

ских фундаментальных исследованиях с обеспечением после автоматизированной регистрации записи базы данных на жестких носителях может существенно подвигнуть учащихся к творческим исследованиям.

Список использованных источников

1. L. Nefediev The Use of Digital Laboratory Work in Quantum Physics in the Process of Learning Physics Teachers / Nefediev L., Garnaeva G., Shigapova E., Nizamova E. // VI International Forum on Teacher Education. Proceedings IFTE-2020, 1767 – 1777. doi:10.3897/ap.2.e1767.
2. Laboratory Multipurpose Measuring Complex for Development and Teaching of pupils - *L-micro* ® computer laboratory complex for remote student training. Educational equipment: General and special education equipment.

УДК 62-835

Дайнеко В.А., к.т.н., доцент, Денисик А.С., магистрант
Белорусский государственный аграрный технический университет,
г. Минск

МОДУЛИ РЕКУПЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПРОМЫШЛЕННЫХ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ

В промышленных и сельскохозяйственных технологиях существуют процессы, позволяющие использовать рекуперацию механической энергии (РЭ). Принцип рекуперации заключается в возвращении (повторном использовании) энергии, которая в обычных условиях рассеивается в виде тепла при торможении или остановке механизмов. РЭ позволяет преобразовать кинетическую энергию в электрическую и направить ее обратно в сеть или аккумулировать для последующего использования. При этом электродвигатель работает в четвертом квадранте механической характеристики, или в режиме генераторного рекуперативного торможения [1].

В частотно-регулируемом электроприводе, содержащем преобразователь частоты (ПЧ) со звеном постоянного тока, неуправляемый выпрямитель не пропускает энергию рекуперативного торможения от ЭД к питающей сети. Для

ограничения возрастания напряжения на конденсаторе звена постоянного тока в схеме ПЧ применяют тормозные резисторы, на которых рассеивается энергия торможения в виде тепла [2]. Тормозные резисторы применялись везде, где имела место высокая инерция нагрузки, например, в подъемных механизмах, лифтах, центрифугах, на электротранспорте, на нагрузочных стендах и т. п. В таких механизмах энергоэффективным решением является возврат генерируемой ЭД электроэнергии в питающую сеть, но стоимость и сложность регулируемого ЭП значительно возрастают.

Проекты реализации рекуперативного торможения показывают высокую эффективность его применения для машин с суммарной мощностью электроприводов 90 кВт и более. Средний срок окупаемости разницы в стоимости оборудования составляет 1,5-2 года. Учитывая срок службы оборудования в 15 и более лет, можно говорить о значительной окупаемости вложенных в систему управления средств. Замена традиционных тормозных резисторов и модулей, снижение тепловыделения, возврат более 95% регенеративной энергии обратно в сеть дает очевидный эффект энергосбережения. При этом коэффициент гармоник во входном токе не превышает 4%, а коэффициент мощности приближается к единице при номинальной нагрузке. Реализуется работа частотно-регулируемого привода в 4-х квадрантах и обеспечивается постоянство напряжения в звене постоянного тока вне зависимости от колебаний сетевого напряжения

Примеры применения рекуперативного электропривода: подъемно-транспортное оборудование, электродвигатели работают в четырех квадрантах (до 60% потребляемой электроэнергии, может быть возвращено в электросеть путем рекуперативного торможения и отказа от использования тормозных сопротивлений); центрифуги, насосы, вентиляторы с большими моментами инерции; транспортные системы с параллельным соединением шин постоянного тока преобразователей частоты; механизмы с быстрым торможением – станки и испытательные стены; транспортеры и конвейеры; прессы и штамповочное оборудование.

Для эффективной рекуперации энергии в промышленных и сельскохозяйственных приводах применяются различные технологии преобразования механической энергии в электрическую: *электромеханическое преобразование* – наиболее распространенный метод, при котором электродвигатель работает в генераторном режиме. *Системы рекуперации с общей шиной постоянного тока* позволяют на-

прямую использовать энергию тормозящих приводов другими электроприводами. Использование маховиков позволяет запасать механическую энергию, а применение суперконденсаторов – кратковременно хранить рекуперированную электроэнергию.

Применение модулей рекуперации является оптимальным решением для различных типов приводов с регенерацией энергии.

Принцип работы модулей рекуперации (регенераторов энергии). Входным каскадом простого (нерекуперативного) привода переменного тока обычно является неуправляемый диодный выпрямитель, поэтому мощность нельзя возвращать в источник переменного тока. В результате замены входного диодного выпрямителя на входной преобразователь с ШИМ источником поток мощности переменного тока может течь в любую сторону с полным управлением током и коэффициентом мощности. Можно получить почти единичный коэффициент мощности и низкий уровень гармоник в сетевом напряжении.

