

УДК 621.3

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-6-125-132

## Энергосберегающий электропривод подъемного механизма с резервным питанием

А.Н. Ладыгин, Д.Д. Богаченко, Н.А. Ладыгин, В.В. Холин

Разработано и исследовано устройство, обеспечивающее бесперебойную работу частотно-регулируемого электропривода. По своему назначению оно является источником бесперебойного питания преобразователя частоты (ИБППЧ) и предназначено для электроприводов механизмов подъема, поскольку способно повысить их энергетическую эффективность благодаря использованию энергии торможения опускаемого груза при зарядке резервного источника питания. Силовая часть рассматриваемого электропривода представляет собой систему «преобразователь частоты — асинхронный двигатель», в которой преобразователь частоты выполнен по типовой схеме с неуправляемым выпрямителем, автономным инвертором напряжения и звеном постоянного тока между ними. Основными функциональными элементами ИБППЧ являются аккумуляторная батарея и блок управления коммутациями. При работе задействован тормозной модуль, которым снабжаются все преобразователи частоты, имеющие рассматриваемую типовую структуру, для управления энергией торможения. Данный модуль обеспечивает зарядку аккумуляторной батареи ИБППЧ в тормозных режимах электропривода при опускании груза. Логика работы ИБППЧ позволяет выполнять основную функцию, заключающуюся в автоматическом переключении звена постоянного тока преобразователя частоты на питание от аккумуляторной батареи при потере питания от сети. Кроме того, блок управления ИБППЧ может поддерживать режим, при котором полностью заряженная аккумуляторная батарея отдает свою энергию электроприводу, работающему на подъем груза. Режим работы от резервного источника может продолжаться до заранее заданного предела разряда батареи. При достижении предела разряда батареи ИБППЧ переключается в режим заряда резервного источника, который проводится на участках опускания груза. Подобные циклы разряда/заряда многократны, однако при такой циклической работе снижается общее потребление электроэнергии механизмом, поскольку потенциальная энергия, высвобождаемая при опускании груза, используется электроприводом в двигательном режиме для подъема грузов. Таким образом, применение предлагаемого ИБППЧ в электроприводе рассматриваемого типа и назначения не только обеспечивает бесперебойность работы при отключении сети, но и способно повысить энергетическую эффективность подъемного механизма. Приведено описание лабораторной установки и результатов экспериментальных исследований, подтверждающих работоспособность предложенного устройства, новизна которого закреплена патентом РФ.

*Ключевые слова:* электропривод, подъемные механизмы, преобразователь частоты, бесперебойное питание, энергия торможения, энергоэффективность.

*Для цитирования:* Ладыгин А.Н., Богаченко Д.Д., Ладыгин Н.А., Холин В.В. Энергосберегающий электропривод подъемного механизма с резервным питанием // Вестник МЭИ. 2017. № 6. С. 125—132. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-6-125-132.

## An Energy-Saving Electric Drive for a Hoisting Mechanism with Backup Power Supply

A.N. Ladygin, D.D. Bogachenko, N.A. Ladygin, V.V. Kholin

A device securing undisturbed operation of a variable frequency electric drive is developed and investigated. By its purpose, the developed device is an uninterrupted power supply source of a frequency converter (FC UPS) and is intended for being used in the electric drives of hoisting mechanisms due to its ability to improve their power efficiency by using the descended cargo's braking energy for charging the backup power supply source. The power part of the considered electric drive comprises a frequency converter and an induction motor with the former made according to a standard arrangement involving an uncontrolled rectifier, a self-excited voltage inverter, and a direct current link between them. A storage battery and a switching control unit are the basic functional elements of the FC UPS. During operation, the brake unit is involved (which is used together with all frequency converters that have the considered standard structure) for control of braking energy. This module serves for charging the FC UPS storage battery during the electric drive's brake modes in descending the cargo. The FC UPS operation logic performs control

of the main function, namely, automatically switching over the frequency converter's DC link for taking power from the storage battery when power supply from the network is lost. In addition, the FC UPS control unit can support the operation mode in which the fully charged storage battery supplies its stored energy to the electric drive when it lifts up the cargo. This mode of operation from the backup power source can continue until reaching the preset storage battery discharge limit. On reaching the storage battery discharge limit, the FC UPS is switched over to the mode of charging the backup power supply source, which is activated in performing the cargo descending operations. Although such discharging/charging cycles are repeated many times, but with such cyclic operation the total energy consumed by the mechanism becomes smaller because the potential energy released in descending the cargo is used by the electric drive in the motor mode for lifting up the cargoes. Thus, by applying the proposed FC UPS in the electric drive of the considered type and purpose it becomes possible not only to ensure uninterrupted operation of the hoisting mechanism when power supply from the network is lost, but also to improve its power efficiency.

The article presents a description of the laboratory installation and the results of experimental investigations confirming the serviceability of the proposed device, the novelty of which is fixed by a patent of the Russian Federation.

