

Омельченко Е.Я., Белый А.В., Енин С.С., Фомин Н.В.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ СТЕНДЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Актуальность работы: все электрические двигатели после изготовления должны пройти испытания на нагревание методом механического нагружения при продолжительном, кратковременном, повторно-кратковременном режимах. Дополнительно для регулируемых электроприводов проводятся испытания для снятия рабочих характеристик двигателей при номинальной, повышенной и пониженной скоростях вращения. Испытания для двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей, используемых в промышленности, выполняются на испытательных стендах мощностью 1 МВт и больше. Время испытания каждого двигателя составляет несколько часов, поэтому снижение электрических потерь и повышение энергоэффективности испытательных стендов является актуальной научно-практической задачей. Целью является изучение работы испытательных стендов по системам ТП-Д и ПЧ-АД, вывод уравнений для различных режимов работы, анализ электрических потерь и энергоэффективности стендов. Используемые методы: теоретические исследования выполнены с привлечением методов теоретических основ электротехники, теории электрических машин, теории автоматического управления и автоматизированного электропривода. При расчете характеристик испытательных стендов использовался программный пакет Microsoft Office Excel. Новизна: сформулированы показатели регулирования испытательных стендов, для оценки энергоэффективности введены понятия коэффициентов активной и реактивной мощности в функции от механической нагрузки испытательного стенда. Полученные уравнения позволяют оценить энергоэффективность испытательных стендов в зависимости от номинальной мощности двигателей и их механической нагрузки. Результат: в статических режимах работы выведены уравнения для расчета коэффициентов активной и реактивной мощности испытательных стендов по системе ТП-Д и ПЧ-АД, рассчитаны значения коэффициентов в режимах без рекуперации и с рекуперацией энергии, оценены относительные капитальные затраты по стендам. Практическая значимость: при номинальной механической нагрузке испытуемого двигателя Д818 185 кВт в системе ТП-Д применение рекуперации электрической мощности снижает потребление активной мощности стенда в 4,1 раза по сравнению со схемой без рекуперации, а для испытуемого двигателя 4А335М6У3 200 кВт в системе ПЧ-АД в 5,4 раза. Полученные аналитические зависимости позволяют на стадии проектирования оценить энергоэффективность испытательных стендов в зависимости от системы электропривода, мощности двигателя, режима работы и механической нагрузки.

Ключевые слова: электрические двигатели, испытательные стенды, энергоэффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции развития техники связаны со снижением энергетических затрат во всех сферах деятельности, комплексной автоматизацией, направленной на диагностику оборудования и повышение качества технологических процессов и ограничения участия человека в управлении этого процесса [1]. В отечественной промышленности остается актуальной система «тиристорный преобразователь-двигатель» (ТП-Д) для электроприводов прокатных станов, экскаваторов [2] и др. Здесь используются двигатели постоянного тока мощностью от 750 кВт и более. Система «преобразователь частоты-асинхронный двигатель» (ПЧ-АД) начинает занимать ведущие позиции в электроприводах основных агрегатов отечественной промышленности [1, 3]. Для карьерных самосвалов используется система «мотор-колесо». При грузоподъемности 90, 136 и 240 т применяются асинхронные двигатели 450, 500 и 700 кВт соответственно [4]. На карьерном экскаваторе ЭКГ-35 используется система ПЧ-АД разработки «Силовые машины» (г. Санкт-Петербург) с асинхронными двигателями мощностью 400, 500 и 1100 кВт. На буровых станках и буровых установках для системы ПЧ-АД применяются асинхронные короткозамкнутые двигатели мощностью от 50 до 1000 кВт [6].

Все двигатели после изготовления должны пройти испытания [7] на нагревание методом механического нагружения при продолжительном, кратковременном и повторно-кратковременном режимах. Дополнительно для регулируемых электроприводов проводятся испытания для снятия рабочих характеристик двигателей при номинальной, повышенной и пониженной скоростях

вращения. Эти испытания для двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей выполняются на испытательных стендах мощностью 1 МВт и больше. Время испытания составляет несколько часов, поэтому повышение энергоэффективности испытательных стендов является актуальной научно-практической задачей.

Целью является изучение работы испытательных стендов по системам ТП-Д и ПЧ-АД, вывод уравнений для различных режимов работы, анализ электрических потерь и энергоэффективности стендов.

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ СТЕНДЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЕЙ

Испытательный стенд (ИС) включает в себя испытуемый двигатель, нагрузочный двигатель и дополнительное электрооборудование для реализации требований к ИС. Испытуемый и нагрузочный двигатели собираются в электромашинный агрегат. Возможно последовательное соединение выходных валов двигателей, параллельное с клиноременной передачей или через редуктор. На рис. 1 приведена схема взаимодействия исследуемых переменных испытуемого и нагрузочного двигателей. Для поддержания заданной скорости вращения ω двигатель М1 должен развивать электромагнитный момент M_1 , равный моменту сопротивления M_2 нагрузочного двигателя М2 и моменту потерь электромашинного агрегата ΔM_{12} . Момент M_1 задается системой регулирования испытуемого двигателя и может задаваться во времени или зависеть от угловой скорости агрегата. Момент нагрузки M_2 задается системой электропривода нагрузочного двигателя и определяется соответствующей механической характеристикой. Момент потерь ΔM_{12} определяется потерями на трение и вентиляцию электромашинного агрегата и зависит от его угловой скорости.

