

## ОЦЕНКА РЕСУРСА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ДУТЬЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА С ДВУХСКОРОСТНЫМ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ\*

**А.А. Радионов, А.С. Карандаев, Р.Р. Храмшин,  
А.Р. Губайдуллин, О.И. Карандаева, Е.А. Храмшина**

Определены резервы энергосбережения при частотном регулировании производительности дутьевого вентилятора с двухскоростным асинхронным двигателем водогрейного котла КВГМ-100. Предложен способ регулирования производительности тягодутьевых механизмов путем переключения преобразователя частоты с обмотки высокой скорости на обмотку низкой скорости и дроссельного регулирования в диапазонах скоростей, близких к номинальным значениям скоростей на этих обмотках. Представлена схема устройства, обеспечивающего реализацию способа. Построены естественные и искусственные характеристики дутьевого вентилятора и магистрали при работе двигателя на обмотке высокой скорости при дроссельном и частотном регулировании. Выполнен сравнительный анализ потерь мощности, установлено, что применение частотного регулирования обеспечивает ресурс энергосбережения до 42 % по сравнению с дроссельным регулированием. Выполнен сравнительный анализ энергопотребления при реализации предложенного способа при условии одинаковой продолжительности работы на обмотках высокой и низкой скоростей. В результате показано расчетное снижение энергопотребления от 22 до 35 % в зависимости от сочетания способов регулирования производительности. Доказано, что при частотном регулировании на обмотке низкой скорости не происходит снижения эквивалентного к.п.д. и соответственно увеличения потребляемой мощности дутьевого вентилятора. Отмечено, что технико-экономический эффект обеспечивается за счет ресурсосбережения и повышения надежности тягодутьевых механизмов при сохранении показателей энергопотребления. Даны рекомендации по применению выполненных разработок.

*Ключевые слова:* водогрейный котел, дутьевой вентилятор, двухскоростной электродвигатель, частотное регулирование, переключение обмоток, характеристики, энергосбережение.

Экономическая эффективность применения частотно-регулируемых электроприводов для тягодутьевых механизмов (дутьевых вентиляторов и дымососов) котлов подтверждена результатами исследований многих авторов и обоснована, например, в [1–5]. При внедрении преобразователей частоты в электроприводах вспомогательных механизмов тепловых электростанций и городских тепловых станций (котельных), как правило, не производится замена установленных асинхронных (в том числе двухскоростных) электродвигателей, не выработавших свой ресурс. Подобная ситуация возникла на пиковой котельной г. Магнитогорска при переводе электроприводов дутьевых вентиляторов (ДВ) и дымососов водогрейных котлов КВГМ-100 на частотное регулирование скорости (производительности). При этом двухскоростные электродвигатели ДВ типа ДАЗО 12-55-6/8 остались в работе. Номинальная мощность двигателя – 250/105 кВт при питании от обмоток высокой (1000 об/мин) и низкой (750 об/мин) скоростей соответственно. При существующей схеме электропитания обмотки высокой скорости (ВС) осуществляется от преобразователя частоты (ПЧ) типа SB-17 («Сбережок») либо от сети 380 В, питание обмотки низкой скорости (НС) – только от сети.

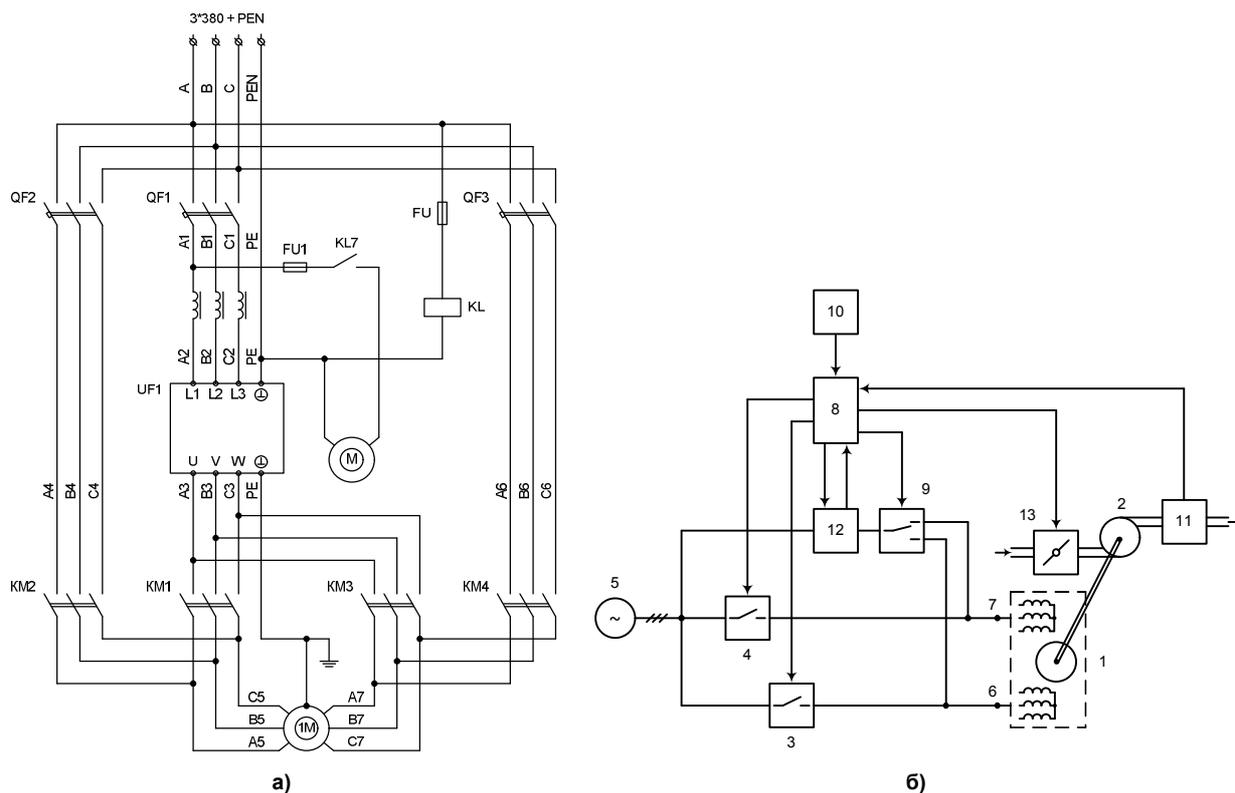
При питании обмоток от сети предусмотрено дроссельное регулирование производительности ДВ.