*Key words:* electric drive, hoisting mechanisms, frequency converter, uninterruptible power supply, braking energy, power efficiency.

*For citation:* Ladygin A.N., Bogachenko D.D., Ladygin N.A., Kholin V.V. An Energy-Saving Electric Drive for a Hoisting Mechanism with Backup Power Supply. MPEI Vestnik. 2017; 6:125—132. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-6-125-132.

## Введение

Все более широкое применение частотно-регулируемых электроприводов по системе «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ–АД) для приведения в движение подъемных механизмов в настоящее время является достаточно очевидным фактом. Среди основных причин этой тенденции следует отметить не только известные надежность и низкую стоимость асинхронных двигателей, но также выдающиеся функциональные характеристики современных ПЧ, благодаря которым такой тип электропривода соответствует самым жестким требованиям к характеристикам подъемных механизмов [1]. Причем речь идет о ПЧ массового производства, стоимость которых, как правило, ниже стоимости применяемого асинхронного двигателя. Типовая функциональная структура ПЧ, представленная на рис. 1, состоит из неуправляемого выпрямителя (В), автономного инвертора напряжения (АИН) и включенного между ними звена постоянного тока с конденсатором.

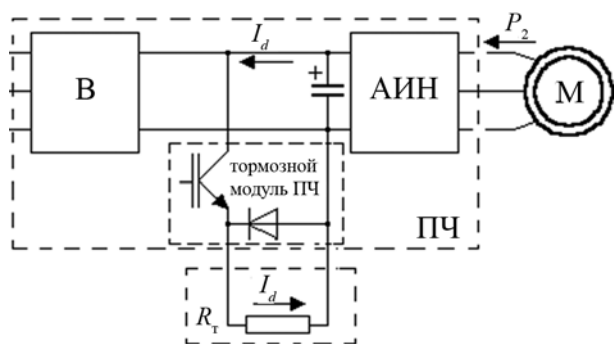


Рис. 1. Функциональная структура типового ПЧ

Поскольку речь идет об электроприводе, совершающем работу против силы тяжести, то при опускании груза его мотор работает в генераторном режиме, развивая тормозной момент. Для обеспечения этого режима в рассматриваемой типовой структуре ПЧ обязательно имеется электронный ключ с соответствующей схемой управления (тормозной модуль),

обеспечивающий отвод энергии, генерируемой в тормозном режиме, на специальный резистор  $R_t$ . Такое простое схемное решение, вызванное необходимостью защищать конденсатор звена постоянного тока от перенапряжения и сопровождающееся рассеиванием энергии на тормозном резисторе  $R_t$ , является вынужденной платой за возможность применять в подъемных установках ПЧ массового производства, имеющие в своей структуре неуправляемые выпрямители и не способные пропускать электрическую энергию в обратном направлении.

Отмеченный недостаток энергетики рассматриваемой силовой системы не может не вызывать нареканий с позиций энергоэффективности. Ведь на практике соотношение между работой по подъему груза и работой по его опусканию может достигать уровня 50:50, что указывает на наличие значительного потенциала в сокращении затрат электрической энергии в производственном цикле рассматриваемых механизмов. Разумеется, для частотно-регулируемого электропривода имеются современные решения, позволяющие успешно решать проблему полезного использования потенциальной механической энергии, высвобождаемой при опускании груза. Например, можно рассматривать применение управляемого выпрямителя или дополнительного рекуператора (инвертора, ведомого сетью), что повышает энергоэффективность подъемной установки в целом. Предложено прежде сконцентрировать внимание на решении еще одной актуальной проблемы ряда подъемных машин — на проблеме безотказности подъемного механизма при аварийном отключении сетевого питания электропривода.

Проблема безотказности при исчезновении сетевого питания является весьма критичной для монтажных кранов в машиностроении, для контейнерных кранов в портовых терминалах, для ответственных лифтовых установок в высотных зданиях и т. п. Но особо остро она проявляется в установках, осуществляющих подъем грузов в горячем металлургическом производстве, в литейных цехах, в ряде химических и ядерных технологий. Одним словом, там, где непредвиденная остановка в перемещении груза может привести к много-

кратным потерям из-за нарушения технологического процесса, задача повышения отказоустойчивости частотно-регулируемых электроприводов к потере сетевого питания чрезвычайно важна.

Известны [2, 3] различные схемные решения подключения резервного источника при потере сетевого питания. Наиболее распространенный тип источника бесперебойного питания (ИБП) содержит соединенные последовательно выпрямитель и автономный инвертор с выходным напряжением с характеристиками сети, к звену постоянного тока которого подключена аккумуляторная батарея. В случае отключения сети он начинает работать от батареи и питать штатный преобразователь частоты (рис. 2, а). Недостатком этого решения являются высокие капитальные затраты и повышенные потери энергии от двукратного преобразования частоты. Такой тип ИБП не рекомендуется использовать для питания частотно-регулируемых электроприводов не только из-за дублирования преобразований, но еще и потому, что дополнительное реактивное сопротивление может негативно сказаться на работе ПЧ.

