

УДК 621.313.8:681.5

***Гибадулин Руслан Рашитович,
студент, 4 курс, Институт цифровых интеллектуальных систем,
направления подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических
процессов и производств»
ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»***

Россия, г. Москва

***Сидоренко Максим Сергеевич,
студент, 4 курс, Институт цифровых интеллектуальных систем
направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»
ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»***

Россия, г. Москва

***Колесников Евгений Александрович,
студент, 4 курс, Институт цифровых интеллектуальных систем
направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»
ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»***

Россия, г. Москва

СИСТЕМА РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ В МНОГОПРИВОДНОМ МЕХАТРОННОМ ОБОРУДОВАНИИ

Аннотация. Рассматривается построение системы рекуперации энергии в многоприводном мехатронном оборудовании, содержащем несколько регулируемых электроприводов с чередованием двигательных и генераторных режимов. Предложена архитектура с общей шиной постоянного тока, позволяющая передавать энергию тормозящих осей приводам, одновременно работающим в двигательном режиме, а при наличии избытка мощности — возвращать ее в питающую сеть через активный сетевой преобразователь. Сформированы энергетический баланс, алгоритм управления напряжением звена постоянного тока и критерии выбора между

внутренним энергообменом, сетевой рекуперацией и динамическим торможением. Приведен расчетный пример многокоординатного станочного модуля. Рассмотрены ограничения по напряжению, мощности, совместимости преобразователей и безопасности.

Ключевые слова: рекуперация энергии, мехатронное оборудование, многоприводная система, сервопривод, общая шина постоянного тока, активный выпрямитель, энергоэффективность.

Annotation: An energy recovery system for multi-drive mechatronic equipment with alternating motoring and generating drive modes is considered. A common DC-bus architecture is proposed to transfer braking energy to simultaneously motoring axes and, when regenerative power exceeds internal demand, to return excess energy to the supply grid through an active front end. Energy balance, DC-link voltage control and operating-mode selection are described. A calculation example for a multi-axis machine module is presented without claiming physical experiments.

Key words: energy recovery, mechatronic equipment, multi-drive system, servo drive, common DC bus, active front end, energy efficiency.

Современное мехатронное оборудование часто содержит несколько координатных сервоприводов, шпиндель, привод смены инструмента, поворотные и вспомогательные оси. В течение одного технологического цикла часть двигателей ускоряется и потребляет электрическую энергию, тогда как другие замедляются под действием кинетической или потенциальной энергии механизма и переходят в генераторный режим.

В соответствии с ГОСТ ИЕС 61800-1-2023 рекуперацией является режим, при котором электропривод преобразует механическую мощность вращения вала в электрическую и возвращает ее в систему питания [1]. Если преобразованная энергия вместо полезного использования рассеивается на тормозном резисторе, имеет место динамическое торможение.

Для одиночного привода тормозной резистор является простым способом ограничения напряжения звена постоянного тока. В многоприводном объекте такое решение может быть энергетически нерациональным: в тот же момент другая ось способна потреблять мощность. Поэтому объединение преобразователей по общей шине постоянного тока создает возможность внутреннего обмена энергией без промежуточного возврата в сеть.

Особенно выражен эффект в оборудовании с частыми разгонами, торможениями и реверсами: порталных системах, роботизированных комплексах, станках с высокودинамичными подачами, подъемно-транспортных механизмах и испытательных стендах.

Таблица 1.

Характер энергетических режимов приводных осей

Режим оси	Знак механической мощности	Энергетическое состояние
Разгон/рабочее движение	$P_{\text{мех}} > 0$	Потребление энергии
Торможение	$P_{\text{мех}} < 0$	Генераторный режим
Удержание	$P_{\text{мех}} \approx 0$	Потери и питание управления
Одновременная работа осей	Разные знаки	Возможен внутренний энергообмен

Предлагаемая силовая структура включает индивидуальные инверторные модули приводных осей, объединенные общей DC-шиной, емкостное звено, активный сетевой преобразователь и резервный тормозной модуль. Звено постоянного тока в преобразователях содержит фильтрующие элементы, включая конденсаторы и при необходимости реакторы [2].