Предполагается, что возможность переключения электропитания двигателя ДВ с обмотки ВС на обмотку НС в сочетании с частотным регулированием скорости по схеме, представленной на рис. 1, а, обеспечит дополнительный ресурс энергосбережения. Соответственно возникает задача оценки этого ресурса при различных способах регулирования производительности.

Ниже проводится исследование и дается сравнительная оценка энергетической эффективности способов управления тягодутьевыми механизмами котлоагрегатов тепловых электрических станций с применением частотно-регулируемого электропривода и двухскоростного асинхронного двигателя. Сравниваются варианты дроссельного регулирования производительности на обмотках ВС и НС, питания обмотки ВС от ПЧ во всем диапазоне регулирования производительности и вариант с переключением ПЧ с обмотки ВС на обмотку НС без учета и с учетом к.п.д. электромеханической системы.

Производительность водогрейного котла, являющаяся его основным параметром, зависит от нагрузки, которая обычно изменяется от половины

\* Работа выполняется при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (гос. задание №2014/80).



**Рис. 1.** Силовая схема переключения обмоток (а) и схема устройства управления двухскоростным электродвигателем дутьевого вентилятора водогрейного котла (б). 1 – двухскоростной электродвигатель; 2 – дутьевой вентилятор; 3, 4, 9 – коммутационные аппараты; 5 – источник питания; 6, 7 – выводы обмоток низкой и высокой скоростей; 8 – блок управления; 10 – блок задания производительности; 11 – датчик производительности; 12 – преобразователь частоты; 13 – направляющий аппарат

номинальной до номинальной. Пропорционально производительности котла изменяется примерно в два раза производительность ДВ, система управления которым является одной из составных частей системы управления котельным агрегатом. Авторами предложен способ регулирования производительности тягодутьевых механизмов на основе сочетания частотного регулирования с переключением ПЧ с обмотки ВС на обмотку НС (и обратно) и дроссельного регулирования в диапазонах скоростей, близких к номинальным значениям скоростей на этих обмотках.

Разработано устройство [6], схема которого представлена на рис. 1, б, оно обеспечивает работу в двух режимах:

- дросселирования, когда производительность ДВ регулируется положением направляющего аппарата при постоянных скоростях вращения двухскоростного электродвигателя;

- частотного регулирования скорости при работе как на обмотке ВС, так и на обмотке НС, при этом направляющий аппарат полностью открыт.

Блок задания количества подаваемого воздуха 10 задает производительность  $Q_{зад}$  дутьевого вентилятора 2, которая удовлетворяет оптимальному соотношению топливо–воздух. Возможность выбора одного из названных режимов регулирования скорости обеспечивает повышение на-

дежности дутьевого вентилятора и всей системы управления отопительного котла при выходе из строя преобразователя частоты [7]. Также при работе в течение длительного времени в диапазонах регулирования скорости, близких к номинальным на обмотках ВС и НС, преобразователь частоты может быть выведен из работы, что позволяет сохранить его ресурс. Это целесообразно в связи с длительными режимами работы на указанных скоростях. К тому же вывод ПЧ из работы повышает устойчивость электропривода ответственного механизма к нарушениям электроснабжения: провалам напряжения и кратковременным (1–3 с) отключениям [8, 9].

На первом этапе переключение обмоток при питании от ПЧ рекомендовано осуществлять вручную после остановки двигателя. Это связано со сложностью синхронизации поля статора и частоты вращения ротора при кратковременной потере питания, связанной с переключением коммутационных аппаратов. В дальнейшем планируется реализация алгоритма принудительного гашения остаточного поля электродвигателя, рассмотренного в [10], либо режима «самоподхвата», реализованного в ПЧ серии ЭПВ [11].

При расчете потерь мощности и соответственно ресурса энергосбережения за основу принята методика, представленная в [12]. Естественная

напорная характеристика ДВ описывается зависи-  
мостью

$$H^* = 1,5 - 0,5(Q^*)^2,$$

где  $H^* = H/H_{ном}$ ,  $Q^* = Q/Q_{ном}$  – относительные  
величины напора и производительности.

В качестве базовых приняты номинальные ве-  
личины  $Q_{ном}$  и  $H_{ном}$ . Принято, что характеристика  
ДВ согласована с напорной характеристикой маги-  
страли, т. е. при полностью открытой трубопро-  
водной арматуре их номинальные параметры рав-  
ны между собой.

Искусственные напорные характеристики ДВ  
при регулируемой частоте вращения рассчитыва-  
ются по выражению

$$H_{и}^* = 1,5(\omega^*)^2 - 0,5(Q^*)^2,$$

где  $\omega^* = \omega/\omega_{ном}$  – относительное значение скоро-  
сти вращения ДВ для искусственной характери-  
стики.

