

УДК 621.3.07

А. Н. Андреев, Е. В. Несговоров, Т. В. Королев, Д. А. Колесниченко, Н. М. Колесниченко
Вологодский государственный университет

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНУТРЕННЕЙ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ В ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОМ АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

В статье дается краткий обзор и обоснование возможности применения внутренней рекуперации энергии для частотно-регулируемого асинхронного электропривода. Приведено описание созданной экспериментальной установки для подтверждения возможности внутренней рекуперации и оценки ее эффективности. Произведен расчет снижения затрат энергопотребления в системах электроприводов с применением внутренней рекуперации энергии на основании экспериментальных данных.

Асинхронный электропривод, энергоэффективность, рекуперация энергии, оценка энергоэффективности внутренней рекуперации.

The article gives a brief overview and justification of the possibility of using internal energy recovery for the asynchronous variable-frequency electric drive. The paper describes an experimental setup to confirm the possibility of recovery energy and gives an assessment of its effectiveness. The article presents the calculation of energy saving of electrical systems with internal energy recovery, which is based on experimental data.

Asynchronous drive, energy efficiency, recuperation of energy, evaluating efficiency of energy recuperation.

Введение.

Использование частотно-регулируемого асинхронного электропривода в традиционной сфере и в приложениях, где он ранее практически не применялся, базируется на современных достижениях силовой электроники и вычислительной техники. Такой подход приводит к повышению эксплуатационных характеристик за счет гарантированного выполнения требований технологического процесса, а также к повышению надежности и безопасности при эксплуатации. В сравнении с нерегулируемыми электроприводами переменного тока использование частотного привода обеспечивает экономию электроэнергии при использовании рациональных алгоритмов управления технологическими процессами.

Энергоэффективность указанного типа электропривода может быть дополнительно увеличена посредством использования системы внутренней рекуперации энергии. Проявление положительных моментов такой системы особенно заметно для механизмов со значительными приведенными к валу двигателя моментами инерции, механизмов с активным моментом и режимами работы с большим количеством ускорений и замедлений, таких как: транспортные средства (автомобили), подъемно-транспортные механизмы (лифты, краны, лебедки), кузнечно-прессовое оборудование и др. Немаловажной задачей при использовании системы внутренней рекуперации является адаптация алгоритмов управления преобразователем частоты с целью увеличения эф-

фективности работы асинхронной машины в генераторном режиме.

Основная часть.

Для перечисленных выше типов приводов наличие значительного момента инерции механизма не позволяет скорости вращения вала измениться мгновенно в отличие от скорости вращения магнитного поля электрической машины, которая в системе «преобразователь – двигатель» изменяется многократно быстрее.

В соответствии с уравнением для механических характеристик частотно-регулируемого асинхронного электропривода [6] и условием работы асинхронного генератора [2], [5] электрическая машина в таких условиях переходит в генераторный режим работы, когда скорость вала двигателя больше скорости вращения магнитного поля, задаваемого текущей частотой преобразователя. Этот режим возникает при торможении механизма или при изменении скорости вращения вниз от предыдущего значения. При этом меняется направление потока энергии, т.е. энергия «возвращается» обратно в преобразователь. Необходимым условием нормальной работы генератора является подмагничивание асинхронной машины, в противном случае произойдет потеря возбуждения и управляемости с переходом машины в режим самовыбег, что для технологического оборудования в ряде случаев эквивалентно аварийной ситуации. В большинстве серийных преобразователей для

сброса возвращаемой энергии устанавливается тормозной резистор, на котором рекуперированная энергия электропривода преобразуется в тепло. Существенно реже при изменении структуры силовой цепи и цепи управления преобразователя частоты обеспечивается возврат энергии в питающую сеть (преобразователи с активным выпрямителем) [7]. Такой способ требует установки активно-пассивных фильтров тока и напряжения на входе преобразователя, необходимых для улучшения гармонического состава и качества возвращаемой в сеть энергии, что технически невозможно выполнить, например, для автономных систем.

