

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПО СИСТЕМЕ «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ – ДВУХСКОРОСТНОЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ» С ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИМИСЯ СТРУКТУРАМИ

Е.А. Храмшина

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск*

Рассматриваются вопросы повышения устойчивости частотно-регулируемых электроприводов (ЧРП) с двухскоростными асинхронными двигателями к нарушениям электроснабжения, а также вопросы повышения их энергетической эффективности. Предложена концепция электроприводов по системе «Преобразователь частоты – двухскоростной асинхронный двигатель» с переключающимися структурами. Отличительной особенностью концептуального подхода является переключение обмоток высокой и низкой скоростей при осуществлении частотного регулирования на каждой из этих обмоток. Рассматриваются электропривод с двумя преобразователями частоты с питанием обмоток от независимых вводов и электропривод с преобразователем частоты с двумя звеньями постоянного тока. Представлены результаты экспериментальных исследований переключения ЧРП с основного на резервный ввод. Сделан вывод об удовлетворительном характере переходных процессов. В плане реализации предложенной концепции разработан способ частотного регулирования производительности тягодутьевых механизмов, отличительной особенностью которого является переключение преобразователя частоты с обмотки высокой скорости на обмотку низкой скорости (и обратно) в зависимости от производительности механизма. Рассмотрен частотно-регулируемый электропривод, реализующий данный способ. Разработана методика расчета энергетической эффективности внедрения ЧРП с двухскоростными двигателями. Показано, что снижение энергопотребления обеспечивается за счет повышения эквивалентного коэффициента полезного действия. Представлены результаты оценки технико-экономической эффективности внедрения. Для этого выполнено сравнение КПД и потребляемой мощности с аналогичными показателями при реализации известного способа, согласно которому во всем диапазоне изменения производительности механизма частотное регулирование скорости двигателя осуществляется на высокоскоростной обмотке. Подтверждена эффективность внедрения разработанного ЧРП на дутьевых вентиляторах котлов КВГМ-100 пиковой котельной г. Магнитогорска. Отмечена целесообразность его внедрения на тягодутьевых механизмах котельных агрегатов с пиковым характером нагрузки.

Ключевые слова: тепловое предприятие, двухскоростной асинхронный двигатель, частотно-регулируемый электропривод, нарушения электроснабжения, энергетическая эффективность, технические решения, экспериментальные исследования, методика расчета, практическое применение.

Введение

Отечественный и зарубежный опыт свидетельствует о высокой эффективности применения частотно-регулируемого электропривода на тепловых предприятиях при производстве горячей воды, электроэнергии и пара [1, 2]. Однако при оценке преимуществ ЧРП в большинстве случаев не учитывается специфика работы асинхронного двигателя (АД) совместно с преобразователем частоты (ПЧ). Статистика показывает увеличение числа аварийных отключений оборудования, технологические механизмы которого оснащены системами регулирования производительности (скорости АД) [3, 4]. Причиной этого является увеличение длительности перерывов в работе двигателей при нарушениях электроснабжения: провалах либо кратковременных (1–3 с) отключениях напряжения [5, 6]. На тепловых предприятиях (тепловых станциях, ТЭЦ, тепловых электростанциях) это приводит к увеличению количества аварийных остановов ответственных механизмов, что ведет к

снижению надежности котлоагрегатов и предприятия в целом.

В результате проведенных исследований показано, что количество отключений ответственного оборудования тепловых предприятий, оснащенного ЧРП, напрямую зависит от интенсивности нарушений электроснабжения. При этом нарушения, возникающие на различных секциях шин одного уровня напряжения (6, 10 кВ), как правило, не совпадают по времени [7, 8].

В работах [9, 10] обосновано направление повышения работоспособности ЧРП за счет электропитания от двух вводов, одновременные провалы напряжений на которых имеет низкую вероятность. Предложены технические решения, обеспечивающие реализацию данной идеи. Однако практического применения эти разработки до настоящего времени не получили.

В комплексе с вопросами обеспечения работоспособности также должны решаться задачи энергосбережения.

Постановка задачи

При обосновании направлений совершенствования ЧРП следует учитывать, что значительная часть вспомогательных механизмов котлов оснащена двухскоростными АД. Известно, что тягодутьевые механизмы (ТДМ) – дутьевые вентиляторы и дымососы, являются наиболее ответственными технологическими механизмами, от устойчивой работы которых зависит надежность котлоагрегатов. Перевод электроприводов ТДМ, выполненных на базе двухскоростных АД, на частотное регулирование скорости создает возможности сохранения их работоспособности при нарушениях электроснабжения.

Электроприводы ТДМ являются также наиболее энергоемкими объектами. Их установленная мощность составляет 50–70 % мощности, потребляемой всеми электроприводами собственных нужд тепловых предприятий. В работах [11, 12] обосновано направление повышения энергетической эффективности за счет увеличения эквивалентного КПД электроприводов этих механизмов при частотном регулировании производительности.

Следует отметить, что вопросам частотного регулирования скорости электроприводов с двухскоростными АД в настоящее время практически не уделяется внимания. В большинстве случаев осуществляется регулирование во всем диапазоне при работе АД только на обмотке высокой скорости. Это приводит к снижению КПД электродвигателя и преобразователя частоты, к тому же снижается ресурс дорогостоящего электрооборудования.

В связи с изложенным, актуальными задачами являются обеспечение работоспособности электроприводов ответственных механизмов тепловых предприятий при нарушениях электроснабжения и повышение их энергетической эффективности за счет увеличения эквивалентного КПД.

Теоретическая часть

Для решения поставленных задач предложена концепция ресурсо-энергосберегающих электроприводов, выполненных по системе «преобразователь частоты – двухскоростной асинхронный двигатель», с переключающимися структурами, согласно которой осуществляется перевод АД на обмотку высокой скорости (ВС) либо низкой скорости (НС) при частотном регулировании скорости на каждой обмотке.

Согласно данной концепции для повышения устойчивости ЧРП к нарушениям электроснабжения осуществляется питание обмоток ВС либо НС от независимых вводов 6 либо 10 кВ, подключенных к различным вводным трансформаторам. При провалах либо отключениях напряжения по основному вводу, питающему обмотку ВС, осуществляется переключение АД на обмотку НС. При этом частотное регулирование скорости сохраня-

ется, а коммутация ПЧ может осуществляться как на стороне подводимого напряжения, так и на его выходе.

