаточно распространенный частотно-регулируемый асинхронный электропривод с U/f -управлением.

Применяемые промышленные агрегаты. Прежде чем перейти к рассмотрению предложенного метода энергосбережения, важно оценить его экономический потенциал в используемых электроприводах.

Исключая маломощные (в бытовых приборах), электроприводы могут использоваться:

1. В агрегатах, обслуживающих технологические процессы, которые не осуществимы без точного управления технологическими координатами, – металлообрабатывающих станках, прокатных станах, бумагоделательных машинах, роботах и др.

2. В простых агрегатах – транспортерах, конвейерах, вентиляторах, насосах и пр.

Первую группу составляют не более 10 % электроприводов [1], при этом в данной группе, как правило, уже осуществлены современные технически эффективные решения. Во вторую группу входят около 90 % электроприводов [1], и в ней содержится огромный резерв энергосбережения, поскольку в таких агрегатах обычно стоят простые, зачастую нерегулируемые электроприводы. При этом технологические процессы, обслуживаемые этими приводами, нуждаются в управлении технологическими координатами, например скоростью, расходом, давлением, температурой и др. Управление этими координатами зачастую происходит энергетически неэффективно, что приводит к большим потерям. Стоит, однако, отметить, что в настоящее время в связи с активным внедрением доступного регулируемого электропривода для крупных городов России – например Санкт-Петербурга или Москвы, данная информация скорее неактуальна, но в большинстве своем в малых городах проблема до сих пор остается нерешенной.

Выбор пути снижения потребления. Среди принципов экономии энергии в электроприводе можно выделить два типа мероприятий по минимизации энергопотребления электроприводной системы:

1) оптимизация аппаратной части электропривода – при этом привод все так же остается нерегулируемым;

2) замена нерегулируемого электропривода регулируемым.

Экономический потенциал энергосбережения в конструкции электродвигателей практически исчерпан, они считаются достаточно совершен-

ными. Остается только оптимизация всей электромеханической системы агрегата при помощи правильного подбора основного оборудования, в частности двигателя и редуктора, если он используется, уменьшения потерь в питающих сетях и т. п. Такой подход к оптимизации энергоэффективности электропривода в настоящее время неактуален, поскольку достигаемый эффект от перечисленных мероприятий может оказаться гораздо меньше убытков от использования нерегулируемых электроприводов.

Таким образом, случай перехода от нерегулируемого электропривода к регулируемому является основной возможностью снижения энергопотребления электропривода, при этом повышается эффективность управления другими показателями технологического процесса.

Энергосберегающий режим при скалярном управлении. Рассматриваемый частотно-регулируемый асинхронный электропривод представляет собой систему «преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором». В данном приводе распространены две стратегии управления в разнообразных исполнениях:

- 1) векторное управление;
- 2) скалярное управление (U/f -управление).

Векторное управление имеет огромную популярность, однако чаще всего оно предназначено для приводов, отвечающих высоким требованиям к качеству регулирования, а значит, энергоэффективность таких приводов ставится на второй план, хотя и предпринимаются попытки ее повышения. При этом, как было сказано ранее, количество таких приводов относительно мало.

Скалярное управление распространено для регулирования электроприводов в ранее перечисленных простых агрегатах, где не требуется высокая динамика, точность, а также большой диапазон регулирования. Такие электроприводы не всегда способны отработать быстрые изменения статического момента.

Для каждого агрегата с регулируемым электроприводом, выполняющего определенный технологический процесс, существенен выбор рационального с технической точки зрения закона управления величиной (величинами), определяющей потребляемую агрегатом мощность.

В зависимости от характера нагрузки различают следующие законы регулирования при U/f -управлении:

1) $U/f = \text{const}$ – при постоянном моменте сопротивления $M_c = \text{const}$;

2) $U/f^2 = \text{const}$ – при работе двигателя на вентиляторную нагрузку;

3) $U/\sqrt{f} = \text{const}$ – при постоянной мощности двигателя $P = \text{const}$.

На практике чаще всего применяется закон $U/f = \text{const}$, причем зачастую встречаются случаи использования данного закона в агрегатах с вентиляторной нагрузкой, поэтому ограничимся рассмотрением энергосберегающего режима при регулировании именно по этому закону.