Альтернативой рекуперации энергии в питающую сеть является внутренняя рекуперация [1], [3]. Рекуперированная энергия запасается во внутреннем накопителе преобразователя. Величина емкости накопителя при этом увеличена относительно базового значения. Таким накопителем энергии может выступить батарея конденсаторов либо аккумуляторов, не меняющих своих основных характеристик на частотах коммутации силовых ключей и работающих в расчетном диапазоне напряжений звена постоянного тока. В источниках [1], [3] подробно представлены доказательства возможности внутренней рекуперации для выделенного типа электроприводов и рассчитана эффективность возврата энергии, которая может составлять до 50 % от механической энергии, рассеиваемой при торможении привода. Для оценки снижения энергопотребления приводом проведены экспериментальные исследования на базе общепромышленного преобразователя частоты. Моделировался некоторый производственный цикл, включающий в себя: разгон привода, торможение и работу в установившихся режимах для двух разных скоростей вращения. Опыт был проведен с повышенным приведенным моментом инерции, имитирующем реальный механизм. Показания снимались при подключенном тормозном резисторе и при отсутствии тормозного резистора с увеличенной емкостью звена постоянного тока. Для оценки потребленной энергии использовался классический энергетический подход. Расчет энергии проводился по следующей формуле:

$$W_{эл.} = \sum_{j=0}^N u_j \cdot i_j \cdot \Delta t,$$

где Δt – интервал времени между двумя снятыми точками.

Для проведения экспериментов в лаборатории кафедры Управляющих и вычислительных систем ВоГУ реализован экспериментальный стенд на основе общепромышленного преобразователя частоты фирмы “Omron”. В установке предусмотрена возможность подключения или внешней емкости к звену постоянного тока, или тормозного резистора. Функциональная схема установки представлена на рис. 1, а ее внешний вид – на рис. 2. Для измерения электрических величин токов и аналогичных величин напряжения использованы датчики фирмы “Lem” на основе эффекта Холла, что позволяет рас-

ширять частотный диапазон измерения и повысить точность. Для сбора и передачи информации в персональный компьютер применена система фирмы “Lcard”. Параметры измерительных устройств и их метрологические характеристики с кратким пояснением сведены в таблицу.

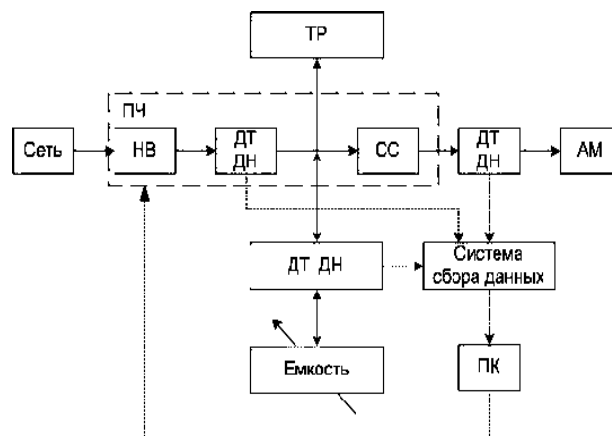


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки

На рис. 1 приняты следующие сокращения: ПЧ – преобразователь частоты, НВ – неуправляемый выпрямитель, СС – силовая сборка транзисторов, ДТ – датчик тока, ДН – датчик напряжения, АМ – асинхронная машина, ПК – персональный компьютер, Емкость – сборка конденсаторов с возможностью регулирования величины емкости, ТР – тормозной резистор.

Проведя анализ метрологических характеристик системы сбора данных по каналам тока и напряжения, можно сказать, что относительная погрешность измерения канала тока составила $\pm 1,9\%$, канала напряжения $\pm 2,3\%$, чем гарантируется достоверность последующих экспериментальных данных.

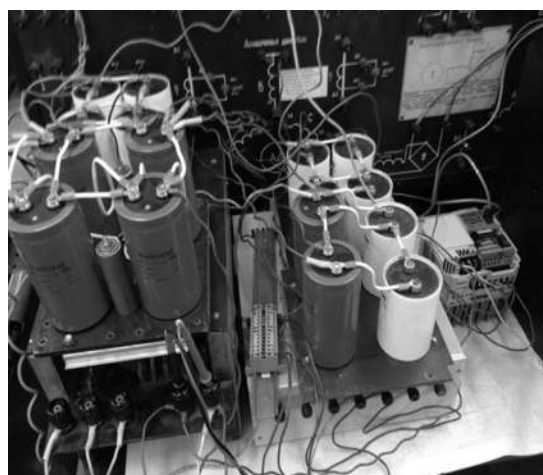


Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки

Таблица

Метрологические характеристики средств измерения

Тип	Описание	Основные параметры	Метрологические характеристики
LEM LA-100	Датчик тока	$I = \pm 100 \text{ A}$, $f \leq 100 \text{ кГц}$	Точность преобразования – $\pm 0,45 \%$; нелинейность – $< 0,15 \%$
LEM LV-25p	Датчик напряжения	$U = \pm 1000 \text{ В}$, $f \leq 20 \text{ кГц}$	Точность преобразования – $\pm 0,8 \%$; Нелинейность – $< 0,2 \%$
Lcard L783M	Система сбора данных	$f_{\text{дискр}} = 3 \text{ МГц}$	Основная приведенная погрешность – 1%