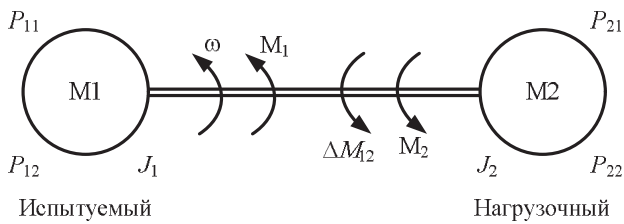


Рис. 1. Схема взаимодействия переменных в электромашинном агрегате

В качестве испытуемого двигателя M1 применяется двигатель, определяющий назначение нагрузочного агрегата. Это могут быть двигатели внутреннего сгорания (бензиновые, дизельные), газотурбинные установки и электрические двигатели постоянного или переменного тока со своими системами регулирования скорости. Нагрузочными двигателями обычно выбираются электродвигатели постоянного или переменного тока. Система электропривода нагрузочного двигателя выбирается в зависимости от механических характеристик испытуемого двигателя и технических требований к нагрузочному агрегату.

Электрическая мощность P_{11} , потребляемая двигателем M_1 из сети или системы регулирования (двигательный режим), за вычетом суммарных потерь ΔP_1 преобразуется в механическую мощность P_{12} на валу двигателя, которая, в свою очередь, расходуется на мощность потерь $\Delta P_{\text{мех}}$ и механическую мощность двигателя M_2 . Электродвигатель M_2 работает в основном в генераторном режиме и преобразует механическую мощность P_{22} за вычетом суммарных потерь ΔP_2 в электрическую мощность P_{21} , которая может передаваться в сеть (режим рекуперации энергии) или расходуется в системе электропривода нагрузочного двигателя.

Электрические машины постоянного тока обладают свойством обратимости, т.е. естественным изменением направления мощности и режимом работы без применения дополнительных элементов. Электромашинный агрегат на основе электродвигателей также обладает свойством обратимости. Будет ли обладать этим свойством нагрузочный агрегат в целом, зависит от конструкции систем электроприводов машин M_1 и M_2 .

Дифференциальное уравнение движения агрегата принимает вид

$$(J_1 + J_2) \frac{d\omega}{dt} = M_1(t, \omega) - M_2(\omega) - \Delta M_{12}(\omega), \quad (1)$$

где J_1 и J_2 – моменты инерции двигателей M_1 и M_2 .

В соответствии с (1) регулирование скорости в переходных процессах достаточно возложить на двигатель M_1 , изменяя во времени соответствующим образом электромагнитный момент M_1 . Более жесткие требования предъявляются к динамичным ИС, когда двигатель M_1 управляется от конкретной системы электропривода и необходимо исследовать его динамические характеристики в пуско-тормозных режимах или в режимах наброса-сброса нагрузки. Нагрузочный двигатель должен в динамике формировать момент сопротивления, имитирующий момент сопротивления рабочего механизма.

В установившемся режиме, при отсутствии динамического момента, момент двигателя M_1 уравновешивается моментом нагрузочного двигателя M_2 и моментом потерь электромашинного агрегата

$$M_1(\omega) = M_2(\omega) + \Delta M_{12}(\omega), \quad (2)$$

причем все составляющие уравнения (2) индивидуально зависят от угловой скорости вращения агрегата.

Процесс исследования механических характеристик испытуемого двигателя заключается в регулировании электромагнитного момента $M_2(\omega)$ и измерении установившихся скорости ω и момента M_1 . Измерение угловой скорости агрегата выполняется с помощью тахогенератора или инкрементального энкодера (импульсный датчик угла поворота).

Измерение электромагнитного момента M_1 можно выполнить:

- косвенным способом по уравнению (2), если известны момент M_2 и зависимость момента потерь от скорости агрегата;
- расчетным способом по измеренным переменным двигателя M_1 ;
- прямым способом с использованием силомоментного датчика между двигателями M_1 и M_2 .

Испытательные стенды со своими системами нагружения могут быть охарактеризованы по показателям регулирования:

1. Диапазон нагружения по скорости. Определяет минимальную и максимальную скорости по отношению к номинальной скорости испытуемого двигателя, при которых возможно нагружение. Дополнительно отмечается возможность реверса угловой скорости.
2. Диапазон нагружения по моменту. Определяет минимальный и максимальный моменты по отношению к номинальному моменту испытуемого двигателя, при которых возможно нагружение. Дополнительно отмечается возможность изменения направления момента.
3. Статическая устойчивость испытательного стенда. Оценивается возможность исследования механических характеристик испытуемого двигателя на его устойчивых и неустойчивых участках характеристик.
4. Плавность регулирования нагрузки. Оценивается количество точек измерения на исследуемой механической характеристике.
5. Энергоэффективность работы испытательного стенда. Коэффициент активной мощности p определяется отношением активной мощности, потребляемой из сети, к механической мощности на валу испытуемого двигателя. Коэффициент реактивной мощности q определяется отношением реактивной мощности, потребляемой из сети, к механической мощности на валу испытуемого двигателя.
6. Капитальные затраты. Оцениваются затраты на изготовление ИС в относительных единицах по отношению к стоимости испытуемого двигателя.
7. Погрешность измерения. Оценивается точность измерения механической характеристики в зависимости от метода измерения и класса точности приборов.
8. Динамичность. Определяется возможность регулирования нагружения в пуско-тормозных режимах и/или в режиме наброса-сброса нагрузки.