Известно, что при $U/f = \text{const}$ с учетом IR -компенсации теоретическая механическая характеристика асинхронного двигателя приобретает вид, представленный на рис. 1, на котором изображена естественная характеристика при номинальной частоте питания $f_{1н}$ и искусственные характеристики при частотах питания f_{11} и f_{12} .

При номинальной частоте $f_{1н}$ и в отсутствии нагрузки двигатель вращается с частотой холостого хода $\omega_{0н}$, однако, набрасывая момент сопротивления M_c , частота вращения двигателя немного снижается до значения ω_n . Наброс момента возможен в рабочей зоне до критического момента M_k . Дальнейшая перегрузка двигателя может привести к аварии. Аналогичная ситуация и с искусственными характеристиками, которые смещаются параллельно естественной, хотя на малых частотах это условие не выполняется.

Как видно из характеристики, момент сопротивления M_c двигателя значительно меньше критического M_k . Отсюда следует вывод, что к дви-

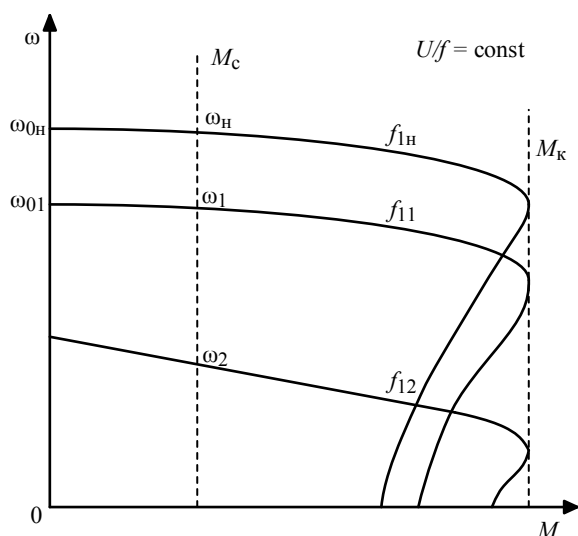


Рис. 1

гателью прикладывается большее напряжение, а значит, и мощность, чем требуется для поддержания момента на валу. Таким образом, введя некоторый коэффициент энергосбережения k , регулируемый в пределах от 0 до 1, можно преобразовать закон $U/f = \text{const}$ к следующему виду:

$$k \frac{U}{f} = \text{const}.$$

Изменяя k , можно уменьшать напряжение статора, сдвигая критический момент M_k ближе к статическому моменту M_c до значения M'_k (рис. 2), тем самым уменьшая потребляемую мощность, что приводит к снижению энергопотребления привода.

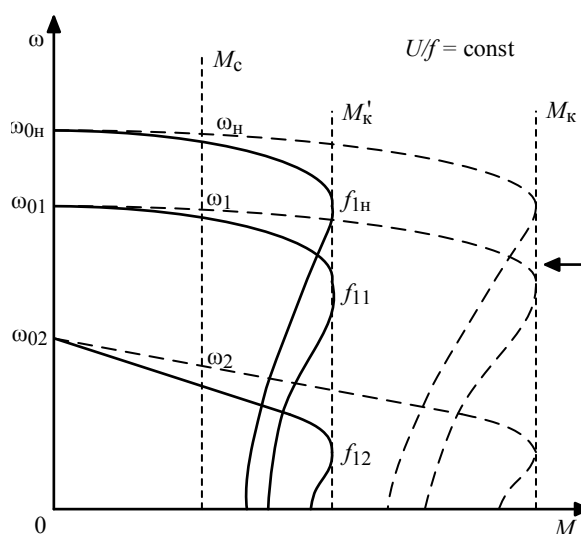


Рис. 2

Тот же метод работает и при других законах скалярного управления. Именно на данном принципе базируется энергосберегающий режим, применяемый в асинхронных электроприводах с U/f -управлением.

Потенциал для применения представленного энергосберегающего режима весьма велик. Подъемно-транспортные механизмы часть своего рабочего цикла работают нагруженными, другую же часть они перемещаются вхолостую, при этом количество таких циклов за день может быть значительно. Насосные агрегаты в системах водоснабжения днем имеют большую загруженность, чем ночью. Примеров, когда промышленные агрегаты имеют различную загруженность в течение своего рабочего цикла, можно привести очень много.