Напорная характеристика магистрали пред-  
ставляется в виде

$$H^* = k_M(Q^*)^2,$$

где  $k_M = (1,5 - 0,5(Q^*)^2)/(Q^*)^2$  – коэффициент  
пропорциональности, учитывающий сопротивле-  
ния поворотов и местных сужений по длине маги-  
страли, длину и диаметр магистрали, трение  
транспортируемой среды о стенки, сопротивление,  
вносимое регулирующим аппаратом и др.

Естественные и искусственные напорные ха-  
рактеристики ДВ и магистрали, рассчитанные по  
приведенным зависимостям, представлены в от-  
носительных единицах на рис. 2, а. Приняты обозна-  
чения: 1 – естественная напорная характеристика  
ДВ при  $\omega^* = 1$ ; 2 – естественная напорная характе-  
ристика магистрали для  $k_M = 1$  при  $Q^* = 1$ ; 3 – ис-  
кусственная напорная характеристика магистрали  
для  $k_M = 2,7$  при  $Q^* = 0,75$ ; 4 – искусственная на-

порная характеристика магистрали для  $k_M = 5,5$  при  
 $Q^* = 0,5$ ; 5 – искусственная напорная характери-  
стика ДВ при  $\omega^* = 0,75$ .

Площадь контура *tsakt* на рис. 2, а пропор-  
циональна энергии, которую потребляет двухско-  
ростной электродвигатель, работая на обмотке ВС  
при питании от сети и регулировании производи-  
тельности ДВ методом дросселирования. Относи-  
тельная мощность, потребляемая из сети при пи-  
тании от преобразователя частоты либо при дрос-  
сельном регулировании:

$$P^* = \frac{Q^* H^*}{\eta_{АД} \eta_{ТМ} \eta_{Маг} \eta_{ПЧ}},$$

где  $\eta_{АД}$ ,  $\eta_{ТМ}$ ,  $\eta_{Маг}$ ,  $\eta_{ПЧ}$  – коэффициенты полез-  
ного действия двухскоростного электродвигателя,  
тягодутьевого механизма (дутьевого вентилятора),  
магистрали и преобразователя частоты.

В строке 2 табл. 1 приведены расчетные зна-  
чения относительной мощности  $P_{др}^*$ , потребляе-  
мой двухскоростным электродвигателем из сети в  
режиме регулирования производительности ДВ  
методом дросселирования. Данная зависимость  
представлена на рис. 2, б в виде графика 1. При  
расчетах принято допущение, что во всем диапа-  
зоне изменения производительности  $0,5 \leq Q^* \leq 1,0$   
электродвигатель равномерно загружен в течение  
года, и к.п.д. всех звеньев ( $\eta_{АД}$ ,  $\eta_{ТМ}$ ,  $\eta_{Маг}$ ,  $\eta_{ПЧ}$ )  
остаются неизменными. Средняя относительная  
мощность составляет  $P_{др.ср.}^* = 0,89$ .

Площадь контура *teakt* на рис. 2, а, пропор-  
циональна энергии, потребляемой двухскорост-  
ным электродвигателем за год при его работе на  
обмотке ВС, питании от преобразователя частоты  
и, соответственно, регулировании производи-  
тельности ДВ изменением скорости вращения. Расчет-

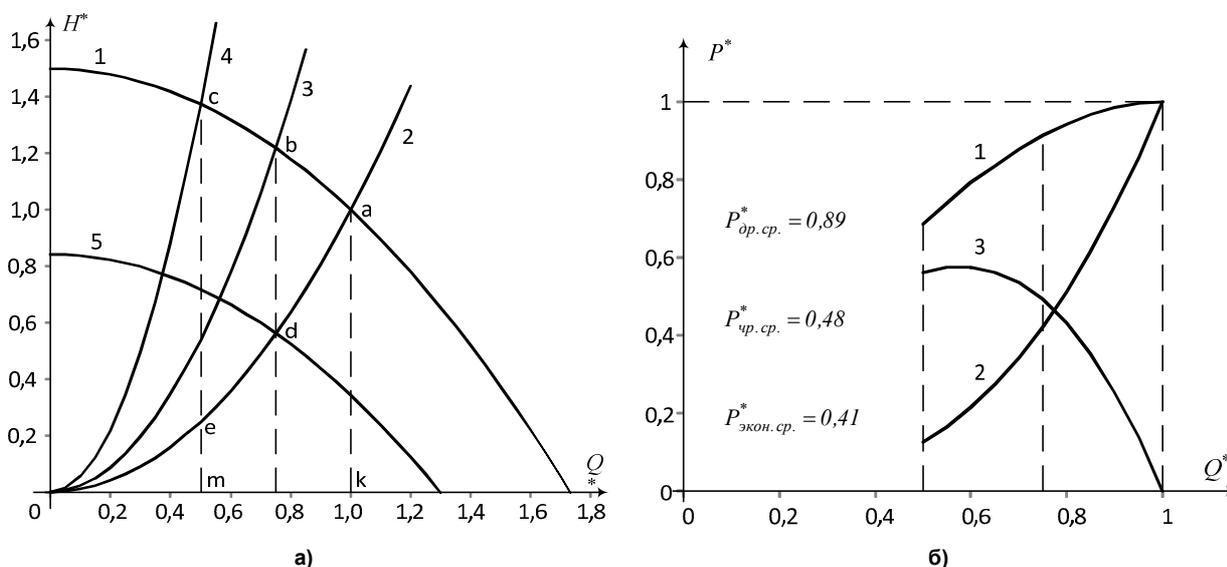


Рис. 2. Характеристики дутьевого вентилятора и магистрали (а) и относительная мощность, потребляемая ДВ (б) при работе двигателя на обмотке ВС с дроссельным и частотным регулированием производительности