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ТП-ДНВ-ДНВ-ТП

Предлагаемый испытательный стенд для двигателей постоянного тока включает в себя два двигателя постоянного тока независимого возбуждения M_1 и M_2 , два реверсивных тиристорных преобразователя UZ1

и UZ2 и электрическую схему подключения обмоток возбуждения двигателей (рис. 2). Якорные обмотки двигателей M_1 и M_2 питаются от тиристорных преобразователей, а сами якоря собраны в электромашинный агрегат постоянного тока. Тиристорные преобразователи подключены к трехфазной сети через токоограничивающие реакторы LR1 и LR2.

Преобразователь UZ1 управляется от системы автоматического регулирования скорости, на вход которой поступают сигнал задания скорости U_{31} и от датчика скорости В1 сигнал обратной связи по скорости U_{OC} . Как вариант, САР скорости может быть реализована в виде системы подчиненного регулирования координат с внутренним контуром регулирования якорного тока M_1 и внешним контуром регулирования скорости. Если САР скорости используется во второй зоне регулирования при скорости выше номинальной, то обмотка возбуждения LM1 будет входить в состав системы регулирования возбуждения, включающей в себя тиристорный возбудитель, внутренний контур регулирования тока возбуждения и внешний контур регулирования ЭДС якорной обмотки M_1 [8]. Реверсивный тиристорный преобразователь UZ1 обеспечивает регулирование как положительной, так и отрицательной скорости. Преобразователь UZ2 управляется от системы автоматического регулирования момента, на вход которой поступает сигнал задания момента U_{32} . Как вариант, САР момента может быть реализована в виде замкнутого контура регулирования якорного тока (момента) M_2 . Обмотка возбуждения LM2 будет входить в состав системы регулирования возбуждения, включающей в себя тиристорный возбудитель, управляемый от регулятора тока возбуждения двигателя M_2 [5, 8]. Реверсивный тиристорный преобразователь UZ2 обеспечивает регулирование как положительного, так и отрицательного момента. За счет обратимости машин и применения реверсивных преобразователей можно регулировать скорость и нагрузку на валу M_2 в 4 квадрантах.

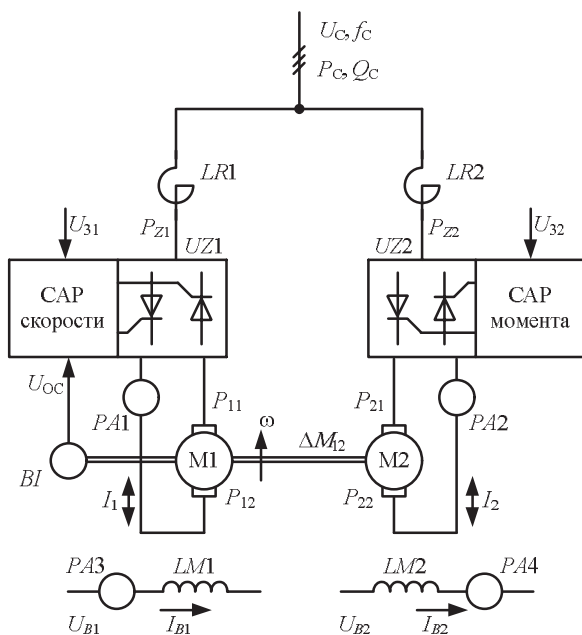


Рис. 2. Принципиальная схема испытательного стенда ТП-ДНВ-ДНВ-ТП

Механические характеристики двигателя M_1 описываются уравнением

$$\omega = U_{31} / K_{OC} - M_1 (R_{я1} + R_{Z1}) / (c_1^2 K_K), \quad (3)$$

где R_{Z1} – внутреннее сопротивление преобразователя UZ1; K_K – коэффициент коррекции статизма, задается в пределах от 1 (статическая САР) до ∞ (астатическая САР).

Механические характеристики двигателя M_2 описываются уравнением

$$M_2 = U_{32} / K_{OM} = M_1 - \Delta M_{12}. \quad (4)$$

Механические характеристики САР скорости при различных напряжениях задания U_{31} рассчитаны по уравнению (3) и представлены на рис. 3 светлыми линиями (статическая система регулирования) и светлой пунктирной линией (астатическая система регулирования). Механические характеристики САР момента при различных напряжениях задания U_{32} рассчитаны по уравнению (4) и представлены на рис. 3 темными линиями. Анализ уравнений (3) и (4) показывает, что в астатической системе регулирования достигается независимое регулирование угловой скорости вращения испытуемого двигателя и его механической нагрузки.

Активная мощность P_{Z1} , потребляемая преобразователем UZ1 из сети, расходуется на потери тиристорного преобразователя ΔP_{Z1} , потери двигателя постоянного тока M_1 ΔP_{M1} и преобразуется в механическую мощность двигателя P_{12} . Далее эта мощность расходуется на мощность механических потерь агрегата ΔP_{12} , на электрические потери M_2 ΔP_{M2} и преобразуется в электрическую мощность P_{21} , которая за вычетом потерь преобразователя UZ2 ΔP_{Z2} возвращается в виде активной мощности P_{22} в сеть. При этом преобразователь UZ1 работает в выпрямительном режиме, двигатель M_1 в двигательном, двигатель M_2 в генераторном, а преобразователь UZ2 работает в инверторном режиме работы. Испытательный стенд работает в режиме рекуперации электрической энергии.