С целью повышения энергетической эффективности осуществляются переключения обмоток при изменении производительности технологического механизма вверх либо вниз относительно заданного граничного значения. Это значение определяется согласно графику нагрузки котла, имеющему, как правило, сезонный характер.

Повышение устойчивости ЧРП с двухскоростными АД к нарушениям электроснабжения осуществляется за счет разработок по представленным ниже направлениям.

Электропривод с двумя преобразователями частоты

Разработанный ЧРП обеспечивает питание обмоток ВС либо НС от независимых вводов. При этом питание каждой обмотки осуществляется от своего ПЧ, в общем случае, большой и малой мощностей. С этой целью разработано устройство управления двухскоростным АД дутьевого вентилятора (ДВ), функциональная схема которого представлена на рис. 1 [13].

Блок 10 задания количества подаваемого воздуха обеспечивает производительность $Q_{\text{зад}}$ дутьевого вентилятора 2, которая удовлетворяет требуемому соотношению «топливо – воздух».

В аварийном режиме, когда происходит отключение ПЧ большой мощности 12, питающего обмотку ВС 6, с его информационного выхода на вход блока управления 9 поступает сигнал «авария по основному вводу». При этом блок управления осуществляет переключение питания на обмотку НС 7. Одновременно изменяется положение лопаток направляющего аппарата 14, тем самым обеспечивается заданная производительность $Q_{\text{зад}}$ вентилятора. Его КПД при этом снижается, однако сохраняется работоспособность. После снятия сигнала «авария» блок управления восстанавливает рабочий режим двигателя.

При аварийном отключении резервного источника электроснабжения 8 с информационного выхода преобразователя частоты 13 на вход блока управления 9 поступает сигнал «авария по резервному вводу». При этом включается ПЧ большой мощности 12 и обеспечивается заданная производительность $Q_{\text{зад}}$ дутьевого вентилятора.

Аналогично осуществляются коммутационные процессы при выходе из строя ПЧ малой мощности 13 либо при потере напряжения на основном источнике электроснабжения 5.

В схеме предусмотрено прямое подключение обмоток ВС либо НС к источникам (секциям) 5 либо 6 за счет соответствующей коммутации аппаратов 3, 4 и вывода преобразователей 12, 13 из работы. Регулирование производительности ДВ в этом случае осуществляется поворотом лопаток направляющего аппарата 14.

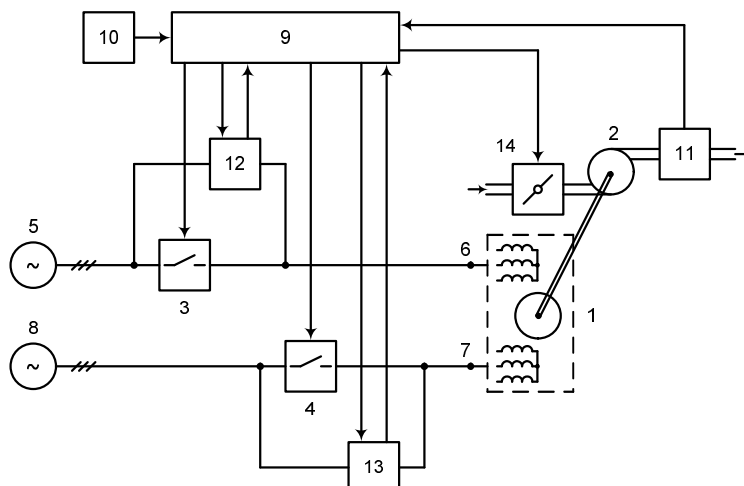


Рис. 1. Функциональная схема устройства управления двухскоростным электродвигателем дутьевого вентилятора котельного агрегата: 1 – двухскоростной электродвигатель; 2 – дутьевой вентилятор; 3, 4 – коммутационные аппараты; 5 – основной источник электроснабжения; 6 – вывод обмотки ВС; 7 – вывод обмотки НС; 8 – резервный источник электроснабжения; 9 – блок управления; 10 – блок задания количества подаваемого воздуха; 11 – датчик количества подаваемого воздуха; 12, 13 – преобразователи частоты; 14 – направляющий аппарат вентилятора

Электропривод на основе преобразователя частоты с двумя выпрямителями

Сущность разработанного технического решения поясняет рис. 2, на котором представлена

функциональная схема устройства управления двухскоростным АД на основе ПЧ с двумя звеньями постоянного тока (выпрямителями).