Более эффективным является подключение накопителя энергии к звену постоянного тока преобразователя частоты с автономным инвертором напряжения [3]. Однако и в этом варианте (рис. 2, б) следует отметить, что выпрямители на входе ПЧ и блока бесперебойного питания дублируют друг друга. Известны также решения, в которых для заряда накопителя используется выпрямитель ПЧ [4], что является более эффективным решением.

В целом анализ проблемы показывает, что для зарядки резервного накопителя энергии, в качестве которого могут применяться аккумуляторы, суперконденсаторы или маховики, более перспективным является использование электроэнергии, генерируемой приво-

дом в тормозных режимах. Разумеется, такой подход целесообразен для электроприводов подъемных механизмов, работающих как в двигательном, так и в генераторном режиме.

Представлена система бесперебойного питания, использующая для заряда накопителя энергию торможения механизма, применение которой актуально для электроприводов подъемных механизмов с типовыми преобразователями частоты.

### Предлагаемое решение

В предлагаемом решении [4] в качестве резервного источника энергии взята аккумуляторная батарея, имеющая напряжение, уровень которого непосредственно соответствует напряжению на звене постоянного тока ПЧ. Последнее позволяет подключать аккумуляторную батарею к звену постоянного тока без дополнительных преобразований напряжения и упростить схему, согласующую накопитель электроэнергии с тормозным модулем ПЧ.

Функциональная схема системы ПЧ–АД с предложенной системой бесперебойного питания (ИБППЧ) изображена на рис. 3. Основными функциональными элементами системы ИБППЧ являются блок управления бесперебойным питанием (БУБП) и аккумуляторная батарея (АБ), подключаемые к клеммнику типового преобразователя частоты (см. рис. 1). При функционировании эта система использует электронный ключ управления энергией торможения, имеющийся в тормозном модуле ПЧ. Ключ осуществляет кратковременное периодическое подключение звена постоянного тока ПЧ не к тормозному резистору, как при работе в штатной схеме, а к АБ, обеспечивая ее заряд.

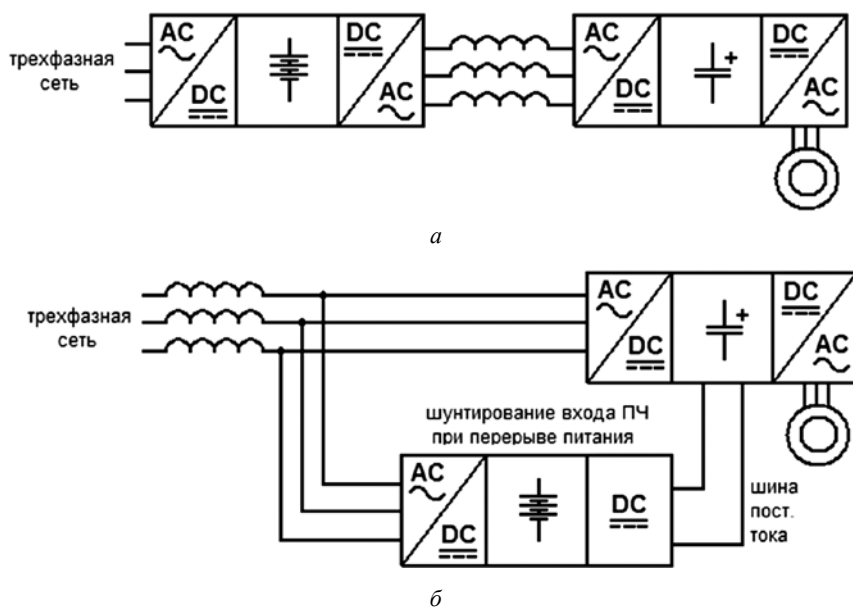


Рис. 2. Функциональные структуры электроприводов с бесперебойным питанием



Рис. 3. Функциональная схема электропривода с предложенной системой бесперебойного питания

Расчетные параметры ИБППЧ зависят от мощности ПЧ электропривода, а емкость АБ выбирают по условиям обеспечения номинального режима работы электропривода и требуемой длительности работы двигателя с момента отключения сети.

Блок БУБП в данном устройстве подключает накопитель энергии АБ к звену постоянного тока ПЧ в

случае отключения сети силового питания, а также обеспечивает обратное переключение питания при восстановлении сети без остановки работы механизма. Кроме этого, важной функцией БУБП является подключение АБ к звену постоянного тока ПЧ для заряда АБ при работе двигателя в генераторном режиме при торможении груза. Перечисленные коммутации протекают в функции текущего напряжения АБ, значение которого адекватно передает состояние уровня заряда батареи.

Таким образом, появляется возможность исключить потери электроэнергии, генерируемой в тормозном режиме, путем накопления ее в АБ и использования при необходимости для работы электропривода, в том числе и при исправной сети.