Коэффициенты активной и реактивной мощности испытательного стенда при отсутствии рекуперации равны

$$p_{11} = \frac{1}{\eta_{Z1} \cdot \eta_1} + P_{B1} + P_{B2} / M_1 / \omega_1; \quad (5)$$

$$q_{11} = \sin \alpha_1 / \eta_1,$$

где угол управления тиристорного преобразователя UZ1 $\alpha_1 = \arccos((\omega_1 \cdot c_1 + M_1 \cdot R_A / c_1) / U_{a0})$.

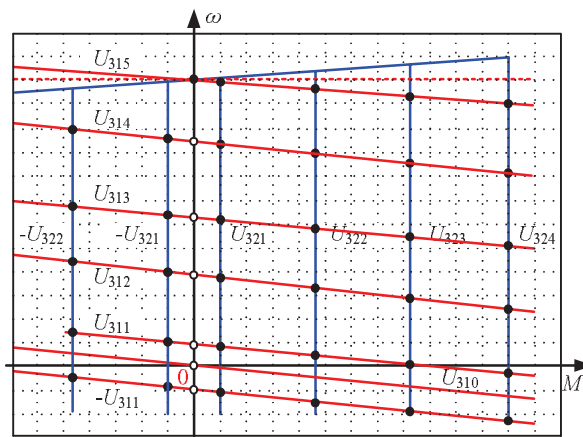


Рис. 3. Механические характеристики стенда ТП-ДНВ-ДНВ-ТП

Коэффициенты активной и реактивной мощности при рекуперации

$$p_{12} = \left(\frac{1}{\eta_{z1} \cdot \eta_1} - \eta_2 \cdot \eta_{z2} \right) + (\Delta P_{12} \cdot \eta_2 \cdot \eta_{z2} + P_{B1} + P_{B2}) / M_1 \cdot \omega_1; \quad (6)$$

$$q_{12} = 2 \cdot \sin \alpha_1 / \eta_1.$$

Пример 1. Рассчитать энергоэффективность испытательного стенда на основе тихоходных двигателей Д818, $U_N=440$ В, $P_{2N}=185$ кВт, $\eta_1=91,9$ %, $P_B=0,01P_{2N}$, $\Delta P_{12}=0,03P_{2N}$.

Решение: Принимаем $\eta_{z1}=\eta_{z2}=97$ %. По формулам (5), (6) при номинальной нагрузке $M_1 \cdot \omega_1 = P_{2N}$ рассчитываем для двух режимов работы (без рекуперации и с рекуперацией) коэффициенты активной мощности $p_{11}=1,142$, $p_{12}=0,277$ и коэффициенты реактивной мощности $q_{11}=0,544$, $q_{12}=1,088$. Вывод: применение рекуперации для испытательного стенда ТП-ДНВ-ДНВ-ТП мощностью 185 кВт снижает потребление активной мощности в 4,1 раза, но увеличивает потребление реактивной мощности в 2 раза.

По испытательному стенду ТП-ДНВ-ДНВ-ТП можно сделать выводы:

- агрегат характеризуется большими диапазонами нагружения по скорости и моменту, высокой экономичностью и может быть рекомендован для испытания двигателей малой, средней и большой мощности со статическими и динамическими режимами нагружения при высокой плавности по скорости и моменту. В качестве испытуемых могут быть использованы двигатели постоянного тока независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения;

- коэффициент активной мощности меньше единицы, потому что механическая мощность двигателя M_2 передается в сеть;

- коэффициент реактивной мощности увеличивается с уменьшением рабочей скорости и превышает единицу, т.к. оба преобразователя потребляют реактивную мощность;

- капитальные затраты оцениваются относительным коэффициентом 6, который включает в себя капитальные затраты на тиристорные преобразователи UZ1 и UZ2 (4) плюс затраты на двигатель M_2 и системы регулирования токов возбуждения M_1 , M_2 (2,0).

Дополнительно, используя высокое быстродействие тиристорных преобразователей [2], можно с помощью системы регулирования преобразователя UZ2 реализовать имитатор механической нагрузки одно-массовой системы с переменным моментом инерции [9], двухмассовой электромеханической системы [10] и многомассовой системы [11].

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ПЧ-АД-АД-ПЧ

Испытательный стенд для двигателей переменного тока включает в себя два асинхронных двигателя с короткозамкнутым ротором $M1$ и $M2$, два транзисторных преобразователя частоты $A1$ и $A2$ [18] и электрическую схему подключения (рис. 4). Статорные обмотки двигателей $M1$ и $M2$ питаются от выходных цепей преобразователей частоты, а роторы двигателей собраны в электромашинный агрегат переменного тока. Си-

ловые входные цепи транзисторных преобразователей подключаются к трехфазной сети контакторами $KM1$ и $KM2$ через токоограничивающие реакторы $LR1$ и $LR2$. В состав силовой схемы преобразователей входят трехфазные диодные выпрямители $UD1$ и $UD2$, транзисторные инверторы напряжения $UF1$ и $UF2$, электролитические конденсаторы $C1$ и $C2$, тормозные транзисторы $VT1$ и $VT2$, подключенные к конденсаторам через тормозные сопротивления $RD1$ и $RD2$.

Преобразователь $UF1$ управляется от системы автоматического регулирования скорости, на вход которой поступают сигнал задания скорости U_{31} и сигнал обратной связи по скорости $U_{0с}$. САР скорости может быть реализована в виде системы векторного регулирования с внутренними контурами регулирования тока статора по осям d и q , и внешними контурами регулирования угловой скорости и потокосцепления ротора [9]. Более простой способ регулирования скорости двигателя $M1$ связан с применением преобразователя частоты с системой скалярного регулирования. Преобразователь $UF1$ обеспечивает регулирование как положительной, так и отрицательной скорости.