Отличительной характеристикой устройства

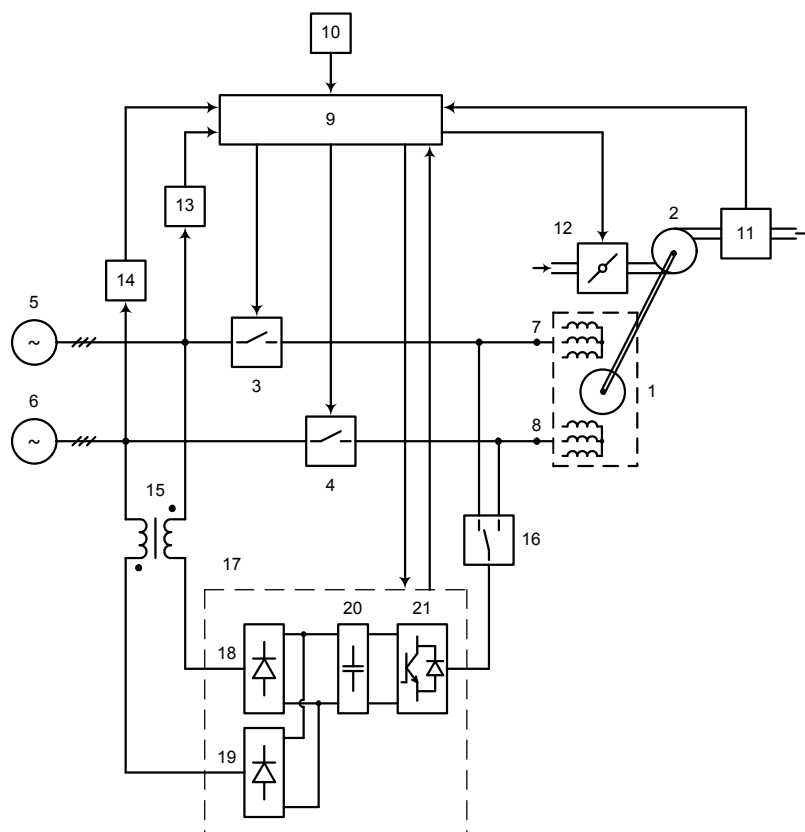


Рис. 2. Функциональная схема ЧРП на основе ПЧ с двумя звеньями постоянного тока: 1 – двухскоростной АД; 2 – дутьевой вентилятор; 3, 4, 16 – коммутационные аппараты; 5, 6 – источники питания; 7, 8 – выводы обмоток ВС и НС; 9 – блок управления; 10 – блок задания количества воздуха; 11 – датчик подаваемого воздуха; 12 – направляющий аппарат; 13, 14 – датчики напряжения; 15 – дроссель с двумя обмотками; 17 – преобразователь частоты; 18, 19 – выпрямители; 20 – емкостный фильтр; 21 – инвертор напряжения

является то, что питание обмоток ВС либо НС осуществляется одновременно от двух независимых вводов (одновременная подача напряжения на обе обмотки исключается за счет логики переключения коммутационных аппаратов). Обмотка 7 либо 8 двигателя 1, находящаяся в работе, получает примерно 50 % электрической энергии от первого источника питания 5 и столько же от второго источника 6. Такой режим обеспечивают дроссель 15 с двумя обмотками, преобразователь частоты 17 и коммутационный аппарат 16. При аварийном отключении одного из источников на двухскоростной АД подается 100 % электрической энергии от исправного источника. При неисправности одной из обмоток низкой 8 или высокой 7 скоростей указанные выше режимы работы устройства сохраняются.

Как и в предыдущей схеме предусмотрено прямое подключение обмоток ВС либо НС к независимым источникам питания.

Переключение ПЧ, питающего обмотки двухскоростного АД, с основного на резервный ввод не имеет принципиальных отличий от аналогичного процесса в электроприводах по системе «ПЧ–АД» с односкоростным электродвигателем. В работе [14] представлены результаты экспериментальных исследований такого электропривода, выполненных на специально созданной лабораторной установке.

В качестве примера полученных результатов на рис. 3 показаны осциллограммы напряжений и токов по вводам и выпрямленного тока ПЧ при переводе питания с первого на второй ввод.

Коммутация осуществляется в момент времени $t = 0,125$ с. Процесс переключения длится менее полупериода питающего напряжения и осуществляется без бросков тока. Выпрямленное напряжение в процессе переключения снижается на 9,5 % от 538 до 487 В по закону, близкому к экспоненциальному. Его изменение обусловлено разными исходными значениями напряжений на первом и втором вводах. Из осциллограмм следует вывод, что на работу преобразователя частоты и двигателя указанное переключение электропитания влияния практически не оказывает. Следовательно, технологический режим работы ответственного механизма не будет нарушен.

В целом, проведенные экспериментальные исследования подтвердили сохранение устойчивой работы разработанных ЧРП при изменениях напряжения в пределах $\pm 10\%$ либо отключении одного из вводов [14].

Энергосберегающий частотно-регулируемый электропривод на базе двухскоростного АД

Основным параметром водогрейного котла является его паропроизводительность, зависящая от нагрузки, которая изменяется как в течение суток, так и в течение года. В зависимости от сезонного графика она может изменяться от номинального значения до минимального, которое, как правило, равно половине либо 1/3 номинального. Пропорционально производительности котла изменяется производительность тягодутьевыми механизмами, система управления которыми является одной из составных частей автоматизированной системы управления агрегатом [7].

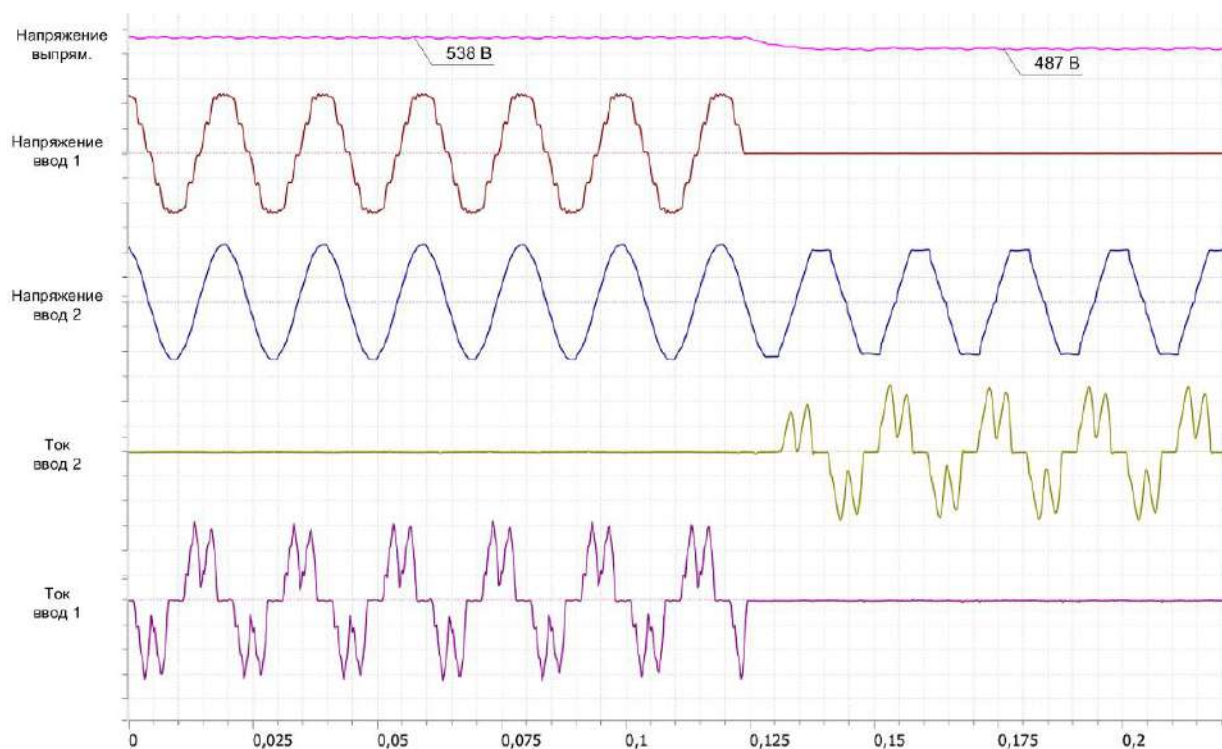


Рис. 3. Осциллограммы напряжений и токов при аварийном отключении ввода № 1

В нерегулируемых двухскоростных АД ТДМ, как правило, осуществляется сезонное переключение обмоток. В отопительный период двигатель работает на обмотке ВС, в летний период – на обмотке НС. Это позволяет добиться повышения КПД, а также способствует сохранению ресурса АД за счет чередования работы обмоток под нагрузкой.