Логика работы БУБП в этом случае такова, что при накоплении в АБ 100 % энергии от расчетной емкости батареи инвертор ПЧ и двигатель механизма начинают работать от АБ. Это продолжается до ее разряда примерно до уровня 70 %. Минимальный задаваемый при наладке уровень запаса энергии АБ следует оставлять при исправной сети нетронутым, поскольку он может потребоваться в любой момент в случае аварийного отключения сети для обеспечения бесперебойного питания от АБ.

После достижения заданного минимального уровня заряда АБ при исправной сети двигатель начинает получать энергию из сети через выпрямитель ПЧ. При этом накопитель АБ переходит в режим заряда, периодически получая электроэнергию от АД, работающего в генераторном режиме при торможениях опускаемого груза, до достижения 100 % емкости АБ. Далее цикл может повторяться.

Подобный цикл работы рассматриваемого электропривода с ИБППЧ продемонстрирован на графиках рис. 4. На нижнем представлена упрощенная тахограмма работы двигателя, а на верхнем — соответствующее этой тахограмме изменение заряда АБ во времени. Период времени  $T_a$  отражает режим разряда накопителя

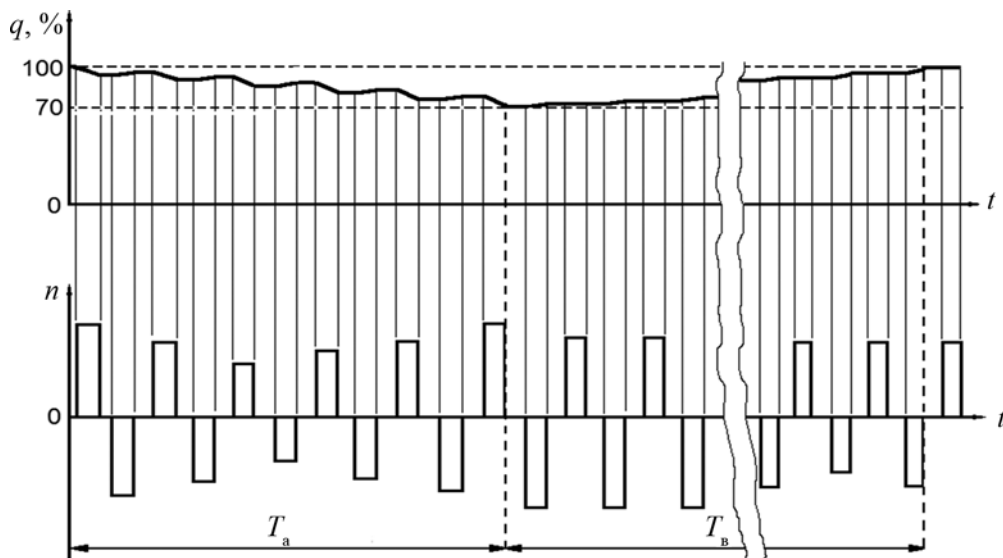


Рис. 4. Периоды разряда и заряда накопителя системы

(от 100 до 70 %), когда сеть исправна, но энергия из нее не потребляется. Заметим, что на участках опускания груза (скорость отрицательная) заряд АБ может в определенной степени восстанавливаться. Когда заряд батареи упадет до заданного минимального уровня период  $T_a$  закончится и начнется период  $T_b$  восстановления заряда батареи при потреблении энергии, необходимой для подъема груза, из сети. Для заряда батареи энергия сети не используется, а растет он только на участках опускания груза, в режимах торможения.

Конкретное время периодов  $T_a$  и  $T_b$  зависит от реальных соотношений между мощностью асинхронного двигателя и емкостью накопителя АБ, от соотношения грузов на участках подъема и опускания и ряда других факторов. В данной работе не была поставлена цель получить точные количественные соотношения, характеризующие различные рабочие режимы, а весь материал посвящен результатам экспериментальных исследований, проведенных с целью подтвердить принципиальную работоспособность предложенной системы.

### Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке, внешний вид и функциональная схема которой представлены на рис. 5.

Используемый в экспериментах источник АБ представляет собой батарею, собранную из 135 последовательно соединенных литий-железофосфатных ( $\text{LiFePO}_4$ ) аккумуляторов емкостью 40 А·ч каждый. Полностью заряженная батарея обеспечивает напряжение 520 В и допускает 2000 циклов заряда/разряда [5 — 7] при максимальном рабочем токе 120 А. Дроссель  $L$ , включенный последовательно с АБ, предназначен для ограничения тока заряда этой батареи.