Параметры используемой асинхронной машины: марка WD100LR, число пар полюсов: $p = 2$; номинальное напряжение: $U_{\text{нф}} = 220 \text{ В}$; номинальный ток: $I_{\text{н}} = 6,6 \text{ А}$; номинальная скорость вращения вала: $n_{\text{н}} = 1450 \text{ об./мин.}$; момент инерции: $J = 0,011 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

В ходе экспериментов были получены зависимости, которые представлены на рис. 3. Циклический разгон, торможение и вращение с заданными скоростями осуществлялись для ступенчатого изменения частот с 30 до 50 Гц при разгоне и с 50 до 30 Гц соответственно при торможении.

Рис. 3а свидетельствует, что при торможении (с 6 и 18 с) начинает расти величина напряжения звена постоянного тока и при этом запирается входной диодный мост, о чем можно судить по отсутствию тока входной цепи, а значит, прекращается потребление энергии из сети. При достижении величины напряжения порядка 800В срабатывает «защита», включая тормозной резистор и рассеивая энергию торможения на сопротивлении. Величина напряжения срабатывания «защиты» определяется максимальным напряжением конденсаторов звена постоянного тока.

При отключении тормозного резистора и установке конденсаторной батареи (рис. 3б) с началом торможения (с 6 и 18 с) происходит относительно плавный рост величины напряжения. Напряжение не превышает величины напряжения критического для конденсаторов, так как емкость конденсаторов выбирается согласно энергии, которую должна принять емкость, что описано в [1], [3]. После окончания торможения (с 7,3 и 19,3 с) происходит снижение напряжения, так как запасенная энергия начинает расходоваться на работу привода. В это же время притока энергии из сети нет, так как напряжение звена постоянного тока выше напряжения, которое получается выпрямлением сетевого напряжения, о чем свидетельствует отсутствие тока (рис. 3б). Даже качественная оценка графиков свидетельствует о том, что энергии потребляется меньше, чем при использовании тормозного резистора.