Однако при переводе на частотное регулирование данное положительное свойство двухскоростных АД не используется. Как отмечалось, регулирование скорости во всем диапазоне осуществляется при работе АД на обмотке ВС. Вместе с тем, известно, что глубокое регулирование скорости снижает КПД как двигателя, так и преобразователя частоты, что приводит к снижению эквивалентного КПД всего механизма [11].

Представленная ситуация сложилась на пиковой котельной г. Магнитогорска, где дутьевые вентиляторы котлов КВГМ-100 (№ 3 и № 4) получают питание от преобразователей частоты SB-17 «Сбережок», выпускаемых НПО «Уралэлектра» (г. Екатеринбург) по лицензии фирмы Meidensha (Япония). Технические характеристики ДВ этих котлов представлены в табл. 1.

Очевидно, что в летний период, когда расход тепла небольшой, эксплуатировать двигатель на обмотке ВС (1000 об/мин) нерационально. В этот период целесообразно переключать ПЧ на обмотку НС (750 об/мин). Переключение можно осуществлять вручную по тепловому графику котла, например, при отключении городского отопления.

С этой целью, в направлении реализации рассмотренной выше концепции разработан способ частотного регулирования производительности тягодутьевых механизмов, отличием которого является переключение ПЧ с обмотки ВС на обмотку НС (и обратно) в зависимости от производительности котла. Разработан ЧРП, реализующий этот способ, его схема представлена на рис. 4 [15].

Блок задания количества подаваемого воздуха 10 задает производительность $Q_{\text{зад}}$ дутьевого вентилятора 2, которая удовлетворяет оптимальному соотношению топливо – воздух. Переключение обмоток НС 6 и ВС 7 осуществляется коммутационным аппаратом 9 по сигналу с выхода блока управления 8, один из входов которого подключен к датчику производительности 11. Также предусмотрено прямое питание обмоток от сети 5, под-

Таблица 1

Технические параметры дутьевых вентиляторов котлов КВГМ-100

Наименование оборудования	Механизм			Электродвигатель			
	Тип	Q , м ³ /ч	n , об/мин	Тип	P , кВт	n , об/мин	U , В
Вентилятор котла № 3	ВДН 18 НУ	152 000	1000	ДАЗО 12-55-6/8	250/105	1000/750	380
Вентилятор котла № 4	ВДН 18 НУ	130 000	1000	ДАЗО 12-42-6/8	200/85	1000/750	380
Преобразователь частоты	ШУВ-2500-2: $I_{\text{н.вх}} = 630 \text{ А}$; $U_{\text{вх}} = 380 \text{ В}$; $I_{\text{н.вых}} = 479 \text{ А}$; $U_{\text{вых}} = 380 \text{ В}$. «Сбережок» SB17 C3300Y: $P_{\text{н}} = 300/330 \text{ кВт}$; $I_{\text{вых}} = 428/479 \text{ А}$; $P_{\text{max прим. двиг}} = 200/250 \text{ кВт}$						

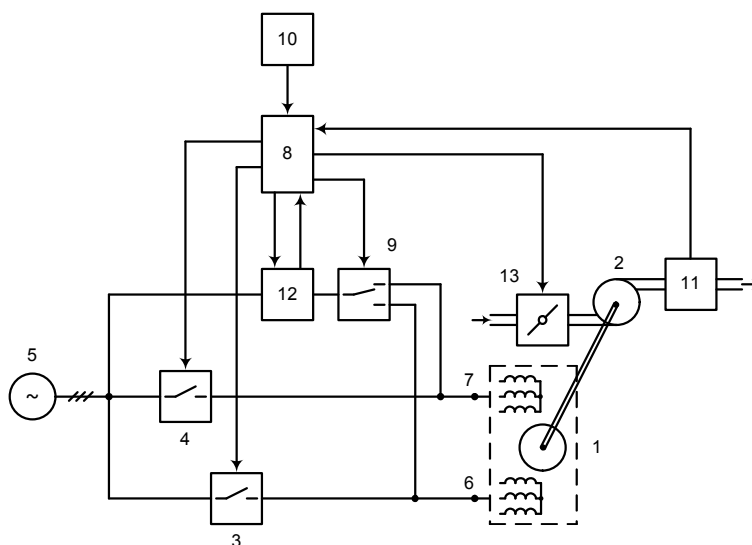


Рис. 4. Схема устройства управления двухскоростным АД: 1 – двухскоростной АД; 2 – дутьевой вентилятор; 3, 4, 9 – коммутационные аппараты; 5 – сеть; 6, 7 – выводы обмоток НС и ВС; 8 – блок управления; 10 – блок задания производительности ДВ; 11 – датчик производительности ДВ; 12 – преобразователь частоты; 13 – направляющий аппарат

ключение к которой осуществляется коммутационными аппаратами 3, 4.

На первом этапе переключение обмоток при питании от ПЧ рекомендовано осуществлять после остановки двигателя. Это связано со сложностью синхронизации поля статора и частоты вращения ротора после кратковременной потери питания, вызванной переключениями коммутационных аппаратов. В дальнейшем планируется реализация алгоритма принудительного гашения остаточного поля электродвигателя [3, 16], либо режима «самоподхвата» («пуска на вращающийся двигатель») [17], который в преобразователях частоты «Сбережок» может быть обеспечен установкой дополнительных модулей. Это обеспечит возможность переключения обмоток по суточному графику без остановки механизма.