При торможении одной оси энергия поступает в DC-шину и вызывает тенденцию к росту напряжения U_{dc} . Если одновременно другая ось работает в двигательном режиме, ее инвертор отбирает эту энергию. Такой обмен происходит внутри силовой системы и уменьшает поток мощности через сетевой преобразователь.

Если суммарная генераторная мощность превышает текущее потребление остальных осей и собственные потери, активный сетевой преобразователь формирует обратный поток мощности в сеть. Тормозной

резистор сохраняется как резервный канал при аварийном превышении напряжения либо недоступности сетевой рекуперации.

Для промышленной реализации требуется согласованность преобразователей по допустимому напряжению DC-шины, алгоритм предварительного заряда емкостей, защита от короткого замыкания и контролируемое отключение отдельных модулей.

Таблица 2.

Функциональные элементы системы рекуперации

Элемент	Функция	Контролируемая величина
Активный сетевой преобразователь	Питание и возврат избытка энергии	Udc, ток сети
DC-шина	Общий энергетический канал	Udc
Инверторы осей	Двухсторонний обмен с двигателями	Ток, момент, скорость
Емкостное звено	Буферизация энергии	Напряжение, температура
Тормозной модуль	Аварийное рассеяние избытка	Udc, температура резистора

Механическая мощность i -й оси определяется как $P_i = M_i \cdot \omega_i$. При одинаковых знаках момента и скорости двигатель потребляет мощность, при противоположных — отдает ее. С учетом КПД преобразования электрическая мощность каждой оси отличается от механической на величину потерь.

Для общей DC-шины баланс можно представить как $C_{dc} \cdot U_{dc} \cdot dU_{dc}/dt = \Sigma P_{reg,i} - \Sigma P_{mot,j} - P_{loss} - P_{grid} - P_{br}$, где P_{reg} - мощности генераторных осей, P_{mot} - мощности двигательных осей, P_{loss} - потери, P_{grid} - мощность, возвращаемая в сеть, P_{br} - мощность тормозного резистора.

Если правая часть положительна, энергия накапливается в конденсаторах и U_{dc} возрастает. Управляющая задача активного сетевого преобразователя состоит в поддержании U_{dc} около заданного уровня путем изменения P_{grid} . Внутренний обмен между осями при этом имеет естественный приоритет, поскольку не требует дополнительного двойного преобразования через сеть.

Энергия, запасенная в емкости DC-звена, равна $W_{dc} = C_{dc} \cdot U_{dc}^2 / 2$. Допустимый диапазон напряжения ограничивает количество энергии, которое

можно кратковременно принять без включения сетевой рекуперации или тормозного резистора.

Таблица 3.

Логика управления энергетическими потоками

Состояние баланса	Изменение U_{dc}	Управляющее действие
$\Sigma P_{reg} < \Sigma P_{mot} + \text{потери}$	Снижение	Потребление из сети
$\Sigma P_{reg} \approx \Sigma P_{mot} + \text{потери}$	Стабильно	Внутренний обмен
$\Sigma P_{reg} > \Sigma P_{mot} + \text{потери}$	Рост	Рекуперация в сеть
$U_{dc} > U_{авар}$	Опасный рост	Тормозной резистор/останов

Контроллер энергетического уровня циклически получает фактические моменты и скорости осей, напряжение DC-шины, состояние активного выпрямителя и температуру тормозного модуля. На основании этих данных оценивается суммарная мощность.

На первом уровне не требуется специально перераспределять энергию между отдельными инверторами: при общей электрической шине двигательная ось естественно потребляет мощность, поступившую от тормозящей оси. Контроллер обеспечивает допустимый уровень U_{dc} и ограничения отдельных модулей.

При U_{dc} ниже верхней границы активный выпрямитель может работать в режиме минимального сетевого обмена. При приближении к U_{rec} включается регулятор возврата мощности в сеть. Если напряжение продолжает расти либо сетевой канал недоступен, при U_{br} активируется тормозной ключ.

Для исключения частых переключений вводится гистерезис порогов. Аварийный U_{trip} должен быть ниже предельно допустимого напряжения силовых модулей. После срабатывания защиты выполняется согласованное торможение осей с учетом возможности дальнейшего поступления энергии от механизма.