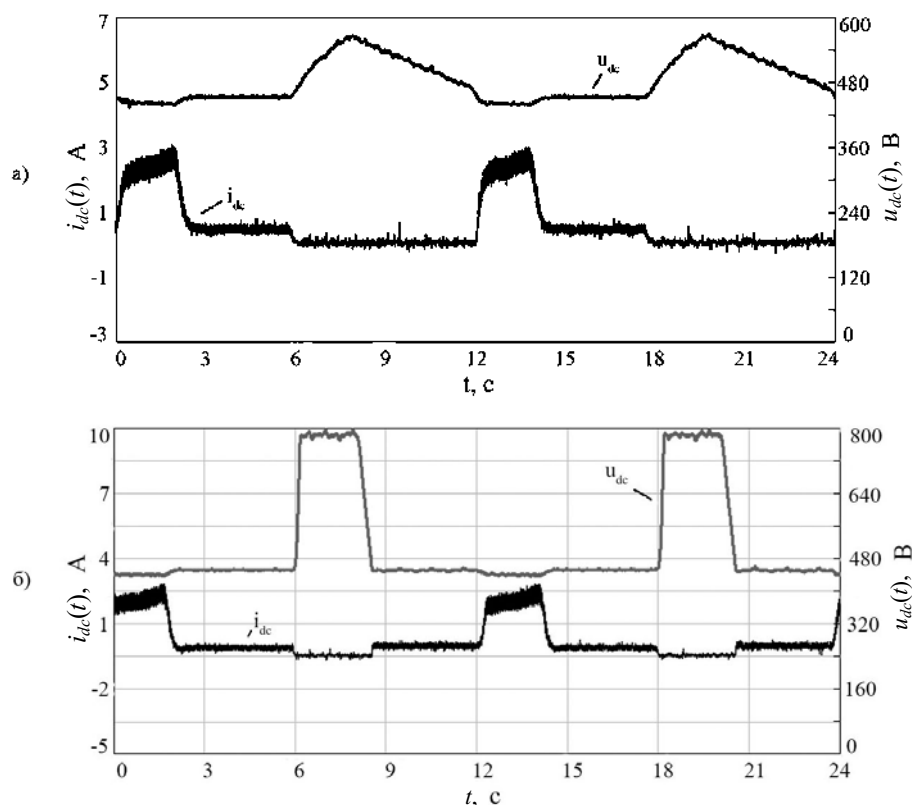


Рис. 3. Мгновенные значения напряжения и тока звена постоянного тока преобразователя частоты:
а – при установке тормозного резистора,
б – при отсутствии тормозного резистора с увеличенной величиной емкости

Количественные показатели потребленной энергии за цикл работы механизма при использовании тормозного резистора (рис. 3а) рассчитываются интегральным методом по выражению:

$$W_1 = \sum_{j=0}^N u_j \cdot i_j \cdot \Delta t, = 5393 \text{ Дж.}$$

Количественные показатели потребленной энергии за цикл работы механизма при отсутствии тормозного резистора и подключенной увеличенной емкости (рис. 3б):

$$W_2 = \sum_{j=0}^N u_j \cdot i_j \cdot \Delta t, = 4497 \text{ Дж.}$$

Снижение энергопотребления при использовании внешнего накопителя энергии (емкости) по сравнению с традиционным сбросом энергии на тормозном резисторе составляет:

$$ef = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \cdot 100 \% = \frac{5393 - 4497}{5393} \cdot 100 \% = 16,7 \ \%.$$

Выводы.

В ходе работы создан экспериментально-исследовательский комплекс, при помощи которого еще раз подтверждена возможность внутренней рекуперации энергии в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе. Произведена оценка эффективности использования внутренней рекуперации энергии при применении асинхронного электропривода с такой системой в циклических режимах работы. Наблюдается снижение энергопотребле-

ния до 16 %. Расчет реального снижения энергозатрат при использовании режима внутренней рекуперации для того или иного механизма производится в соответствии с мощностью электропривода и циклограммой его работы.

Литература

1. Андреев, А. Н. Внутренняя рекуперация энергии в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе / А. Н. Андреев, Д. А. Колесниченко // Труды VII Международной (VIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводе. – Иваново, 2012.
2. Андреев, А. Н. Исследование расчетной модели самовозбуждения асинхронной машины, / А. Н. Андреев, Е. В. Несговоров, Д. А. Колесниченко // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2012. – Вып. 4. – С. 51–54.
3. Андреев, А. Н. Моделирование режимов внутренней рекуперации энергии в асинхронном электроприводе / [А. Н. Андреев и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2013. – Вып. 4. – С. 70–75.
4. Андреев, А. Н. Оценка эффективности управления внутренней рекуперацией энергии в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе / [А. Н. Андреев и др.] // Системы управления и информационные технологии. – М. ; Воронеж, 2013. – №1(51). – С. 52–55.
5. Копылов, И. П. Электрические машины: Учеб. для вузов / И. П. Копылов. – М., 2000.
6. Соколовский, Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: Учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г. Г. Соколовский. – М., 2007.
7. Шрейнер, Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург, 2000.

УДК 004.432.2

О. С. Большаков, В. Г. Шаров

*Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П. А. Соловьева,
А. В. Петров*

*Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие
Системы автоматизации технологических и энергетических комплексов плюс»*

РЕАЛИЗАЦИЯ КРОССПЛАТФОРМЕННОСТИ ПРОГРАММ ДЛЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВСТРАИВАЕМЫХ СИСТЕМ

Выявлены недостатки существующих подходов по обеспечению кроссплатформенности программного обеспечения для специализированных встраиваемых систем, предложен новый подход по обеспечению кроссплатформенности программ с использованием средств языка Embeddecy. Подход основан на представленной обобщенной модели микроконтроллера, представлен пример реализации модуля управления аналого-цифровым преобразователем микроконтроллера с разделением аппаратно-зависимых и аппаратно-независимых функций.

Встраиваемые системы, кроссплатформенность, микроконтроллеры, языки программирования.

Disadvantages of existing approaches of cross-platform software development for specialized embedded systems are revealed; a new approach to cross-platform programs development using Embeddecy language is proposed. The approach is based on the generalized model of a microcontroller, an example of the implementation of the analog-to-digital converter control module of the microcontroller with division of hardware-dependent and hardware-independent functions is provided.