Методика расчета энергетической эффективности

Предполагается, что переключение двигателя дутьевого вентилятора с обмотки ВС на обмотку НС в сочетании с частотным регулированием скорости обеспечит дополнительный ресурс энергосбережения. Соответственно возникает задача оценки этого ресурса при различных способах регулирования производительности.

При расчете потерь мощности и соответственно ресурса энергосбережения за основу принята методика, представленная в [12]. Данная методика получила развитие в направлении применения для анализа эффективности рассматриваемого электропривода по системе «ПЧ – двухскоростной АД» с переключением обмоток. Принципиальным отличием усовершенствованной методики является учет ступенчатых изменений КПД АД и ПЧ при переходе с обмотки ВС на обмотку НС. При этом расчет усредненных показателей энергопотребления и коэффициента энергетической эффективности должен выполняться при работе на обмотках ВС и НС отдельно с учетом продолжительности работы на этих обмотках.

Основные этапы предложенной методики:

1. Определяют изменения КПД двигателя, КПД преобразователя частоты и средние энергетические потери при условии равновероятной по времени работы АД на обмотке ВС во всем диапазоне регулирования производительности.

2. Определяют изменения названных характеристик с учетом их ступенчатого изменения при переключении обмоток ВС и НС. При этом КПД турбомеханизма принимают постоянным, равным его значению при полностью открытой задвижке.

3. Определяют средние энергетические потери при условии равновероятной по времени работы в каждом из диапазонов регулирования с учетом продолжительности работы на обмотках ВС и НС в течение года.

4. Определяют коэффициенты энергоэффек-

тивности, соотношение потерь и экономическую эффективность двух сравниваемых способов.

Практическое применение

Ниже приводится расчет энергетической эффективности рассматриваемого способа частотного регулирования производительности дутьевого вентилятора, выполненный по предложенной методике. Принимается, что переключение на обмотку НС при скорости $0,75\omega_n$ обеспечивает повышение КПД двигателя до номинального уровня ($\eta_{АД(НС)ном} = 0,89$), который при питании от обмотки НС ниже, чем при работе на обмотке ВС ($\eta_{АД(ВС)ном} = 0,91$). Поэтому дать однозначную оценку влияния способа регулирования производительности на величину эквивалентного КПД затруднительно. Необходим анализ потерь мощности с учетом изменения КПД отдельных узлов (двигателя, преобразователя частоты, механизма вентилятора). С этой целью сравниваются два способа подключения двухскоростного АД дутьевого вентилятора ВДН-18 котла КВГМ-100 пиковой котельной [18]:

Способ 1. Во всем диапазоне регулирования производительности $0,3 \leq Q^* \leq 1,0$ двигатель работает на обмотке ВС и получает питание от преобразователя частоты (известный способ без переключения обмоток).

Способ 2. При производительности $0,75 \leq Q^* \leq 1,0$ двигатель получает питание от ПЧ, работая на обмотке ВС, а в диапазоне $0,3 \leq Q^* \leq 0,75$ преобразователь переключается на обмотку НС (предложенный способ частотного регулирования с переключением обмоток).

Энергосберегающее управление дутьевым вентилятором в рабочем диапазоне достигается при обеспечении максимального КПД, который определяется зависимостью

$$\eta_{э\text{кв}} = \eta_{\text{вент}} \eta_{АД} \eta_{ПЧ},$$

где $\eta_{\text{вент}}$, $\eta_{ПЧ}$ – коэффициенты полезного действия механизма вентилятора и преобразователя частоты.

В табл. 2 приведены значения относительной производительности Q^* , расчетные значения относительной мощности $P_{\text{чр}}^*$ и КПД звеньев ДВ при подключении двигателя по первому способу. Коэффициент полезного действия турбомеханизма $\eta_{\text{ТМ}}$ (механизма вентилятора и магистрали) во всем диапазоне принимается равным номинальному значению $\eta_{\text{ТМ}ном} = 0,82$, так как трубопроводная арматура полностью открыта. Расчеты выполнены с учетом того, что КПД двухскоростного АД на обмотке ВС при регулировании скорости в диапазоне от ω_n до $0,3\omega_n$ снижается от номинального значения $\eta_{АД(ВС)ном} = 0,91$ до $\eta_{АД(ВС)} = 0,73$, т. е. примерно на 20 % [11]. Аналогично КПД

Таблица 2

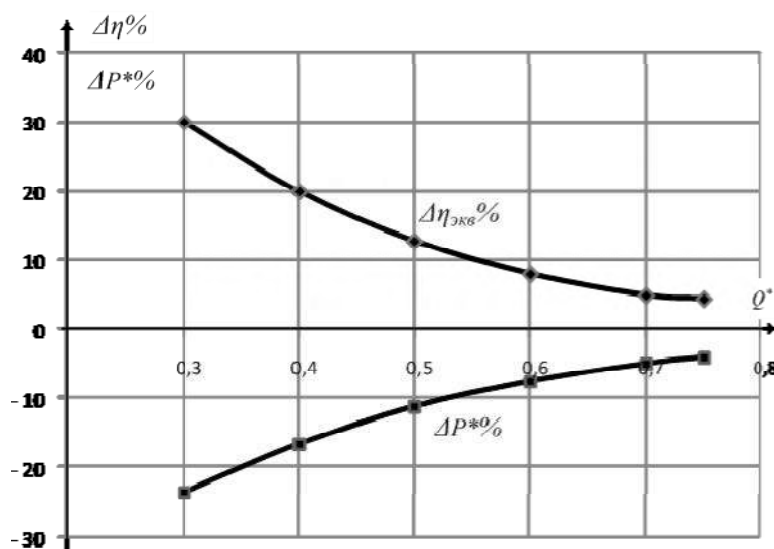
Изменения КПД звеньев дутьевого вентилятора при регулировании производительности по первому способу (работа на обмотке ВС)