В случае работы модуля в режиме рекуперации, каскад IGBT работает как синусоидальный выпрямитель, преобразующий переменный ток в управляемое постоянное напряжение. Более того, если напряжение звена постоянного тока удерживать выше пикового напряжения питания, то двигатель сможет работать на более высокой скорости без ослабления поля.

Для обеспечения минимального импеданса источника нужно использовать индуктивности рекуперации; выбор их параметров описывается в заводских руководствах по эксплуатации. Разница напряжений между фазным напряжением ШИМ и сетевым напряжением питания прикладывается к индуктивностям рекуперации в приводе рекуперации. Это напряжение содержит много высокочастотных гармоник, которые блокируются индуктивностью, в результате в этих индуктивностях протекает синусоидальный ток с малой примесью высших гармоник.

На векторной диаграмме (рис.1) показано соотношение между питающим напряжением U_s и напряжением привода рекуперации U_r . При полной нагрузке угол между этими векторами напряжений равен примерно 5° , что дает почти единичный коэффициент мощности величиной 0.996. Направление потока энергии относительно напряжения питания можно изменить малыми изменениями выходного напряжения и фазы привода рекуперации. На рис. 1. $j\omega L_r$ – напряжение на индукторе рекуперации.

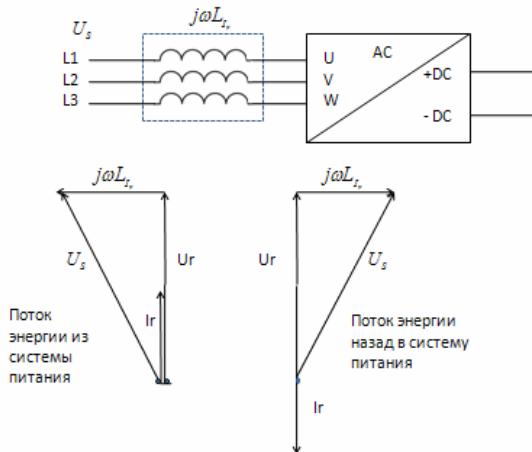


Рис.1. Векторная диаграмма рекуперации

Для синхронизации привода рекуперации с сетью не нужна дополнительная аппаратура. Модулятор пространственного вектора в приводе рекуперации всегда работает соответственно углу и амплитуде переменного электропитания при условии правильной настройки при первом включении.

Конфигурации системы рекуперации. Привод рекуперации позволяет подавать регулируемое напряжение постоянного тока на другие моторные приводы. Он обеспечивает двусторонний поток энергии с синусоидальными токами и почти единичным коэффициентом мощности.

Для привода рекуперации возможны три конфигурации: один рекуперации, один моторный (Рис. 2); один рекуперации, несколько моторных; рекуперация вместо тормозного резистора.



Рис.2. Вариант конфигурация привода: один- рекуперации, один – моторный

При определении мощностей компонентов системы рекуперации нужно учитывать: сетевое напряжение номинальный ток дви-

гателя, номинальное напряжение и коэффициент мощности, а также максимальную мощность нагрузки и условия перегрузки. В общем случае при проектировании системы рекуперации выбирают приводы рекуперации и моторный с равными номинальными токами. В многоприводных конфигурациях привод рекуперации должен быть достаточного габарита для подачи суммарной пиковой мощности, требуемой для всех нагрузок моторных приводов с учетом потерь в приводах. Если привод рекуперации не сможет рекуперировать полную мощность от моторного привода в шину звена постоянного тока, он отключится по превышению напряжения на шине постоянного тока.

Список использованной литературы

1. www.controltechniques.com – Руководство по рекуперации. Дата доступа: 22.10.2025.
2. Рекуперация электроэнергии с помощью блока торможения и матричного преобразователя частоты. – ИСУП – №2(104) – 2023 – С. 54–57.

УДК 621.365.683.9

Рутковский И.Г., к.т.н., Слыши И.А., студент
*Белорусский государственный аграрный технический университет,
г. Минск*

ЭЛЕКТРОТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ СРЕД СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Для тепловых нужд, как в промышленных технологических процессах, так и в коммунально-бытовом секторе широко используется электрическая энергия. В современном сельскохозяйственном производстве электронагрев широко применяется для пастеризации и стерилизации, подогрева и сушки различных сред, для создания необходимых температурных режимов животным и растениям. Он является незаменимым элементом современных технологий производства сельскохозяйственной продукции. При этом потребление тепловой энергии во многих с.-х. технологических процессах достигает 60 %...80 % по сравнению с другими видами энергии. Кроме того потребление электрической энергии в сельском хозяйстве для тепловых нужд возрастает в связи с ее известными преимуществами.