В экспериментах использована система ПЧ–АД, собранная из серийно выпускаемых компонентов. Преобразователь системы имел типовую структуру, соответствующую представленной на рис. 1. Асинхронный короткозамкнутый двигатель системы мощностью 1,5 кВт смонтирован на одном валу с двигателем постоянного тока той же мощности. Якорь двигателя постоянного тока получал питание от реверсивного управляемого выпрямителя (система ТП–Д), работающего в режиме источника тока. Такое применение машины постоянного тока позволяет имитировать активную нагрузку на валу АД, соответствующую реальной нагрузке, которую создает лебедка подъемной машины при подъеме и опускании грузов; таким образом, данная конструкция позволяет проводить экспериментальные исследования системы в двигательном и в тормозном режимах.

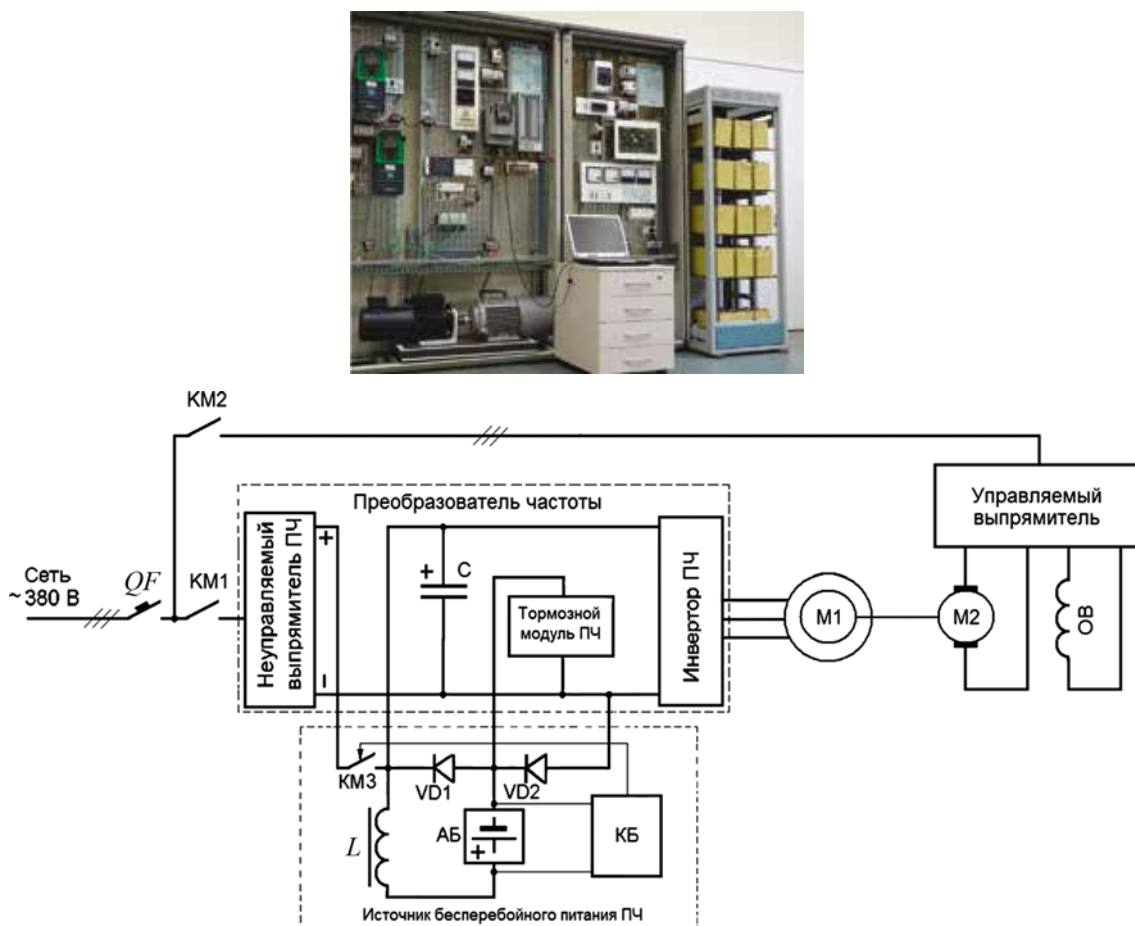


Рис. 5. Внешний вид и функциональная схема лабораторной установки

Источник бесперебойного питания преобразователя частоты, изготовленный согласно предложенному решению [4], способен производить необходимые переключения посредством ключа КМЗ, управляемого командным блоком КБ в функции напряжения на источнике резервного питания АБ. Подключение сетевого питания к системам ПЧ–АД и ТП–Д осуществляется ключами КМ1 и КМ2, соответственно.

В режиме работы от сети ключ КМЗ замкнут, АБ отсоединена от минусовой шины звена постоянного тока диодом VD1 и разомкнутым ключом блока тормозного модуля. При отключении сети напряжение звена постоянного тока начинает падать, и как только оно становится меньше напряжения АБ, на двигатель начинает поступать энергия через инвертор от накопителя АБ. В случае восстановления напряжения сети напряжение звена постоянного тока «запирает» АБ посредством диода VD1 и питание двигателя осуществляется в штатном режиме.