- 1) измерение U_{dc} , M_i и ω_i ;
- 2) расчет P_i и суммарного энергетического баланса;
- 3) использование внутреннего обмена между осями;

4) при избытке энергии — команда активному сетевому преобразователю;

5) при превышении резервного порога — включение тормозного резистора;

6) при аварийном U_{dc} — безопасный останов и блокировка повторного пуска.

Рассмотрим расчетный режим, не являющийся результатом натурального эксперимента. В течение интервала 0,8 с ось X тормозит и генерирует 6 кВт, ось Y одновременно ускоряется и потребляет 3,5 кВт, привод поворотного стола потребляет 1,0 кВт. Суммарные потери силовой системы примем 0,5 кВт.

Таблица 4.

Расчетный баланс мощности в интервале торможения

Поток мощности	Значение, кВт	Направление
Ось X	6,0	В DC-шину
Ось Y	3,5	Из DC-шины
Поворотная ось	1,0	Из DC-шины
Потери	0,5	Рассеяние
Остаток	1,0	В сеть/накопление

Без общей шины энергия торможения оси X в значительной степени должна быть рассеяна локальным тормозным резистором. При объединенной шине 4,5 кВт непосредственно используются другими приводами и еще 0,5 кВт покрывают потери. Только остаточные 1,0 кВт требуется вернуть в сеть или кратковременно накопить.

За 0,8 с генерируемая механическая энергия оси X составляет 4,8 кДж. Внутренне полезно используется около 3,6 кДж на двигательные оси и 0,4 кДж соответствует принятым потерям; остаток порядка 0,8 кДж приходится на сетевую рекуперацию или буфер.

Пример показывает важное свойство многоприводной архитектуры: эффективность определяется не только способностью отдельного двигателя генерировать энергию, но и временным совпадением двигательных и тормозных режимов разных осей.

Для оборудования с редкими торможениями и небольшой энергией экономически оправданным может оставаться тормозной резистор. При частых циклах и нескольких осях общая DC-шина позволяет использовать энергию внутри машины. Сетевой активный преобразователь целесообразен, когда внутреннее потребление не способно регулярно принять весь генераторный поток.

ГОСТ 30533-97 предусматривает в составе электропривода устройство рекуперации при необходимости и выделяет электроприводы с рабочим рекуперативным торможением [3]. Это подтверждает необходимость рассматривать рекуперацию как часть общей силовой и защитной архитектуры, а не как отдельную программную функцию.

При выборе активного преобразователя его мощность определяется максимальным ожидаемым обратным потоком с учетом коэффициента одновременности. Номинал не обязательно равен сумме мощностей всех приводов, если технологический цикл исключает их одновременное торможение. Однако такой вывод должен подтверждаться энергетической диаграммой реального цикла.

Общая шина требует проверки допустимых пусковых токов заряда конденсаторов. В многоприводных системах применяют контролируемый предварительный заряд, поскольку параллельно подключенные емкости могут создавать значительный бросок тока.

Таблица 5.

Сравнение вариантов использования энергии торможения

Конфигурация	Преимущество	Недостаток
Локальные тормозные резисторы	Простота	Энергия рассеивается в тепло
Общая DC-шина	Внутренний обмен энергии	Требуем совместимых приводов
DC-шина + активный выпрямитель	Возврат избытка в сеть	Более сложная силовая часть
DC-шина + накопитель	Сглаживание пиков	Стоимость и ресурс накопителя

Система рекуперации должна диагностировать перенапряжение ДС-шины, отказ сетевого преобразователя, перегрев тормозного резистора, превышение тока и потерю связи с приводами. Для каждого отказа задается безопасная реакция, учитывающая механическую энергию движущихся масс.

При отключении сети активный выпрямитель теряет возможность возвращать энергию наружу. Если механизм продолжает торможение, резервный резистор либо иной приемник энергии становится необходимым для предотвращения роста U_{dc} . Поэтому отказоустойчивость нельзя строить только на сетевой рекуперации.

В актуальной серии стандартов IEC 61800 отдельно рассматриваются требования к регулируемым силовым электроприводам, а также электрическая, тепловая и энергетическая безопасность [4]. Для конкретного станка дополнительно применяются требования безопасности соответствующего оборудования.