Энергетические характеристики электропривода при работе двигателя на обмотке ВС при дроссельном и частотном регулировании производительности

Параметр	Относительная величина												
	$Q^*$	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0	$P_{\text{ср}}^*$
$P_{\text{др}}^*$		0,69	0,74	0,79	0,84	0,88	0,91	0,94	0,97	0,99	1,0	1,0	0,89
$P_{\text{чр}}^*$		0,13	0,17	0,22	0,27	0,34	0,42	0,51	0,61	0,73	0,86	1,0	0,48
$P_{\text{экон}}^*$		0,56	0,58	0,58	0,56	0,54	0,49	0,43	0,35	0,26	0,14	0	0,41

ные значения относительной мощности  $P_{\text{чр}}^*$  для указанного режима приведены в строке 3 табл. 1. Зависимость относительной мощности, потребляемой двигателем, представлена в виде графика 2 на рис. 2, б. Средняя относительная мощность при равномерной нагрузке котла  $P_{\text{чр.ср}}^* = 0,48$ , т. е. снижается на 46 %.

Площадь контура *esae* на рис. 2, а пропорциональна энергии, сэкономленной за год при работе электродвигателя на обмотке ВС при питании от ПЧ во всем диапазоне изменения производительности. Расчетные данные сэкономленной относительной мощности  $P_{\text{экон}}^*$  для указанного режима приведены в строке 4 табл. 1 и в виде графика 3 на рис. 2, б.

На рис. 3, а представлены в относительных единицах естественные и искусственные напорные характеристики магистрали и дутьевого вентилятора при переключении обмоток двигателя. Графики 1–5 подобны аналогичным графикам, приведенным на рис. 2, а, график 6 – искусственная напорная характеристика магистрали для  $k_M = 2,86$  при  $Q^* = 0,5$ . Как и в предыдущем случае, эти графики необходимы для расчета относительной

мощности при различных способах регулирования производительности. При анализе принимается, что полгода (в зимний период) двигатель работает на обмотке ВС с дроссельным либо частотным регулированием производительности ДВ, следующие полгода (в летний период) – на обмотке НС только с дроссельным регулированием.

Площадь контура *nbakn* на рис. 3, а пропорциональна энергии, которую потребляет двухскоростной электродвигатель, работая от сети на обмотке ВС в диапазоне изменения производительности ДВ от 0,75 до 1,0 при ее регулировании методом дросселирования. Площадь контура *ndakn* пропорциональна энергии, потребляемой электродвигателем в указанном диапазоне при питании обмотки ВС от преобразователя частоты. Площадь контура *dbad* пропорциональна энергии, сэкономленной в этом режиме работы двигателя.

Потребление мощности в этом случае характеризуется графиками 1–3, представленными на рис. 3, б. Они аналогичны графикам на рис. 2, б и построены по фрагментам строк табл. 1 для соответствующих способов регулирования в диапазонах  $0,5 \leq Q^* \leq 0,75$  и  $0,75 \leq Q^* \leq 1,0$ .

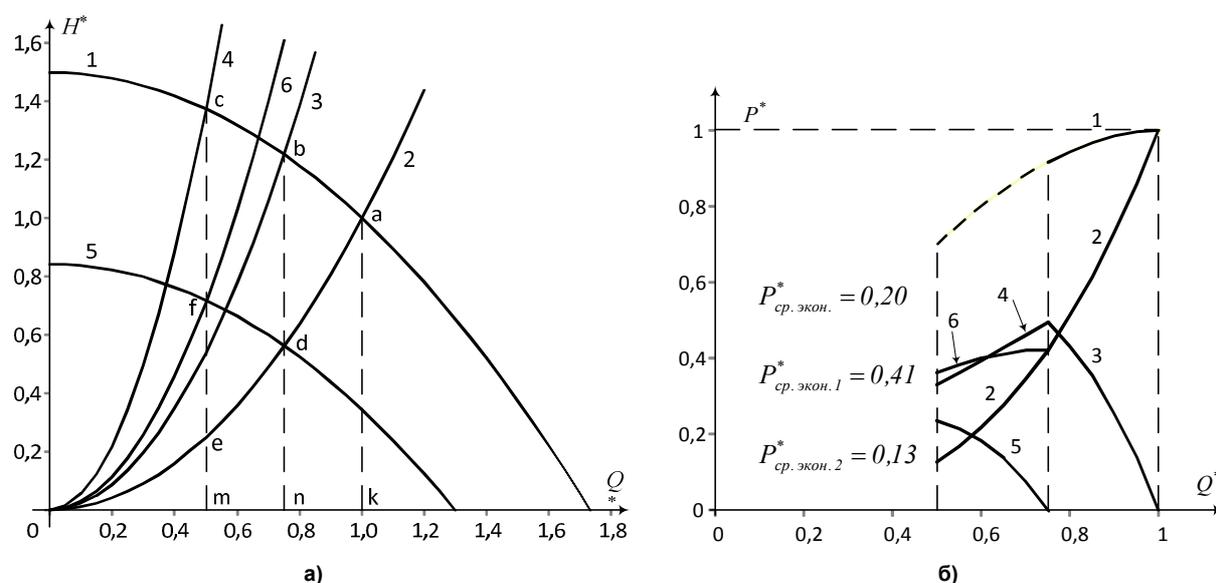


Рис. 3. Характеристики дутьевого вентилятора и магистрали (а) и относительная мощность, потребляемая ДВ (б), с дроссельным либо частотным регулированием производительности при питании от обмотки НС в диапазоне  $0,5 \leq Q^* \leq 0,75$ , и от обмотки ВС в диапазоне  $0,75 \leq Q^* \leq 1,0$