При исследовании было важно экспериментально проверить возможность заряда накопителя при использовании тормозного модуля ПЧ в режиме опускания груза. В этом режиме, когда АД является генератором, напряжение на конденсаторе звена постоянного тока начинает расти. Когда уровень этого напряжения достигает некоторого заданного значения (имеется соответствующий параметр в типовом ПЧ), ключ тормозного модуля ПЧ начинает периодически подключать АБ к звену постоянного тока на время порядка 1 мс. Причем в течение этого импульса ток заряда АБ не должен превышать предельного зарядного тока АБ, что обеспечивается последовательно включенным дросселем  $L$ .

На рис. 6 приведены экспериментальные осциллограммы, снятые в режиме работы электропривода с неизменным тормозным моментом. Были зафиксированы напряжение на звене постоянного тока и ток заряда АБ. Отчетливо видно, что подключение АБ к конденсатору звена постоянного тока через тормозной модуль ПЧ в данном случае длится 1 мс и повторяется с периодом 20 мс. Характер нарастания тока заряда и его уменьше-

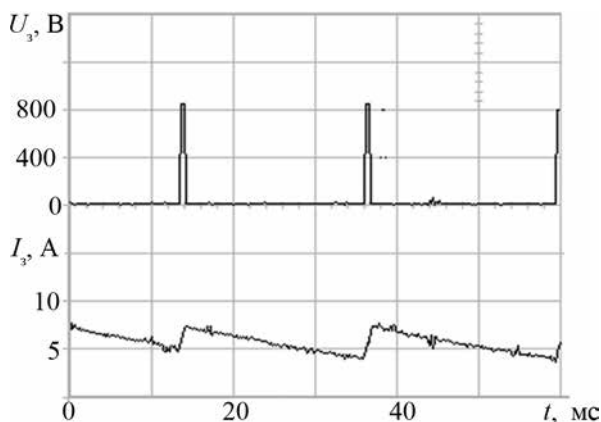


Рис. 6. Осциллограммы процесса заряда накопителя

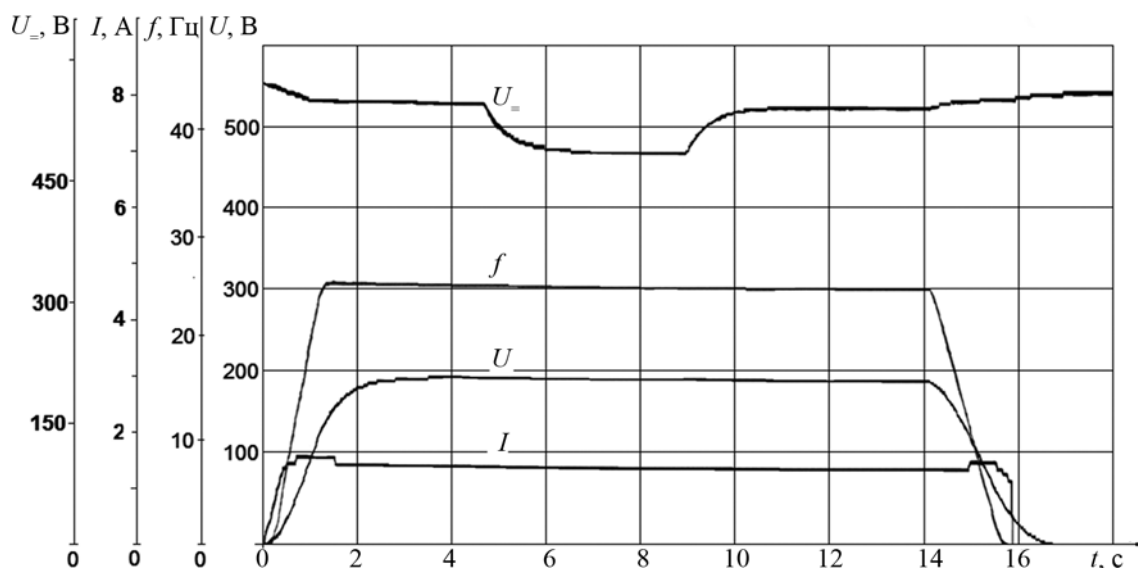
ния отличаются из-за сглаживающего действия индуктивности  $L$ . Эксперименты показали, что, как и следовало ожидать, период следования импульсов напряжения варьируется в зависимости от мощности торможения (тормозного момента и скорости «опускания» груза).

Проведен цикл экспериментов по исследованию функционирования предлагаемой системы электропривода в режимах отключения и включения сетевого питания. Примеры осциллограмм, полученных в результате этих лабораторных экспериментов, приведены на рис. 7. В экспериментах фиксировали мгновенные изменения четырех переменных (в порядке расположения осей на осциллограммах рис. 7): напряжения на конденсаторе звена постоянного тока ПЧ; тока статора двигателя, частоты напряжения на статоре двигателя и линейного напряжения на фазах статора.