Преобразователь $UF2$ управляется от системы автоматического регулирования момента, на вход которой поступает сигнал задания момента U_{32} . САР момента реализована в виде системы векторного регулирования с внутренними контурами регулирования тока статора по осям d и q и внешним контуром регулирования потокосцепления ротора [8]. Транзисторный преобразователь $UF2$ обеспечивает регулирование как положительного, так и отрицательного момента [15, 17]. Система ПЧ-АД с векторным регулированием имеет механические характеристики, близкие к системе ТП-Д. Поэтому механические характеристики двигателя $M1$ могут быть описаны линейным уравнением по аналогии с (3), а механические характеристики двигателя $M2$ могут быть описаны уравнением (4). Механические характеристики двигателей $M1$ и $M2$ агрегата ПЧ-АД-АД-ПЧ повторяют механические характеристики на рис. 3.

Активная мощность P_{A1} , потребляемая преобразователем $A1$ из сети, расходуется на потери диодного выпрямителя $UD1$ ΔP_{D1} , мощность собственных нужд преобразователя P_{CH1} , потери инвертора $UF1$ ΔP_{F1} , потери асинхронного двигателя $M1$ ΔP_{M1} и преобразуется в механическую мощность двигателя P_{12} .

Далее эта мощность расходуется на мощность механических потерь агрегата ΔP_{12} , на электрические потери M_2 ΔP_{M2} и преобразуется в электрическую мощность P_{21} , которая за вычетом потерь преобразователя $UF2$ ΔP_{F2} и мощности собственных нужд P_{CH2} передается в виде электрической мощности P_{F2} на разрядное сопротивление $RD2$. При этом инвертор напряжения $UF1$ работает в инверторном режиме, двигатель $M1$ – в двигательном, двигатель M_2 – в генераторном, а инвертор $UF2$ работает в выпрямительном режиме работы.

Коэффициент активности мощности стенда в этом режиме больше единицы и равен

$$p_{21} = \frac{P_{A1}}{M_1 \cdot \omega} = \frac{1}{\eta_{D1}} \left(\frac{1}{\eta_{F1} \cdot \eta_1} + \frac{P_{CH}}{M_1 \cdot \omega} \right). \quad (7)$$

Принципиальная схема стенда (рис. 4) содержит линейный контактор КМЗ, который объединяет звенья постоянного напряжения преобразователей. При этом возможен режим рекуперации энергии между преобразователями частоты. Активная мощность P_{A1} , потребляемая преобразователем А1 из сети, преобразуется с учетом потерь диодного выпрямителя UD1 ΔP_{D1} в электрическую мощность P_{D1} . К ней добавляется электрическая мощность P_{F2} и вычитаются мощности собственных нужд преобразователей P_{CH1} и P_{CH2} . Далее результирующая мощность P_{F1} с учетом потерь инвертора UF1 ΔP_{F1} и потерь асинхронного двигателя M_1 ΔP_{M1} преобразуется в механическую мощность двигателя P_{12} . Эта мощность расходуется на мощность механических потерь агрегата ΔP_{12} , на электрические потери M_2 ΔP_{M2} и преобразуется в активную мощность P_{21} , которая за вычетом потерь преобразователя UF2 ΔP_{F2} возвращается в виде электрической мощности P_{F2} в звено постоянного напряжения на контактор КМЗ.

Коэффициент активности мощности стенда с учетом режима рекуперации

$$p_{22} = \frac{1}{\eta_{D1}} \left[\left(\frac{1}{\eta_{F1} \cdot \eta_1} - \eta_2 \cdot \eta_{F2} \right) + \left(2 \cdot P_{CH} + \Delta P_{12} \cdot \eta_2 \cdot \eta_{F2} \right) / M_1 / \omega \right]. \quad (8)$$

Коэффициент реактивной мощности связан с режимом работы выпрямителя UD1 и рассчитывается по уравнению

$$q_2 = p_2 \cdot \operatorname{tg}(\gamma / 2), \quad (9)$$

где угол коммутации диодного выпрямителя γ равен 11,5 или 16,3° для токоограничивающих реакторов с индуктивным падением напряжения 2 или 4% соответственно.

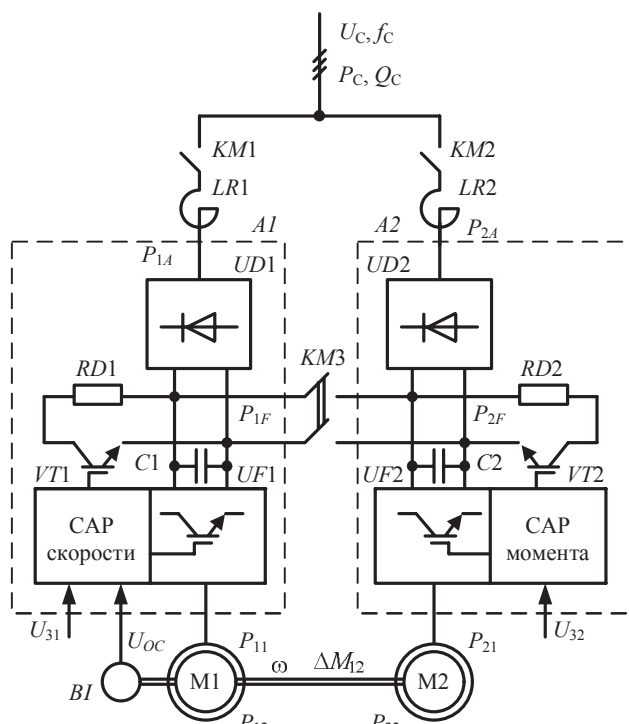


Рис. 4. Принципиальная схема испытательного стенда ПЧ-АД-АД-ПЧ

Пример 2. Рассчитать энергоэффективность испытательного стенда на основе асинхронных короткозамкнутых двигателей 4А335М6У3, $U_{1N}=380$ В, $P_{2N}=200$ кВт, $\eta_1=94\%$, $\Delta P_{12}=0,03P_{2N}$.