Зависимость относительной мощности  $P_{др.нс}^*$ , потребляемой двухскоростным электродвигателем при работе на обмотке НС в диапазоне  $0,5 \leq Q^* \leq 0,75$ , в режиме регулирования производительности ДВ методом дросселирования приведена на рис. 3, б в виде графика 6. График 4 характеризует зависимость сэкономленной относительной мощности  $P_{экон}^*$  при переключении электродвигателя с обмотки ВС (прерывистая линия на графике 1) на обмотку НС при дроссельном регулировании. Средняя экономия относительной мощности  $P_{ср.экон.1}^* = 0,41$ , что составляет 51 % потребляемой мощности. Средняя экономия относительной мощности в диапазоне  $0,75 \leq Q^* \leq 1,0$  при переходе от дроссельного регулирования к частотному снижается на 29 % и составляет  $P_{ср.экон.2}^* = 0,28$ .

График 5 представляет собой зависимость относительной мощности  $P_{экон}^*$ , сэкономленной при переключении ПЧ на обмотку НС в диапазоне производительности  $0,5 \leq Q^* \leq 0,75$ . Средняя экономия относительной мощности в этом случае  $P_{ср.экон.3}^* = 0,14$ , что составляет 35 % от относительной мощности, потребляемой двухскоростным электродвигателем из сети на обмотке НС в режиме регулирования производительности ДВ методом дросселирования.

В табл. 2 представлены средние относительные мощности при дроссельном  $P_{др.ср}^*$  (первый вариант) и частотном  $P_{чр.ср}^*$  (второй вариант) регулировании производительности на обмотке ВС в диапазоне  $0,5 \leq Q^* \leq 1,0$ . Приведена средняя относительная мощность при дроссельном  $P_{др.ср}^{**}$  (третий вариант) регулировании производительности на обмотках ВС и НС. Также приведена средняя мощность  $P_{чр-др.ср}^*$  при дроссельном регулиро-

вании в диапазоне  $0,5 \leq Q^* \leq 0,75$  и при питании от ПЧ на обмотке НС (четвертый вариант регулирования). Показано снижение относительных мощностей при сравнении данных вариантов.

Средняя экономия относительной мощности для третьего варианта  $P_{ср.экон}^* = 0,2$ , что составляет 22 % относительной мощности, потребляемой двигателем из сети в режиме регулирования производительности ДВ методом дросселирования ( $P_{ср.Σ}^* = 0,89$ ). Средняя экономия относительной мощности при сравнении первого и второго вариантов  $P_{экон.1}^* = 0,41$ , что составляет 46 % относительной мощности, потребляемой двигателем из сети в режиме регулирования производительности ДВ методом дросселирования ( $P_{ср.Σ}^* = 0,89$ ). Средняя экономия относительной мощности при сравнении первого и третьего вариантов  $P_{экон.2}^* = 0,13$ , что составляет 15 % относительной мощности, потребляемой двигателем из сети в режиме регулирования производительности ДВ методом дросселирования. Средняя экономия относительной мощности для четвертого варианта  $P_{ср.экон.3}^* = 0,14$ , что составляет 35 % относительной мощности.

В работе [12] для аналогичных режимов работы дутьевого вентилятора экономия относительной мощности оценена в 49 %, поскольку учитывались изменения коэффициентов полезного действия. Разница (46 и 49 %) составляет 3 % и не превышает погрешность, допустимую при оценочных расчетах. Следовательно, принятые допущения, что к.п.д. указанных выше звеньев ДВ остаются неизменными и их влияние можно не учитывать, являются правомерными.

Данные, представленные в табл. 2, получены без учета к.п.д. дутьевого вентилятора. Вместе с тем следует учитывать, что величина к.п.д. для тягодутьевых механизмов котлов имеет относительно невысокую величину и, кроме того, не является постоянной, так как зависит от нагрузки механизма. Так, согласно паспортным данным,

Таблица 2

Относительная мощность, потребляемая ДВ при различных способах регулирования производительности на обмотках ВС и НС

Средняя мощность	Обмотка ВС $0,75 \leq Q^* \leq 1,0$		Обмотка НС $0,5 \leq Q^* \leq 0,75$		$P_{ср.Σ}^*$	Снижение мощности		
	ДР	ПЧ	ДР	ПЧ		$P_{экон.1}^*$	$P_{экон.2}^*$	$P_{экон.3}^*$
$P_{др.ср}^*$	0,97	–	0,81 (вс)	–	0,89	0,41	–	
$P_{чр.ср}^*$	–	0,69	–	0,26 (вс)	0,48		0,13	
$P_{др.ср}^{**}$	0,97	–	0,40	–	0,69	0,20		
$P_{чр-др.ср}^*$	–	–	0,40	0,26	–	–	–	0,14

## Электромеханические системы

к.п.д. наиболее распространенных дутьевых вентиляторов типа ВД и ВДН составляет 0,6–0,7 [13]. ГОСТ 9725–82 определяет средневзвешенный к.п.д. вентиляторов в пределах 63 % при односкоростном электродвигателе, 73 % – при двухскоростном и 75 % – при плавном регулировании скорости вращения [14].