Параметр	Относительная величина								Средняя величина
Q^*	0,3	0,5	0,6	0,7	0,75	0,8	0,9	1,0	0,69
$P_{\text{чр}}^*$	0,07	0,13	0,22	0,34	0,42	0,51	0,73	1,0	0,415
$\eta_{\text{ТМ}}$	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
$\eta_{\text{АД(ВС)}}$	0,73	0,815	0,847	0,875	0,884	0,892	0,9	0,91	0,874
$\eta_{\text{ПЧ}}$	0,86	0,9	0,916	0,928	0,932	0,934	0,939	0,943	0,927
$\eta_{\text{экв1}}$	0,515	0,601	0,636	0,666	0,676	0,683	0,695	0,703	0,64
$P_{\text{чр1}}^*$	0,136	0,216	0,346	0,511	0,622	0,747	1,051	1,42	0,575

Таблица 3

Изменения КПД звеньев дутьевого вентилятора при регулировании производительности по второму способу (работа с переключением обмоток)

Параметр	Относительная величина								Средняя величина
Q^*	0,3	0,5	0,6	0,7	0,75	0,8	0,9	1,0	0,69
$P_{\text{чр}}^*$	0,07	0,13	0,22	0,34	0,42	0,51	0,73	1,0	0,415
$\eta_{\text{ТМ}}$	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
$\eta_{\text{АД(НС)}}$	0,88	0,885	0,89	0,9	—	—	—	—	0,892
$\eta_{\text{АД(ВС)}}$	—	—	—	—	0,88	0,892	0,9	0,91	
$\eta_{\text{ПЧ}}$	0,93	0,934	0,941	0,947	0,932	0,934	0,939	0,943	0,937
$\eta_{\text{экв2}}$	0,672	0,678	0,687	0,699	0,672	0,682	0,692	0,704	0,69
$P_{\text{чр2}}^*$	0,104	0,192	0,32	0,486	0,625	0,748	1,055	1,42	0,61

Рис. 5. Зависимости эквивалентного КПД дутьевого вентилятора $\Delta\eta_{\text{экв}}\%$ и относительной мощности $\Delta P^*\%$ двухскоростного АД от производительности при работе на обмотке НС

преобразователя частоты $\eta_{\text{ПЧ}}$ изменяется от 0,94 до 0,86 (на 9 %).

Аналогичные значения КПД и потребляемой мощности при подключении двигателя по второму способу представлены в табл. 3. Расчеты показали, что к моменту переключения АД с обмотки ВС на обмотку НС при $Q^* = 0,75$ его КПД снизился до

$0,97 \cdot (\eta_{\text{АД(ВС)ном}} = 0,88)$. После включения обмотки НС КПД двигателя становится равным номинальному значению на этой обмотке.

На рис. 5 построены зависимости изменения эквивалентного КПД дутьевого вентилятора $\Delta\eta_{\text{экв}}\%(Q^*)$ и относительной мощности электродвигателя $\Delta P^*\%(Q^*)$ для диапазона производи-

ности $0,3 \leq Q^* \leq 0,75$ при частотном регулировании на обмотке низкой скорости. Среднее значение эквивалентного КПД ДВ для указанного режима повышается на 13,5 %. Среднее значение относительной потребляемой мощности снижается на 11,3 %.

Как следует из рис. 5, переключение ПЧ с высокоскоростной обмотки на низкоскоростную обеспечивает значительное увеличение эквивалентного КПД при низкой производительности дутьевого вентилятора. Применение такого способа будет наиболее эффективным в электроприводах тягодутьевых механизмов котлоагрегатов пиковых котельных. Это связано с тем, что, в силу характера нагрузки, большую часть времени такие агрегаты работают в диапазоне нагрузок около 0,5 номинальной и ниже. Соответственно электроприводы ТДМ работают в диапазоне низких скоростей, поэтому переключение на обмотку НС в сочетании с частотным регулированием производительности обосновано и целесообразно.

Заключение

Сравнение рассмотренных способов регулирования производительности (скорости АД) позволило сделать вывод о существенной разнице эквивалентных КПД ДВ, составляющей 6,7 % ($\eta_{\text{экв1}} = 0,64$ для первого способа и $\eta_{\text{экв2}} = 0,69$ – для второго). Разница величин средней потребляемой мощности составляет 5,8 % ($P_{\text{чр1}}^* = 0,575$ и $P_{\text{чр2}}^* = 0,61$). При номинальной мощности двигателя 250 кВт среднее снижение мощности составляет 14,5 кВт. Если принять, что двухскоростной АД находится в работе 7 тыс. ч в течение года, экономия электрической энергии составит около 100 тыс. кВт·ч/год. Очевидно, что реальная экономия будет ниже, так как здесь не учитываются остановки котла, которые происходят в основном в летний период.

Кроме того, поочередная работа двухскоростного АД на обмотках ВС и НС позволит продлить срок его эксплуатации, так как каждая обмотка находится в работе меньшее время. Следовательно, суммарный технико-экономический эффект при внедрении разработанных технических решений обеспечивается за счет ресурсосбережения и повышения надежности ответственных механизмов при улучшении показателей энергопотребления.

Общей функцией представленных устройств является переключение структуры частотно-регулируемого электропривода с целью обеспечения устойчивости к нарушениям электроснабжения и повышения его энергетической эффективности. Очевидно, что важными задачами являются анализ технических возможностей и оценка эффективности промышленного внедрения выполненных разработок. Исследования в этом направлении проводятся, получены положительные результаты, которые публикуются в периодических научных изда-

ниях. Однако они не могут быть отражены и обсуждены в рамках одной представленной статьи.

Работа выполняется при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (госзадание № 2014/80).

Литература

1. *Энергосбережение в теплоэнергетическом хозяйстве города средствами регулируемого электропривода: моногр.* / Ю. А. Крылов, В.Н. Медведев, А.С. Карандаев, Г.П. Корнилов. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. – 202 с.

2. *Технологическая востребованность и оценка эффективности внедрения частотно-регулируемых электроприводов на объектах тепловой электростанции* / В.Н. Медведев, А.С. Карандаев, О.И. Карандаева и др. // *Вестник ИГЭУ*. – Иваново: ФГБОУ ВПО «ИГЭУ», 2012. – Вып. 6. – С. 109–114.

3. *Способы повышения устойчивости частотно-регулируемых электроприводов при нарушениях электроснабжения* / А.С. Карандаев, Р.Р. Храмишин, Т.Р. Храмишин и др. // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2013. – № 1. – С. 62–69.

4. *Способы повышения устойчивости электроприводов непрерывных производств при провалах напряжения* / Т.Р. Храмишин, Г.П. Корнилов, Д.С. Крубцов и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2014. – Т. 14, № 2. – С. 80–87.