Решение: Принимаем $\eta_{F1}=\eta_{F2}=98\%$, $\eta_{D1}=99\%$, $P_{CH1}=0,005P_{2N}$. По формулам (7) - (9) при номинальной нагрузке $M_1 \cdot \omega_1 = P_{2N}$ рассчитываем для двух режимов работы (без рекуперации и с рекуперацией) коэффициенты активной мощности $p_{21}=1,102$, $p_{22}=0,204$ и коэффициенты реактивной мощности $q_{21}=0,155$, $q_{22}=0,029$. Вывод: применение рекуперации для испытательного стенда ПЧ-АД-АД-ПЧ мощностью 200 кВт снижает потребление активной и реактивной мощности в 5,4 раза.

Стенд ПЧ-АД-АД-ПЧ характеризуется большим диапазоном нагружения по скорости и моменту, высокой энергоэффективностью при использовании схемы с рекуперацией и может быть рекомендован для испытания двигателей малой, средней и большой мощности со статическими и динамическими режимами нагружения при высокой плавности по скорости и моменту. В качестве испытуемых и нагрузочных могут быть использованы асинхронные и синхронные двигатели [16].

Коэффициент активной мощности в схеме с рекуперацией меньше единицы, т.к. механическая мощность двигателя M_2 , с учетом потерь преобразователь UF2, возвращается в звено постоянного напряжения. Коэффициенты реактивной мощности значительно меньше единицы из-за особенностей работы диодных выпрямителей UD1 и UD2.

Капитальные затраты оцениваются относительным коэффициентом 6, который включает в себя капитальные затраты на преобразователи частоты А1 и А2 (5), плюс затраты на двигатель М2 (1,0). Для проведения испытаний мощных двигателей самосвалов и экскаваторов на производственных объединениях «Силовые машины» и «Русэлпром» используют в качестве испытательных стендов силовое электрооборудование, которое разработано для электропривода этого агрегата [3, 4].

По системе ПЧ-АД-АД-ПЧ с рекуперацией разработаны и успешно эксплуатируются универсальные лабораторные стенды для исследования работы автоматизированных электроприводов переменного тока. Эти испытательные стенды с мощностью двигателей 2,2 кВт используются в учебном процессе [19]. Имея высокое быстродействие преобразователя частоты с векторным регулированием по аналогии с тиристорным преобразователем, можно с помощью программного обеспечения преобразователя UF2 реализовать имитаторы с переменным моментом инерции, двухмассовой и многомассовой электромеханических систем [9–11].

Также может быть реализован ИС модульного типа, в котором вместо реактора LR2, выпрямительных мостов UD1 и UD2, транзистора VT2 и контактора КМЗ на место UD1 устанавливается активный выпрямитель [6, 12, 13] (автономный инвертор, ведомый сетью). В этом случае ИС будет обладать высокими динамическими характеристиками в пуско-тормозных режимах.

Если для ИС не требуется минимальное время торможения [14] и высокая динамика (ИС для исследования тепловых режимов и снятия характеристик), то из схемы **рис. 4** можно убрать контакторы KM2 и KM3, реактор LR2 и выпрямительный мост UD2, а UD1 оставить.

За счет обратимости машин и применения преобразователей частоты с рекуперацией и активных выпрямителей можно эффективно регулировать скорость и нагрузку на валу M1 в 4 квадрантах.