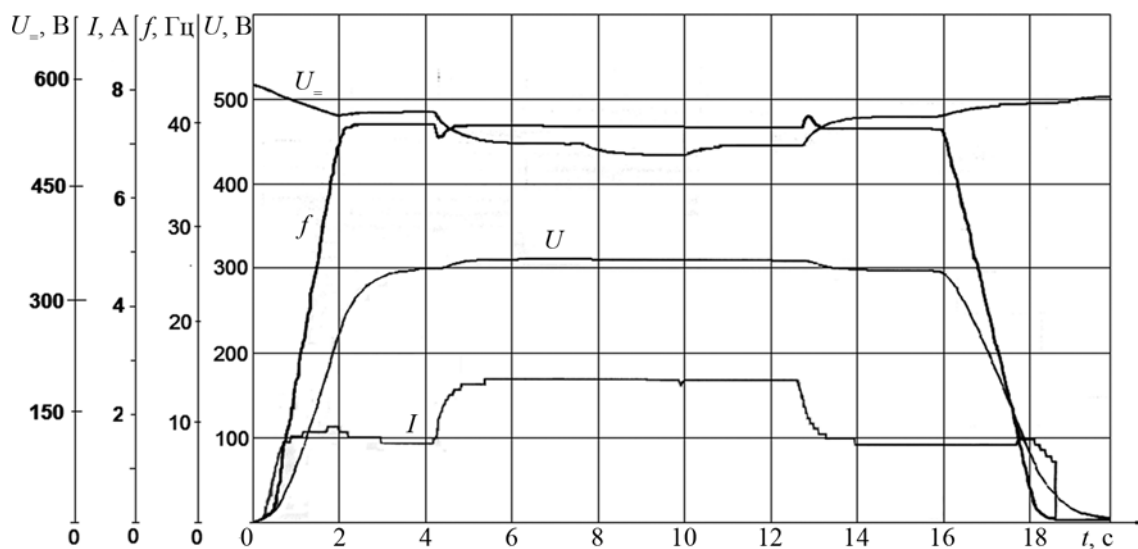
Осциллограмма на рис. 7, а отражает результаты эксперимента, проведенного в такой последовательности. Двигатель запущен до частоты 25 Гц, процесс закончился за 1,5 с. Далее через 4,5 с проведено отключение питающей сети, и двигатель переходит на работу от АБ. После девятой секунды эксперимента вновь подключается питающая сеть, а после 14-й секунды привод останавливается. Осциллограмма демонстрирует, что при отключении напряжения сети претерпевает изменение только напряжение звена постоянного тока ПЧ, которое уменьшается до значения напряжения АБ, а при включении напряжения сети это напряжение вновь увеличивается до значения выходного напряжения неуправляемого выпрямителя ПЧ.

На осциллограмме рис. 7, б представлены результаты эксперимента, в котором присутствует следующий ряд последовательных динамических процессов: частотный пуск двигателя на холостом ходу до 40 Гц при питании от сети, приложение номинальной нагрузки, выключение напряжения сети и работа электропривода от АБ, подключение напряжения сети и отключение АБ, сброс нагрузки и останов двигателя.

Разгон двигателя до частоты 40 Гц происходит приблизительно за 2 с, после чего двигатель работает в установившемся режиме. Приложение номинальной нагрузки начинается через 4 с после пуска, при этом растет ток двигателя, немного увеличивается его напряжение (включено векторное управление приводом), происходит незначительная просадка частоты и уменьшается напряжение звена постоянного тока. Через 7,5 с после пуска двигателя отключается питающая сеть и двигатель переходит на работу от АБ. Это видно по процессу уменьшения напряжения звена постоянного тока до значения напряжения АБ. Напряжение АБ специально выбрано несколько меньше напряжения звена постоянного тока при питании ПЧ от сети, чтобы наглядно зафиксировать этот режим работы, так как другие зафиксированные на осциллограмме па-



а



б

Рис. 7. Осциллограммы тестовых экспериментов

раметры системы при этом не меняются. Далее через 9,5 с проводится включение напряжения сети, как следствие, отключается АБ. После 12 с снимается нагрузка, а после 15 с дается команда на останов двигателя.

В целом экспериментальные исследования продемонстрировали хорошую работоспособность рассматриваемой системы электропривода с бесперебойным питанием и возможность эффективного использования тормозной энергии.

### Заключение

По результатам проведенной работы можно заключить, что предложенное усовершенствование системы частотно-регулируемого электропривода применительно к механизмам подъема обладает комплексом следующих ценных качеств:

- обеспечивает расчетный режим бесперебойного питания при аварийном отключении сети;
- для заряда резервного источника электрического питания не используется энергия из сети;
- при работе механизма непрерывно осуществляется полезное использование энергии, генерируемой асинхронным двигателем в режиме торможения опускаемого груза;
- в схеме накопления генерируемой энергии торможения используется стандартный тормозной модуль, которым оснащено большинство серийных преобразователей частоты, что снижает капитальные затраты на реализацию системы.