Диагностические данные целесообразно передавать в ЧПУ: рекуперируемая энергия за цикл, максимальное U_{dc} , время работы тормозного резистора и мощность обмена между приводами. Эти показатели позволяют выявлять неэффективные режимы движения и оптимизировать профили ускорения.

Таблица 6.

Защитные состояния энергетического контура

Событие	Реакция системы
Рост U_{dc} до U_{rec}	Увеличить возврат мощности в сеть
$U_{dc} > U_{br}$	Включить тормозной канал
Отказ активного выпрямителя	Запрет сетевой рекуперации, резервное торможение
Перегрев резистора	Ограничить повторные торможения
$U_{dc} > U_{trip}$	Аварийный согласованный останов

Эффективность рекуперации следует оценивать по энергетическому балансу полного технологического цикла. Вводится энергия, потребленная из сети W_{in} , энергия, возвращенная в сеть W_{grid} , энергия внутреннего обмена W_{int} и энергия, рассеянная на тормозных резисторах W_{br} .

Полезный коэффициент использования генераторной энергии можно определить, как $\eta_{rec}=(W_{int}+W_{grid})/W_{gen}$, где W_{gen} — суммарная электрическая энергия, поступившая от тормозящих приводов в DC-шину. Значение ниже единицы обусловлено потерями и режимами, когда принять энергию невозможно.

Внутренний обмен имеет дополнительное преимущество: энергия проходит меньше ступеней преобразования, чем при последовательном возврате в сеть и последующем потреблении другой осью. Поэтому алгоритм не должен искусственно форсировать сетевую отдачу, пока имеется одновременный внутренний потребитель.

Методики выбора способа использования рекуперативной энергии в регулируемых электроприводах рассматривают энергетические процессы в звене постоянного тока и связь напряжения конденсатора с режимами работы системы [5]. Для современного многоприводного объекта эти положения дополняются учетом временного профиля нескольких осей.

Экономический эффект зависит от числа циклов, величины движущихся масс, времени торможения, стоимости активного сетевого модуля и тарифов на электроэнергию. Поэтому универсальное утверждение о сроке окупаемости некорректно; он должен рассчитываться для конкретного оборудования.

В заключение, разработана структура системы рекуперации энергии для многоприводного мехатронного оборудования. Основой является общая шина постоянного тока, объединяющая инверторные модули осей и позволяющая использовать генераторную энергию тормозящих приводов другими приводами машины.

При избытке генераторной мощности предложено возвращать энергию в сеть через активный сетевой преобразователь. Тормозной резистор сохраняется как резервный элемент защиты от перенапряжения. Сформирован энергетический баланс и алгоритм координации режимов по напряжению DC-шины.

Расчетный пример показывает, что при одновременном торможении одной оси и разгоне других значительная часть энергии может быть перераспределена внутри оборудования. Для практического проектирования необходим анализ временных диаграмм мощностей, совместимости преобразователей, емкости DC-звена и аварийных сценариев.

Предлагаемая система соответствует задачам мехатроники и автоматизации технологических процессов, поскольку объединяет многокоординатный электропривод, силовую электронику, алгоритмы управления и энергетический мониторинг.

Использованные источники:

1. ГОСТ IEC 61800-1-2023. Системы силовых электроприводов с регулируемой скоростью. Часть 1. Общие требования. Номинальные технические характеристики низковольтных систем электроприводов постоянного тока с регулируемой скоростью.

2. ГОСТ Р МЭК 61800-4-2012. Системы силовых электроприводов с регулируемой скоростью. Часть 4. Общие требования. Номинальные технические характеристики систем силовых приводов переменного тока свыше 1000 В и не более 35 кВ.

3. ГОСТ 30533-97. Электроприводы постоянного тока общего назначения. Общие технические требования.

4. ГОСТ IEC 61800-5-1-2019. Системы силовых электрических приводов с регулируемой скоростью. Часть 5-1. Требования безопасности. Электро-, тепло- и энергобезопасность.

5. Борисов П. А., Томасов В. С. Методика выбора способа использования энергии рекуперации в системах электропривода постоянного тока с ШИП // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2005. Т. 5. № 4.

6. Контрольно-испытательный стенд с дистанционным управлением для исследования частотно-регулируемых систем электроприводов,

объединенных по сети постоянного тока: патент РФ на полезную модель № 132567.