Широко используются комбинированные испытательные стенды для исследования работы асинхронных двигателей по системе ПЧ-АД-ДПТ-ТП, т.к. система ТП-Д часто берется из существующих агрегатов. Эти стенды нашли широкое применение в учебном процессе [20], т.к. на них одинаково успешно можно исследовать характеристики двигателей постоянного тока, если в качестве нагрузочного использовать асинхронный двигатель. Для повышения энергоэффективности в генераторном режиме преобразователь частоты А1 должен включать в себя активный выпрямитель и автономный инвертор напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные испытательные стенды для механического нагружения двигателей постоянного или переменного тока с применением рекуперации электрической энергии в несколько раз снижают потребление активной мощности из сети, обладают высокой плавностью регулирования и большими диапазонами нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Основные тенденции развития автоматизированного электропривода // Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2016. Пермь, 2016. С. 81-83.
- Применение электроприводов по системе тиристорный преобразователь – двигатель в карьерных электрических экскаваторах / Греков Э.Л., Могучев М.В., Шевченко А.Н., Жирков А.А., Филимонов С.И. // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2014. Саранск, 2014. Т. 2. С. 420-424.
- Козярук А.Е. Высокоэффективный электропривод машин и технологий минерально-сырьевого производства. Структура и реализация // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2014. Саранск, 2014. Т. 2. С. 135-138.
- Разработка и исследование комплекта тягового электрооборудования карьерного самосвала грузоподъемностью 240 тонн / Виноградов А.Б., Гнездов Н.Е., Журавлев С.В., Сибирцев А.Н. // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2014. Саранск, 2014. Т. 2. С. 261-263.
- Осипов О.И., Наживин А.Е., Жарков П.А. Электромеханический комплекс для испытания силовой трансмиссии вертолетов // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2014. Саранск, 2014. Т. 2. С. 205-206.
- Активные выпрямители как универсальное средство повышения качества электроэнергии в системах электроснабжения буровых установок с частотно-регулируемым электроприводом / Абрамов Б.И., Коган А.И., Пономарев В.М., Шевырева Н.Ю., Шевырев Ю.В., Фащенко В.Н. // Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2016. Пермь, 2016. С.372-376.
- ГОСТ Р 52776-2007. Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики. М.: Стандартинформ, 2008. 69 с.
- Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: учебник для студентов высших учебных заведений / под ред. В.М. Терехова. М.: Академия. 2006. 304 с.
- Фащенко В.Н., Коробкин П.В., Омельченко Е.Я. Имитатор одномассовой системы с переменным моментом инерции // Горный информационно-аналитический бюллетень. МГТУ. 1996. № 5. С. 36-39.
- Переслегин Н.Г., Омельченко Е.Я., Коробкин П.В. Имитатор двухмассовой электромеханической системы // Оптимизация режимов работы электроприводов: межвуз. сб. науч. тр. Красноярск, 1992. С. 30-35.
- Коробкин П.В., Омельченко Е.Я. Структурная схема скиповой подъемной установки с учетом особенностей её работы // Горный информационно-аналитический бюллетень. МГТУ. 1997. № 2. С. 28-32.
- Jiang J, Holtz J. An efficient braking method for controlled ac drives with a diode rectifier front end // IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 37, no. 5, pp. 1299–1307, Sept./Oct. 2001.
- Rastogi M, P. W. Hammond P.W. Dual-frequency braking in AC drives // IEEE Trans. Power Electron., vol. 17, no. 6, pp. 1032–1040, Nov. 2002.
- Swamy M.M., Kume T., Yukihiro Y., Fujii S., Sawamura M. A novel stopping method for induction motors operating from variable frequency drives // IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, no. 4, pp. 1100–1107, July 2004.
- Holtz J. Sensorless control of induction motor drives // Proceedings of the IEEE, vol. 90, no. 8, 1359–1394, 2002.
- Jansen, P. L., R. D. Lorenz R.D. Transducerless position and velocity estimation in induction and salient AC machines // IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, no. 2, pp. 240–247, 1995.
- Ha J.I., Sul S.K. Sensorless field-orientation control of an induction machine by high-frequency signal injection // IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 35, no. 1, pp. 45–51, 1999.
- Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives, NJ: Prentice-Hall, 2002
- Научно-образовательный центр «Шнейдер Электрик» – МГТУ им. Г.И. Носова / Омельченко Е.Я., Лукьянов С.И., Николаев А.А., Андреев С.М., Малафеев А.В., Тюрин М.В., Сулейманов Р.Р. // Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2016. Пермь, 2016. С. 573-577.
- Линьков С.А., Омельченко Е.Я., Бачурин И.В. Универсальный лабораторный стенд для исследования работы электроприводов переменного тока // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2014. Саранск, 2014. Т. 2. С. 555-560.

Поступила в редакцию 7 мая 2018 г.

ENERGY-EFFICIENT TEST FACILITY FOR ELECTRIC MOTORS

Evgenii Ya. Omelchenko

D.Sc. (Eng.), Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, e.omelchenko@magtu.ru, +7 (3519) 22-45-87. E-mail: momentum2@yandex.ru.

Alexey V. Belyi

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Sergey S. Enin

Teaching Assistant, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0313-6854>.

Nikolay V. Fomin

Assistant Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Relevance: All manufactured electric motors must undergo heating tests by the method of mechanical loading with continuous, short-term, repeated-short-time regimes. Variable electric drive tests are performed to define the performance of the engines at nominal, high and low speeds. DC motor and induction motor tests are performed on test benches with a power of 1000 kW and higher. Reducing of electrical losses and improving of energy efficiency of test stands is an urgent scientific and practical task so test time may take several hours. **Objectives:** The purpose of the article is the study of the test facility for thyristor rectifier – DC motor and transistor frequency converter – induction motor systems as well as a static equation derivation for a different operation regime and electrical losses and energy efficiency analysis. **Methods Applied:** The theoretical research was conducted with the help of methods of electrical engineering theory, electric machine theory, automatic control and automated electric drive theories. The calculation of the bench characteristics was carried out in Microsoft Office Excel software. **Originality:** Regulation parameters of the test stand were defined and coefficients of active and reactive power as a function of mechanical load were introduced to estimate energy efficiency. The derived equations make it possible to calculate energy efficiency of test facility depending on the rated power and mechanical load. **Findings:** the static mode equations were derived to calculate the active and reactive power coefficients of the test stand with and without energy recovery system for thyristor rectifier – DC motor and transistor frequency converter – induction motor systems. **Practical Relevance:** electrical power consumption of the test facility with thyristor rectifier – DC motor system with test motor rated power of 185 kW with energy recovery is reduced by 4.1 times as compared with the system without energy recovery. Electrical power consumption of the test facility with transistor frequency converter – induction motor system with test motor rated power of 200 kW with energy recovery is reduced by 5.4 times as compared with the system without energy recovery. The obtained analytical equations give the opportunity at the design stage to estimate the test bench energy efficiency as a function of the drive system type, motor power, operating regime and mechanical load.