В заключение следует подчеркнуть перспективность развития предложенного решения с применением накопителей другого типа при сохранении общей концепции.

---

**Литература**


---

1. **Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов В.Н.** Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. М.: Академия, 2007.

2. **De Lattre F.** Advances in Energy Storage for Mission Critical Applications [Электрон. ресурс] <http://ieeep.ph/wp-content/uploads/2016/02/Advances-in-Energy-Storage-for-Mission-Critical-Applications.pdf> (дата обращения 01.02.2017)

3. **Bonitron.** Ultracapacitor Solutions [Официальный сайт], URL: [http://www.bonitron.com/PDFs/Brochures/UltraCaps\\_091027\\_20140424.pdf](http://www.bonitron.com/PDFs/Brochures/UltraCaps_091027_20140424.pdf) (дата обращения 16.04.2017)

4. **Yongming Bian, Lijing Zhu, Xinming Xu.** Regenerative Brake System in Electric Hoist with Ultracapacitor // Proc Intern. Conf. Electrical and Control Eng. 2010. Pp. 4571—4575.

5. **Пат. № 153822 РФ.** Энергосберегающий электропривод с аккумулярованием рекуперированной энергии и устойчивостью к потере сетевого питания / А.Н. Ладыгин, Д.Д. Богаченко, Н.А. Ладыгин, В.В. Холин // Бюл. изобрет. 2015. № 22.

6. **Звонарев Е.** До 2000 циклов «заряд-разряд»: литий-железофосфатные аккумуляторы ЕЕМВ // Новости электроники. 2012. № 2. С. 41—44.

7. **Калачев А., Калужный И.** Литий-железофосфатные АКБ ЕЕМВ — достаточно в два раза меньшей емкости // Новости электроники. 2016. № 4. С. 11—16.

---

**References**


---

1. **Belov M.P., Novikov V.A., Rassudov V.N.** Avtomatizirovanny Elektropriwod Tipovyh Proizvodstvennyh Mekhanizmov i Tekhnologicheskikh Kompleksov. M.: Akademiya, 2007. (in Russian).

2. **De Lattre F.** Advances in Energy Storage for Mission Critical Applications [Elektron. Resurs] <http://ieeep.ph/wp-content/uploads/2016/02/Advances-in-Energy-Storage-for-Mission-Critical-Applications.pdf> (Data Obrashcheniya 01.02.2017)

3. **Bonitron.** Ultracapacitor Solutions [Ofits. Sayt], URL: [http://www.bonitron.com/PDFs/Brochures/UltraCaps\\_091027\\_20140424.pdf](http://www.bonitron.com/PDFs/Brochures/UltraCaps_091027_20140424.pdf) (Data Obrashcheniya 16.04.2017)

4. **Yongming Bian, Lijing Zhu, Xinming Xu.** Regenerative Brake System in Electric Hoist with Ultracapacitor. Proc Intern. Conf. Electrical and Control Eng. 2010:4571—4575.

5. **Pat. № 153822 RF.** Energosberegayushchiy Elektropriwod s Akkumulirovaniem Rekuperiruemoy Energii i Ustoychivost'yu k Potere Setevogo Pitaniya / A.N. Ladygin, D.D. Bogachenko, N.A. Ladygin, V.V. Holin. Byul. Izobret. 2015;22. (in Russian).

6. **Zvonarev E.** Do 2000 Tsiklov «Zaryad-Razryad»: Lityi-zhelezofosfatnye Akkumulyatory EEMV. Novosti Elektroniki. 2012;2:41—44. (in Russian).

7. **Kalachev A., Kalyuzhnyy I.** Lityi-zhelezofosfatnye АКБ ЕЕМВ — Достаточно в Два Raza Men'shey Emkosti. Novosti elektroniki. 2016;4:11—16. (in Russian).

---

**Сведения об авторах**


---

**Ладыгин Анатолий Николаевич** — кандидат технических наук, профессор кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», e-mail: [LadygunAN@mpei.ru](mailto:LadygunAN@mpei.ru)

**Богаченко Дмитрий Дмитриевич** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ»

**Ладыгин Николай Анатольевич** — аспирант кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ»

**Холин Владимир Васильевич** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ»

---

**Information about authors**


---

**Ladygin Anatoliy N.** — Ph.D. (Techn.), Professor of Electric Drives Dept., NRU MPEI, e-mail: [LadygunAN@mpei.ru](mailto:LadygunAN@mpei.ru)

**Bogachenko Dmitriy D.** — Ph.D. (Techn.), Senior Researcher of Electric Drives Dept., NRU MPEI

**Ladygin Nikolay A.** — Ph.D.-student of Electric Drives Dept., NRU MPEI

**Kholin Vladimir V.** — Ph.D. (Techn.), Senior Researcher of Electric Drives Dept., NRU MPEI

*Статья поступила в редакцию 20.07.2017*