Применение энергосберегающего режима в преобразователе частоты. В существующих преобразователях частоты (ПЧ), например в [2],

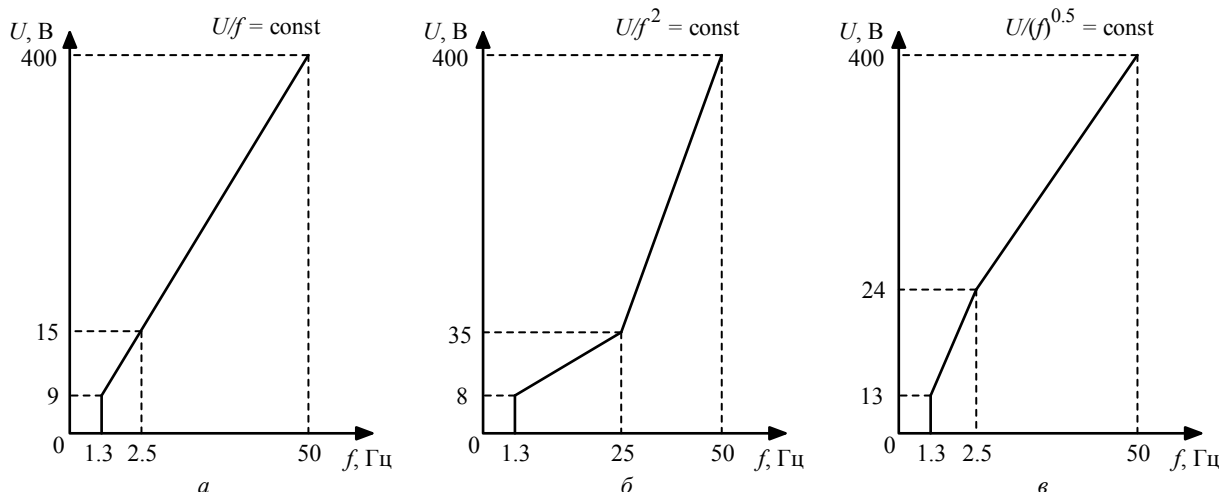


Рис. 3

скалярное управление обычно реализуется путем настройки заложенных в ПЧ шаблонов кривых пропорциональности напряжения и частоты (рис. 3). При настройке ПЧ на скалярное управление можно выбирать предварительно установленные характеристики, реализующие пропорциональное регулирование (рис. 3, а), регулирование при вентиляторной нагрузке (рис. 3, б) или регулирование с постоянством мощности (рис. 3, в), либо создать свою – пользовательскую характеристику, изменяя наклон различных участков характеристики для реализации своего уникального закона регулирования, подходящего для конкретного исполнительного механизма. Именно таким образом на практике реализуются законы регулирования в преобразователях частоты.

Современные преобразователи частоты универсальны и многофункциональны. Очень часто они имеют в своем функционале режим энергосбережения, реализованный различными методами. Некоторые преобразователи частоты, в том числе и [2], имеют реализацию представленного в статье метода энергосбережения при скалярном управлении, выполненную следующим образом. При незначительной нагрузке привода во время своего рабочего процесса на заранее запрограммированный многофункциональный вход ПЧ подается команда активации энергосберегающего режима. В соответствии с заданными параметрами энергосбережения выходное напряжение ПЧ снижается, что приводит к экономии энергии в ущерб максимально поддерживаемой нагрузке. Затем при нормальной нагрузке привода энергосберегающий режим отключается и ПЧ работает в нормальном режиме.

В качестве параметров энергосбережения выступают:

- 1) коэффициент энергосбережения, %;
- 2) время восстановления напряжения, с;
- 3) частота активации энергосбережения, Гц.

Коэффициент энергосбережения определяет выходное напряжение ПЧ и задается в процентах от формируемого напряжения запрограммированной кривой пропорциональности напряжения и частоты ПЧ, представленной на рис. 3.

Время восстановления напряжения задается в секундах и определяет скорость изменения выходного напряжения ПЧ при включении и отключении энергосберегающего режима.

Частота активации энергосбережения определяет нижний предел частоты, при которой возможна работа энергосберегающего режима. Команда энергосбережения активируется только тогда, когда задание частоты превышает этот нижний предел. Параметр можно оставить в нулевом значении, тогда энергосберегающий режим можно будет активировать сразу после подачи команды пуска привода.