Keywords: electric motors, test benches, energy efficiency.

REFERENCES

- Onishchenko G.B., Yun'kov M.G. The basic tendencies of development of the automated electric drive. *Trudy IX Mezhdunarodnoy (XX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP 2016* [Proceedings of IX International (XX All-Russian) conference on the automated electric drive AEP 2016]. Perm, 2016, pp. 81-83. (In Russian)
- Grekov E.L., Moguchev M.V., Shevchenko A.N., Zhirkov A.A., Filimonov S.I. Application of electric drives on the thyristor converter-motor system in quarry electric excavators. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP 2014*. [Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) Conference on Automated Electric Drive AEP 2014]. Saransk, 2014, part 2, pp. 420-424. (In Russian)
- Kozyaruk A.Ye. Highly efficient electric drive machines and technologies of mineral and raw materials production. Structure and implementation. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP 2014* [Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) Conference on Automated Electric Drive of AEP 2014]. Saransk, 2014, part 2, pp. 135-138. (In Russian)
- Vinogradov A.B., Gnezdov N.Ye., Zhuravlev S.V., Sibirtsev A.N. Development and research of a set of traction electrical equipment for a dump truck with a payload capacity of 240 tons. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP 2014* [Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) Conference on Automated Electric Drive of AEP 2014]. Saransk, 2014, part 2, pp. 261-263. (In Russian)
- Osipov O.I., Nazhivin A.E., Zharkov P.A. Electromechanical complex for testing the power transmission of helicopters. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP 2014* [Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) Conference on Automated Electric Drive AEP 2014]. Saransk, 2014, vol.2. pp. 205-206. (In Russian)
- Abramov B.I., Kogan A.I., Ponomarev V.M., Shevyreva N.YU., Shevyrev YU.V., Fashchilenko V.N. Active rectifiers as a universal means of improving the quality of electricity in power supply systems for drilling rigs with frequency-controlled electric drive. *Trudy IX Mezhdunarodnoy (XX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP 2016* [Proceedings of the IX International (XX All-Russian) Conference on Automated Electric Drive of AEP 2016]. Perm, 2016, pp. 372-376. (In Russian)
- GOST R 52776-2007/ IEC 60034-1:2004. Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance (MOD). Moscow: Standartinform, 2008. 69 p. (In Russian)
- Terekhov V.M., Osipov O.I. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Control systems of electric drives]. Moscow: Akademiya, 2006. 304 p. (In Russian)

9. Fashilenko V.N., Korobkin P.V., Omelchenko E.Ya. Single-mass system simulator with variable inertia. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy bulletin* [Mining information-analytical Bulletin], MSMU, 1996, no. 5, pp. 36-39. (In Russian)
10. Pereslegin N.D., Omelchenko E.Ya., Korobkin P.V. Simulator of two-mass Electromechanical system. *Optimizatsiya regimov raboty elektoprivodov* [Optimization of modes of operation of electric drives]. Krasnoyarsk, 1992, pp. 30-35. (In Russian)
11. Korobkin V.P., Omelchenko E.Y. Structural diagram of the skip hoisting installation with the features of its work. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy bulletin* [Mining information-analytical Bulletin], MSMU, 1997, no. 2, pp. 28-32. (In Russian)
12. Jiang J, Holtz J. An efficient braking method for controlled ac drives with a diode rectifier front end. *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 37, no. 5, pp. 1299-1307, Sept./Oct. 2001.
13. Rastogi M, Hammond P.W. Dual-frequency braking in AC drives. *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 17, no. 6, pp. 1032-1040, Nov. 2002.
14. Swamy M.M., Kume T., Yukihiro Y., Fujii S., Sawamura M. A novel stopping method for induction motors operating from variable frequency drives. *IEEE Trans. PowerElectron.*, vol. 19, no. 4, pp. 1100-1107, July 2004.
15. Holtz J. Sensorless control of induction motor drives. *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 8, 1359-1394, 2002.
16. Jansen, P.L., Lorenz R.D. Transducerless position and velocity estimation in induction and salient AC machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, no. 2, pp. 240-247, 1995.
17. Ha J.I., Sul S.K. Sensorless field-orientation control of an induction machine by high-frequency signal injection. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, no. 1, pp. 45-51, 1999.
18. Bose B.K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. NJ: Prentice-Hall, 2002.
19. Omelchenko E.Ya., Lukyanov S.I., Nikolayev A.A., Andreyev S.M., Malafeyev A.V., Tyurin M.V., Suleymanov R.R. Scientific and educational center "Schneider Electric" – NMSTU. *Trudy IX Mezhdunarodnoy (XX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP 2016*. [Proceedings of the IX International (XX All-Russian) Conference on Automated Electric Drive of AEP 2016]. Perm, 2016, pp. 573-577 (In Russian)
20. Linkov S.A., Omelchenko E.Ya., Bachurin I.V. Universal laboratory stand for the study of the operation of AC electric drives. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP 2014*. [Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) Conference on Automated Electric Drive of AEP 2014]. Saransk, 2014, part 2, pp. 555-560. (In Russian)

Омельченко Е.Я., Белый А.В., Енин С.С., Фомин Н.В. Энергоэффективные испытательные стенды для электродвигателей // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 3(40). С. 12-19. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3\(40\)-12-19](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3(40)-12-19)

Omelchenko E.Ya., A.V. Belyi, Enin S.S., Fomin N.V. Energy-Efficient Test Facility for Electric Motors. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 3(40), pp. 12-19. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3\(40\)-12-19](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3(40)-12-19)