Известно, что к.п.д. асинхронного двигателя снижается при уменьшении скорости вращения, также снижается к.п.д. ПЧ при уменьшении частоты. Переключение на обмотку НС при скорости  $0,75\omega_n$  обеспечивает повышение к.п.д. двигателя до номинального уровня ( $\eta_{АДн(НС)} = 0,89$ ), который при питании от обмотки НС ниже, чем при работе на обмотке ВС ( $\eta_{АДн(ВС)} = 0,91$ ). Поэтому дать однозначную оценку влияния способа регулирования производительности на величину эквивалентного к.п.д.  $\eta_{ЭКВ} = \eta_{АД} \eta_{ТМ} \eta_{маг} \eta_{ПЧ}$  дутьевого вентилятора затруднительно. Необходим анализ потерь мощности с учетом изменения указанных составляющих к.п.д. ДВ.

С этой целью ниже сравниваются два способа подключения двухскоростного электродвигателя ДВ при частотном регулировании:

1. Во всем диапазоне регулирования  $0,5 \leq Q^* \leq 1,0$  двигатель работает на обмотке ВС и получает питание от преобразователя частоты (известный способ без переключения обмоток).

2. При производительности  $0,75 \leq Q^* \leq 1,0$  двигатель получает питание от ПЧ, работая на обмотке ВС, а в диапазоне  $0,5 \leq Q^* \leq 0,75$  ПЧ переключается на обмотку НС (способ частотного регулирования с переключением обмоток).

В табл. 3 приведены значения относительной производительности  $Q^*$ , расчетные значения относительной мощности  $P_{чр}^*$  для частотного регулирования производительности и к.п.д. звеньев ДВ [12]. Подключение двигателя осуществляется по первому способу. Коэффициент полезного действия турбомеханизма  $\eta_{ТМ}$  (непосредственно вентилятора и магистрали) во всем диапазоне принимается равным номинальному значению  $\eta_{ТМном} = 0,82$ , так как трубопроводная арматура полностью открыта. Из работ [5, 12] известно, что к.п.д. двухскоростного электродвигателя  $\eta_{АД}$  на обмотке ВС при регулировании скорости в диапазоне от  $\omega_n$  до

Таблица 3

Изменения к.п.д. отдельных звеньев ДВ при регулировании производительности по первому способу (работа на обмотке ВС)

Параметр	Относительная величина						Средняя величина
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
$Q^*$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
$P_{чр}^*$	0,13	0,22	0,34	0,51	0,73	1,0	0,51
$\eta_{ТМ}$	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
$\eta_{АД(ВС)}$	0,87	0,877	0,884	0,892	0,9	0,91	0,89
$\eta_{ПЧ}$	0,92	0,925	0,931	0,937	0,944	0,95	0,93
$\eta_{ЭКВ}$	0,656	0,665	0,675	0,686	0,697	0,71	0,68
$P_{чр1}^*$	0,198	0,331	0,504	0,743	1,047	1,408	0,71

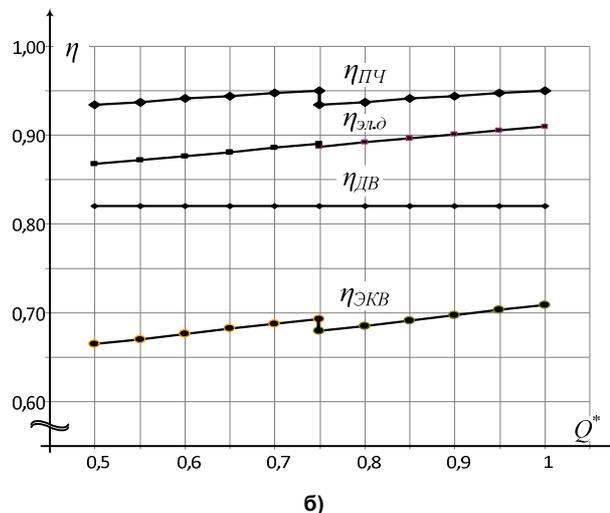
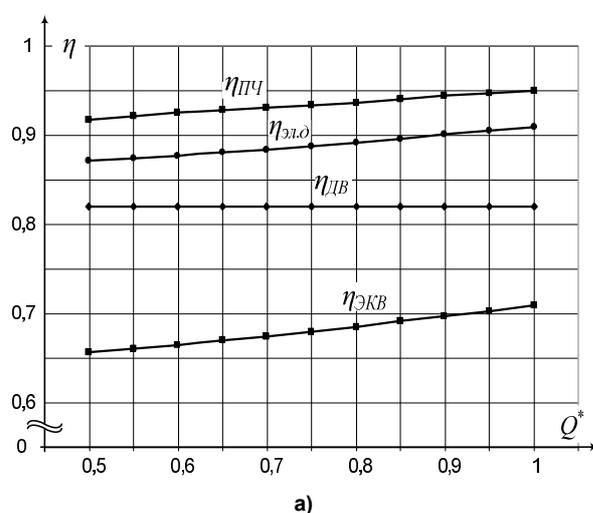


Рис. 4. Зависимости к.п.д. от производительности при подключении двигателя по первому (а) и второму (б) способам

Таблица 4

Изменения к.п.д. звеньев ДВ при регулировании производительности  
по второму способу (работа с переключением обмоток)

Параметр	Относительная величина						Средняя величина
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
$Q^*$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
$P_{чр}^*$	0,13	0,22	0,34	0,51	0,73	1,0	0,51
$\eta_{ТМ}$	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
$\eta_{АД(НС)}$	0,868	0,877	0,886	–	–	–	0,89
$\eta_{АД(ВС)}$	–	–	–	0,892	0,9	0,91	
$\eta_{ПЧ}$	0,934	0,941	0,947	0,937	0,944	0,95	0,94
$\eta_{ЭКВ}$	0,664	0,676	0,688	0,686	0,697	0,71	0,69
$P_{чр2}^*$	0,196	0,325	0,494	0,743	1,047	1,408	0,70

$0,5\omega_n$  (вниз) изменяется от номинального значения  $\eta_{АД(ВС)ном} = 0,91$  до  $0,96\eta_{АДн(ВС)} = 0,87$ , т. е. примерно на 4,4 %. Аналогично к.п.д. преобразователя частоты  $\eta_{ПЧ}$  изменяется от 0,95 до 0,92 (на 3,2 %). На рис. 4, а показаны графики к.п.д. механизмов, построенные по данным табл. 3.