5. *Проблемы внедрения частотно-регулируемых электроприводов на ответственных механизмах тепловой электростанции* / Ю.А. Крылов, И.А. Селиванов, А.С. Карандаев и др. // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2011. – № 4. – С. 19–25.

6. *Способы повышения устойчивости частотно-регулируемых электроприводов при нарушениях электроснабжения* / Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмишин, О.И. Карандаева и др. // *Вестник МГТУ – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ»*, 2011. – № 4. – С. 79–84.

7. *Крылов, Ю.А. Энергосбережение и автоматизация производства в теплоэнергетическом хозяйстве города. Частотно-регулируемый электропривод: учеб. пособие* / Ю.А. Крылов, А.С. Карандаев, В.Н. Медведев. – СПб.: Изд-во «Лань», 2013. – 176 с.

8. *Анализ интенсивности отказов частотно-регулируемых электроприводов районных тепловых станций при нарушениях электроснабжения* / В.Р. Храмишин, К.Э. Одинцов, А.Р. Губайдуллин и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2014. – Т. 14, № 2. – С. 68–79.

9. *Карандаева, О.И. Повышение надежности электроприводов тепловой электростанции металлургического предприятия при внедрении преобразователей частоты: дис. ... канд. техн. наук*. – Магнитогорск: МГТУ, 2011. – 172 с.

10. Пат. 80713 Российская Федерация, МПК Н02М 5/40. Преобразователь частоты для электропривода непрерывного действия / Ю.А. Крылов, Т.П. Крылова. – Оpubл. 2005, Бюл. № 5.
11. Гонне, Г.Г. Методы и технические средства энерго- и ресурсосберегающего управления турбомеханизмами: дис. ... д-ра. техн. наук. – Иркутск: ИГТУ, 2009. – 326 с.
12. Герасимов, Д.О. Энергосберегающее управление тягодутьевыми механизмами котлоагрегатов тепловых электрических станций с использованием ресурсов электропривода / Д.О. Герасимов, Г.Г. Гонне // Информатика и системы управления. – Благовещенск, 2009. – № 1 (19). – С. 136–145.
13. Пат. 137645 Российская Федерация, МПК Н02Р25/18. Устройство управления двухскоростным электродвигателем дутьевого вентилятора котельного агрегата / Т.Р. Храмишин, А.С. Карандаев, Р.Р. Храмишин, А.Р. Губайдуллин, Г.П. Корнилов, Е.А. Храмшина. – Оpubл. 20.02.2014, Бюл. № 5.
14. Частотно-регулируемый электропривод с электропитанием от двух независимых вводов / А.С. Карандаев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмишин, В.Р. Храмишин // Электротехника. – 2015. – № 4. – С. 41–48. DOI: 10.3103/S1068371215040045
15. Пат. 137437 Российская Федерация, МПК Н02Р25/18. Устройство управления двухскоростным электродвигателем дутьевого вентилятора котельного агрегата / Т.Р. Храмишин, А.С. Карандаев, Р.Р. Храмишин, А.Р. Губайдуллин, В.Р. Храмишин, Г.П. Корнилов. – Оpubл. 10.02.2014, Бюл. № 4.
16. Новые функциональные возможности и «интеллектуальные» свойства электроприводов серии ЭПВ / А.Б. Виноградов, А.Н. Сибирцев, В.Л. Чистосердов и др. // Силовая электроника. – 2008. – № 3. – С. 61–64.
17. Комплекс технических решений по энергосбережению и повышению устойчивости частотно-регулируемых электроприводов ответственных механизмов / Р.Р. Храмишин, В.Н. Медведев, О.И. Карандаева и др. // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – Т. 1. – С. 417–421.
18. Оценка ресурса энергосбережения в электроприводе дутьевого вентилятора с двухскоростным асинхронным электродвигателем / А.А. Радионосов, А.С. Карандаев, Р.Р. Храмишин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2014. – Т. 14, № 3. – С. 61–70.

Храмшина Екатерина Александровна, научный сотрудник НИС кафедры «Электротехника и электротехнические системы», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; AED174@mail.ru.

Поступила в редакцию 3 июня 2015 г.

DOI: 10.14529/power150412

ELECTRIC DRIVES OF THE FREQUENCY CONVERTER-TWO-SPEED ASYNCHRONOUS MOTOR SYSTEM WITH SWITCHING STRUCTURES

E.A. Khramshina, AED174@mail.ru

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

The paper considers issues of the enhancing immunity of the variable frequency electric drives (VFED) with two-speed asynchronous motors to power supply interruptions as well as those of improving their power efficiency. It proposes the concept of electric drives of the frequency converter–two-speed asynchronous motor system with switching structures. The distinctive feature of this approach is switching high and low speed windings in the process of variable frequency control on each of these windings. The electric drive with two frequency converters and winding supply from independent inputs and electric drive with one frequency converter featuring two DC links are considered. The paper provides results of experimental studies of VFED switching from the main to the spare input. Transient processes are recognized to be satisfactory. In terms of implementation of the proposed concept the method of variable frequency control of the draft units' performance has been developed; its distinctive feature is switching the frequency converter from the high-speed winding to the low-speed one (and vice versa) dependent on the unit performance. The variable frequency electric drive implementing this method is under consideration. The method of computing power efficiency of the introduction of VFED with

two-speed motors has been developed. The researches have proven that power consumption may be reduced due to the increasing equivalent efficiency factor. The results of estimation of the technical and economic efficiency of the introduction are provided. For this purpose, effectiveness and consumed power are compared with similar exponents at the implementation of the known method at which variable frequency motor control is accomplished on the high-speed winding. The developed VFED is proven to be effectively introduced at forced draught fans of GOFHVB-100 boiler of the Magnitogorsk peaking boiler plant. The paper emphasizes that it is practically to use it at the draft units of the boilers with peaking loading.

Keywords: power plants, two-speed asynchronous motor, variable frequency electric drive, power supply interruptions, power efficiency, technical solutions, experimental studies, calculation method, practical application.