Во время работы привода коэффициент энергосбережения и частота активации энергосбережения могут изменяться – таким образом энергосберегающий режим можно адаптировать к изменяющимся во время работы привода условиям нагрузки исполнительного механизма, обеспечивая максимальную эффективность энергосбережения.

На рис. 4 представлена временная диаграмма демонстрации работы привода при переходе в энергосберегающий режим и выходе из него.

В начале рабочего цикла на привод подается команда пуска, после чего он начинает выходить на заданную скорость вращения, соответствующую

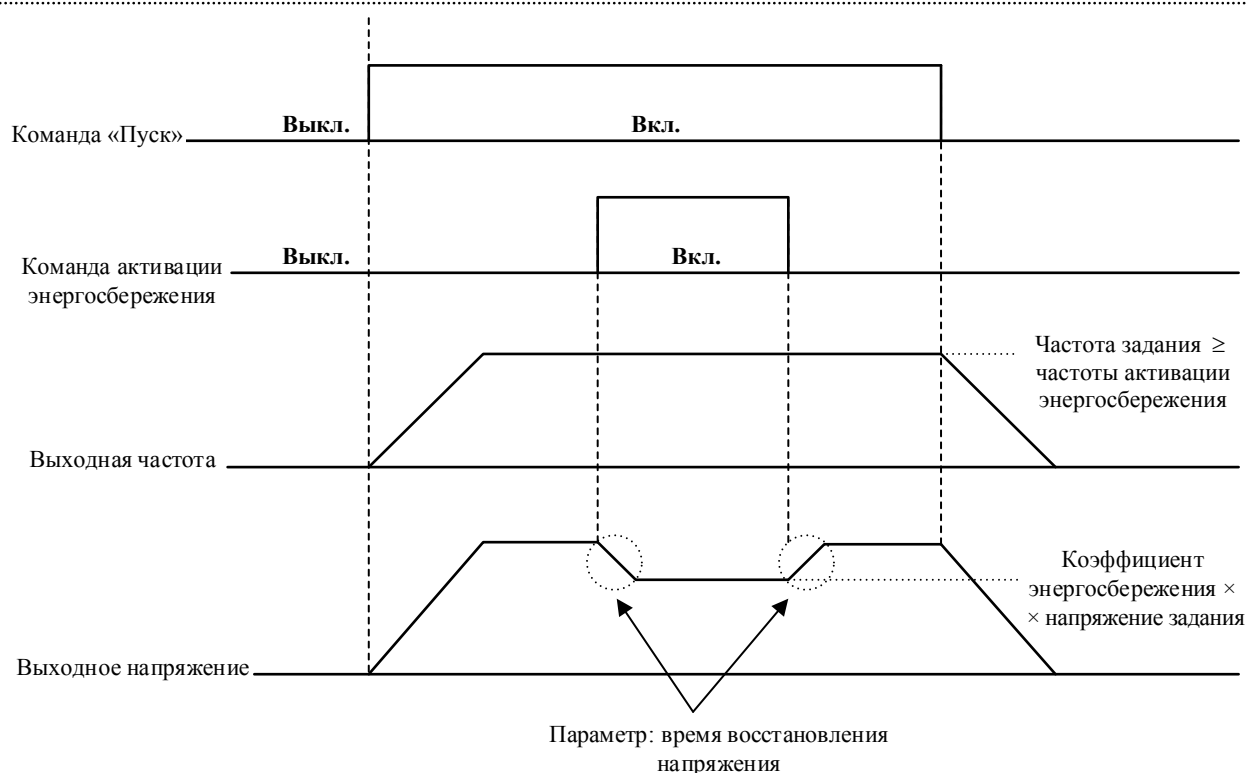


Рис. 4

щую выходной частоте ПЧ, которая должна быть больше установленной частоты активации энергосбережения. Через какой-то промежуток времени, когда на приводе будет присутствовать незначительная нагрузка вследствие его разгрузки, подается команда активации режима энергосбережения, после которой ПЧ изменяет свое выходное напряжение в соответствии с заданным коэффициентом энергосбережения за время восстановления напряжения. Далее через промежуток времени, по прошествии которого предполагается, что привод снова должен будет снова нагрузиться, команда активации режима энергосбережения снимается, и ПЧ изменяет свое выходное напряжение в соответствии с заданием нормальной работы, т. е. выбранным шаблоном кривой пропорциональности напряжения и частоты также за время восстановления напряжения. В конце рабочего цикла прекращается подача команды пуска, и привод останавливается.