Аналогичные значения к.п.д. и потребляемой мощности при подключении двигателя по второму варианту представлены в табл. 4 и на графиках рис. 4, б. Расчеты показали, что к моменту переключения электродвигателя с обмотки ВС на обмотку НС при  $Q^* = 0,75$  его к.п.д. снизился до  $0,975\eta_{АД(ВС)ном} = 0,88$ . После включения обмотки НС к.п.д. двигателя становится равным номинальному значению на обмотке НС, который ниже, чем к.п.д. на обмотке ВС (как отмечалось выше, для номинальных режимов работы к.п.д. электродвигателя на обмотке ВС  $\eta_{АД(ВС)ном} = 0,91$ , на обмотке НС –  $\eta_{АД(НС)ном} = 0,89$ ).

Таким образом, сравнение рассмотренных способов позволяет сделать вывод о незначительной разнице эквивалентных к.п.д. (0,68 и 0,69) и соответственно величин среднего потребления мощности (0,71 и 0,7). Средняя расчетная экономия относительной мощности при переходе от дроссельного регулирования производительности ( $P_{ср.Σ}^* = 0,89$ ) к частотному ( $P_{ср.Σ}^* = 0,48$ ) составляет около 46 %.

При номинальной мощности двигателя 250 кВт среднее снижение мощности составляет 115 кВт. Если принять, что двухскоростной двигатель работает непрерывно в течение года (8 тыс. ч), экономия электрической энергии составит 920 тыс. кВт·ч/год. Очевидно, что реальная экономия будет ниже, так как здесь не учитываются остановки котла, которые происходят в основном в летний период.

Переключение обмоток двухскоростного электродвигателя при питании от преобразователя частоты позволяет продлить срок службы дорогостоящего электрооборудования (двухскоростного электродвигателя и преобразователя частоты). Техничко-экономический эффект обеспечивается за счет ресурсосбережения и повышения надежности

тягодутьевых механизмов при сохранении показателей энергопотребления.

Поскольку все представленные выше выкладки выполнены в относительных единицах, сделанные выводы могут быть распространены на электроприводы дымососа и других агрегатов с двухскоростным электродвигателем и частотным регулированием скорости.

#### Выводы

1. Предложены способ и устройство регулирования производительности тягодутьевых механизмов на основе сочетания частотного регулирования с переключением ПЧ на обмотки ВС либо НС двухскоростного электродвигателя и дроссельного регулирования в диапазонах скоростей, близких к их номинальным значениям.

2. Дана оценка снижения потребления мощности при переходе от дроссельного на частотное регулирование производительности дутьевого вентилятора во всем диапазоне регулирования производительности. Средняя относительная мощность при равномерной нагрузке котла снижается на 46 %.

3. В диапазоне регулирования производительности от 0,5 номинальной до номинальной предложено осуществлять переключение преобразователя частоты на обмотку низкой скорости. При сохранении энергетических характеристик это обеспечит улучшение условий эксплуатации электродвигателя, меньший диапазон регулирования частоты (менее зарегулированный режим работы ПЧ), повышение эквивалентного к.п.д. дутьевого вентилятора.

4. Переключение обмоток двухскоростного электродвигателя при питании от преобразователя частоты позволяет продлить срок службы дорогостоящего электрооборудования, обеспечивает эффект за счет ресурсосбережения и повышения надежности тягодутьевых механизмов котла.

5. Предложенные технические решения и разработанная методика оценки энергоэффективности дутьевого вентилятора могут быть применены для аналогичных электроустановок с двухскоростным частотно-регулируемым электроприводом.