References

1. Krylov Yu.A., Medvedev V.N., Karandaev A.S., Kornilov G.P. *Energosberezhenie v teploenergeticheskom khozyaystve goroda sredstvami reguliruemogo elektroprivoda: monografiya* [Power Supply at the Urban Heat and Power Facilities by Means of Variable Speed Electric Drive]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012. 202 p.
2. Medvedev V.N., Karandaev A.S., Karandaeva O.I., Mamleeva Yu.I., Khrumshina E.A. [Technological Demand and Assessment of Efficiency for the Introduction of Frequency and Adjustable Electric Drives on Objects of the Thermal Power Plant]. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2012, vol. 6, pp. 109–114. (in Russ.)
3. Karandaev A.S., Khrumshin R.R., Khrumshin T.R., Khrumshin V.R., Gubaydullin A.R. [Ways of Increasing Variable-Frequency Electric Drives Stability under Power Supply Violations]. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2013, no. 1, pp. 62–69. (in Russ.)
4. Khrumshin T.R., Kornilov G.P., Krubtsov D.S., Nikolaev A.A., Karandaeva O.I., Zhuravlev P.Yu. [Enhances the Stability of Electric Drives of Continuous Production in Voltage Sags]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2014, no. 2, pp 80–87. (in Russ.)
5. Krylov Yu.A., Selivanov I.A., Karandaev A.S., Gubaydullin A.R., Rovneyko V.V., Gallyamov R.R. [Problems of Variable-Frequency Electric Drives Introduction for Thermal Power Station critical Mechanisms]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Sci. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 19–25. (in Russ.)
6. Kornilov G.P., Khrumshin T.R., Karandaeva O.I., Gubaydullin A.R., Gallyamov R.R. [Ways of Increasing Variable-Frequency Electric Drives Stability under Power Supply Violations]. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2011, no. 4, pp. 79–84. (in Russ.)
7. Krylov Yu.A., Karandaev A.S., Medvedev V.N. *Energosberezhenie i avtomatizatsiya proizvodstva v teploenergeticheskom khozyaystve goroda. Chastotno-reguliruemyy elektroprivod* [Power Saving and Industrial Automation in Municipal Heat and Power Facilities Variable-Frequency Electric Drive]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2013. 176 p.
8. Khrumshin V.R., Odintsov K.E., Gubaydullin A.R., Karandaeva O.I., Kondrashova Yu.N. [Fault Rate Analysis of Variable-Frequency Electric Drives in District Heating Station under Power Supply Violations]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2014, no. 2, pp 68–79. (in Russ.)
9. Karandaeva O.I. *Povyshenie nadezhnosti elektroprivodov teplovoy elektrostantsii metallurgicheskogo predpriyatiya pri vnedrenii preobrazovateley chastoty. Dis. kand. tekhn. nauk* [Increasing Electric Drives Reliability of Iron and Steel Company Thermal Power Station with Frequency Converter Introduction. Cand. sci. diss.]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011. 172 p.
10. Krylov Yu.A., Krylova T.P. *Preobrazovatel' chastoty dlya elektroprivoda nepreryvnogo deystviya* [Frequency Converter for Continuously Operating Electric Drive]. Patent RF, no. 80713, 2005.
11. Goppe G.G. *Metody i tekhnicheskie sredstva energo- i resursosberegayushchego upravleniya turbomekhanizmami. Dis. dokt. tekh. nauk* [Methods and Facilities for Energy and Resource Saving Control of Turbine Units. Doct. sci. diss.]. Irkutsk, IrGTU, 2009. 326 p.
12. Gerasimov D.O., Goppe G.G. [Energy Saving Control of Draught Mechanisms of Boilers at Thermal Stations Using Electric Drive Resources]. *Avtomatizirovannye sistemy i komplekсы* [Automation Systems and Complexes], 2009, no. 1, pp. 136–145. (in Russ.)
13. Khrumshin T.R., Karandaev A.S., Khrumshin R.R., Gubaydullin A.R., Kornilov G.P., Khrumshina E.A. *Ustroystvo upravleniya dvukhskorostnym elektrodvigatel'nyy du'evogo ventilyatora kotel'nogo agregata* [Control Unit of the Two-Speed Electric Motor of the Boiler Unit Forced-Draught Fan]. Patent RF, no. 137645, 2014.
14. Karandaev A.S., Kornilov G.P., Khrumshin T.R., Khrumshin V.R. Variable Frequency Drive with Electrical Supply from Two Independent Inputs. *Russian Electrical Engineering*. 2015, vol. 86, no. 4, pp. 41–48. (in Russ.) DOI: 10.3103/S1068371215040045
15. Khrumshin T.R., Karandaev A.S., Khrumshin R.R., Gubaydullin A.R., Khrumshin V.R., Kornilov G.P. *Ustroystvo upravleniya dvukhskorostnym elektrodvigatel'nyy du'evogo ventilyatora kotel'nogo agregata* [Control Unit of the Two-Speed Electric Motor of the Boiler Unit Forced-Draught Fan]. Patent RF, no. 137437, 2014.

16. Vinogradov A.B., Sibirtsev A.N., Chistoserdiv V.L., Kolodin I.Yu., Monov D.A. [New Functional Capabilities and Intelligent Properties EPV Series Electric Drives]. *Silovaya elektronika* [Power Electronics], 2008, no. 3, pp. 61–64. (in Russ.)

17. Khamshin R. R., Medvedev V.N., Karandaeva O.I., Mamleeva Y.I., Khamshina E.A. [A Set of Technical Solutions, Providing Energy Saving and Increase in Sustainability of Critical Mechanisms Variable Frequency Drives]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) Conference on the Automatic Electric Drive]. Saransk, 2014, vol. 1, pp. 417–421. (in Russ.)

18. Radionov A.A., Karandaev A.S., Khamshin R.R., Gubaydullin A.R., Karandaeva O.I., Khamshina E.A. [Evaluation of Energy Saving Resource in Electric Drive of Blower Fan with Two-Speed Induction Motor]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2014, no. 3, pp 61–70. (in Russ.)

Received 3 June 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Храмшина, Е.А. Электроприводы по системе «преобразователь частоты – двухскоростной асинхронный двигатель» с переключающимися структурами / Е.А. Храмшина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 83–93. DOI: 10.14529/power150412

FOR CITATION

Khamshina E.A. Electric Drives of the Frequency Converter-Two-Speed Asynchronous Motor System with Switching Structures. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 4, pp. 83–93. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150412