Заключительная оценка метода. Представленный метод снижения энергопотребления асинхронным электроприводом со скалярным управлением очень прост, а главное, эффективен

за счет огромной доли используемых агрегатов с этим приводом. Стоит отметить, однако, что недостатком данного метода энергосбережения является то, что оператор несет полную ответственность за установку коэффициента энергосберегающего режима. Моменты активации энергосберегающего режима программируются заранее в соответствии с заданным рабочим циклом электропривода исполнительного механизма агрегата. При отклонении от этого рабочего цикла вследствие случайных внешних возмущений существует опасность превышения момента сопротивления над установленным, фиксированным критическим моментом, что может привести к неожиданному опрокидыванию асинхронного двигателя и, как следствие, к аварии.

Материалы данной статьи в первую очередь предназначены для предприятий и научно-исследовательских организаций, занимающихся оптимизацией энергопотребления приводов переменного тока. Они могут быть полезны также специалистам, эксплуатирующим асинхронные электроприводы со скалярным управлением на простых промышленных агрегатах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильинский Н. Ф., Москаленко В. В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 208 с.

2. SYSDRIVE 3G3FV. High-function General-purpose Inverter. User's Manual. Cat. № I516-E1-05. Omron. URL: <http://omrondoc.ru/C/I516-E1-05.pdf>.

N. I. Tatarintsev, D. S. Karasyov
Saint Petersburg Electrotechnical University

ENERGY-SAVING MODE APPLICATION IN THE VARIABLE-FREQUENCY INDUCTION ELECTRIC DRIVE

Considers ways to reduce the industrial units' electric drives energy consumption, in particular, variable-frequency induction drives. The economic potential assessment of energy conservation in the drives under consideration. The need for reducing energy consumption in the units under consideration is shown. The possible implementing method an energy-saving mode operation under scalar control with a proportional control law is described in detail. An application analysis of the scalar control principles is made, as well as the presented reducing energy consumption method in industrial frequency invertors. An electric drive operation temporary diagram during the entering to the energy-saving mode and exiting from it is presented, demonstrating the energy-saving parameters influence to the drive operation in the presented energy-saving mode. Also, it considers energy-saving mode drawback and the possible consequences of its use are revealed.

Variable-frequency AC electric drive, energy-saving electric drive, V/f control, energy-saving mode in the frequency inverter

УДК 620.92

Н. Нтавухоракомейе
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Л. Ндайрагиже
Государственный университет Бурунди

Проектирование и разработка экономически эффективного контроллера заряда автономной солнечной электростанции

Спроектирован и разработан экономичный и эффективный контроллер солнечной электростанции с автоматическим выключателем и индикатором при учете климатических условий Республики Бурунди. Этот контроллер заряда работает с топологией DC-DC-преобразователя для зарядки аккумулятора. Система реализована с использованием недорогих и распространенных аппаратных компонентов. Разработанный контроллер заряда в сочетании с регулируемым напряжением и током подходит для автоматического включения-выключения электростанции. Для увеличения срока службы аккумуляторной батареи циклы ее перезарядки оптимизируются. В системе использована регулируемая интегральная микросхема (IC – integrated circuit), для управления напряжением преобразователя постоянного тока. Описана архитектура системы для регулируемого источника питания с выходом 14 В, 3 А. В представленной системе применяется резистивное управление для ограничения выходного сигнала ППТ, а также для ограничения напряжения или тока.

Результаты испытаний подтверждают, что применение предложенного метода приводит к лучшему использованию доступной солнечной энергии.

Контроллер заряда, аккумуляторная батарея, преобразователя постоянного тока, микроконтролер, резистивное управление

В настоящее время растет спрос на использование солнечной энергии в связи с повышенной потребностью в электричестве и истощением невоз-

обновляемых источников энергии. Поскольку солнечная энергия не постоянна, а зависит от погодных условий – солнечного излучения и температуры