### Литература

1. Karandaev, A.S. Single-channel system of automatic control of the mode of burning in the boiler furnace / A.S. Karandaev, A.A. Radionov, R.R. Khramshin et al. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2013. – № 1. – С. 19–25.
2. Крылов, Ю.А. Энергосбережение и автоматизация производства в теплоэнергетическом хозяйстве города. Частотно-регулируемый электропривод / Ю.А. Крылов, А.С. Карандаев, В.Н. Медведев. – СПб.: Изд-во «Лань», 2013. – 176 с.
3. Карандаева, О.И. Повышение надежности электроприводов тепловой электростанции металлургического предприятия при внедрении преобразователей частоты: дис. ... канд. техн. наук / О.И. Карандаева. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. – 2011. – 172 с.
4. 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. – 2012. – Вып. 6. – С. 109–114.
5. Гоппе, Г.Г. Методы и технические средства энерго- и ресурсосберегающего управления турбомеханизмами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Г.Г. Гоппе. – Иркутск: ИрГТУ. – 2009. – 36 с.
6. Пат. 137437 Российская Федерация, МПК H02P25/18. Устройство управления двухскоростным электродвигателем дутьевого вентилятора котельного агрегата / Т.Р. Храминин, А.С. Карандаев, Р.Р. Храминин, А.Р. Губайдуллин, В.Р. Храминин, Г.П. Корнилов. – 2013145746/07; заявл. 11.10.2013; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 4.
7. Храминин, Р.Р. Повышение устойчивости двухскоростного частотно-регулируемого электропривода при нарушениях электроснабжения / Р.Р. Храминин, Т.Р. Храминин, А.Р. Губайдуллин // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. I Междунар. (IV Всерос.) науч.-техн. конф. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2013. – С. 27–30.
8. Анализ интенсивности отказов частотно-регулируемых электроприводов районных тепловых станций при нарушениях электроснабжения / В.Р. Храминин, К.Э. Одинцов, А.Р. Губайдуллин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2014. – Т. 14, № 2. – С. 68–79.
9. Способы повышения устойчивости частотно-регулируемых электроприводов при нарушениях электроснабжения / А.С. Карандаев, Р.Р. Храминин, Т.Р. Храминин и др. // Машиностроение: сетевой электрон. науч. журн. – 2013. – № 1. – С. 62–69.
10. Проблемы внедрения частотно-регулируемых электроприводов на ответственных механизмах тепловой электростанции / Ю.А. Крылов, И.А. Селиванов, А.С. Карандаев и др. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011. – № 4. – С. 19–25.
11. 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.
12. Герасимов, Д.О. Энергосберегающее управление тягодутьевыми механизмами котлоагрегатов тепловых электрических станций с использованием ресурсов электропривода / Д.О. Герасимов, Г.Г. Гоппе // Автоматизированные системы и комплексы. – 2009. – № 1. – С. 136–145.
13. Вентилятор дутьевой ВД-18 ТУ24.08.844-92. – <http://transmash.su/content/ventilyator-dutevoivd-18-tu2408844-92>.
14. ГОСТ 9725–82. Вентиляторы центробежные дутьевые котельные общие технические условия. – <http://www.derev-grad.ru/stroitelstvo/tehnikeskoe-regulirovanie-promyshlennosti/energetika/gost-9725-82--ventilyatory-centrobeznye-dute.html>.

**Радионов Андрей Александрович**, д-р техн. наук, профессор, проректор по учебной работе, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; radionovaa@susu.ac.ru.

**Карандаев Александр Сергеевич**, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры «Теоретические основы электротехники», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; askaran@mail.ru.

**Храминин Рифхат Рамазанович**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника и электротехнические системы», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; hramshinrr@mail.ru.

**Губайдуллин Андрей Рифович**, аспирант кафедры «Электротехника и электротехнические системы», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; AED174@mail.ru.

**Карандаева Ольга Ивановна**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника и электротехнические системы», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; oikaran@mail.ru.

**Храминина Екатерина Александровна**, лаборант-исследователь НИС кафедры «Электротехника и электротехнические системы», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; AED174@mail.ru.

Поступила в редакцию 29 июля 2014 г.

## EVALUATION OF ENERGY SAVING RESOURCE IN ELECTRIC DRIVE OF BLOWER FAN WITH TWO-SPEED INDUCTION MOTOR

**A.A. Radionov**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, radionovaa@susu.ac.ru,

**A.S. Karandaev**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, askaran@mail.ru,

**R.R. Khramshin**, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation, hramshinrr@mail.ru,

**A.R. Gubajdullin**, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation, AED174@mail.ru,

**O.I. Karandaeva**, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation, oikaran@mail.ru,

**E.A. Khramshina**, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation, AED174@mail.ru

The paper covers energy saving reserves at frequency performance control of a blower fan with two-speed induction motor of the hot-water boiler KVGМ-100. A new method of performance control is offered for draught systems; the method is based on switching of frequency converter from high-speed winding to low-speed winding and to the throttle control within the speed ranges close to the rated speed values for these windings. The paper presents diagram of the device providing the implementation of this method. The research group constructed natural and artificial characteristics of the blower fan and the main line when the motor operates on the high-speed winding at the throttle and frequency control. The comparative analysis of the power loss was carried out, and it was found that application of frequency control provides energy saving of up to 42 % compared with the throttle control. The comparative analysis of power consumption was carried out after implementation of the developed method under conditions of the same operation time on the windings of high and low speeds. As a result the authors claimed the effective decrease of power consumption from 22 % to 35 % depending on the combination of performance control methods. It was proved that the frequency control on the low speed winding does not result in equivalent loss of efficiency and consequently in the increase of the consumed power of the blower fan. It is noted that the technical and economic effect is provided due to the resource-saving and reliability improvement of the draught mechanisms while the power consumption remains the same. The authors offer some recommendations on the application of the developed method.

*Keywords: hot-water boiler, blower fan, two-speed electric motor, frequency control, winding changeover, characteristics, energy saving.*

### References

1. Karandaev A.S., Radionov A.A., Khramshin R.R., Khramshin V.R., Mamleeva Ju.I. [Single-channel system of automatic control of the mode of burning in the boiler furnace]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2013, no. 1, pp 19–25. (in Russ.)

2. Krylov Ju.A., Karandaev A.S., Medvedev V.N. *Jenergoberezhenie i avtomatizacija proizvodstva v teplojenergeticheskom hozjajstve goroda. Chastotno-reguliruemyj jelektroprivod* [Power saving and industrial automation in municipal heat and power facilities variable-frequency electric drive]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2013. 176 p.

3. Karandaeva O.I. *Povyshenie nadezhnosti jelektroprivodov teplovoj jelektrostantsii metallurgicheskogo predpriyatija pri vnedrenii preobrazovatelej 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.

4. Medvedev V.N., Karandaev A.S., Karandaeva O.I., Mamleeva Ju.I., Khramshina 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.)

5. Goppe G.G. *Metody i tehicheskie sredstva jenergo- i resursosberegajushhego upravlenija turbomehaniz-mami. Avtoref. dokt. diss.* [Methods and facilities for energy and resource saving control of turbine units. Abstract of doct. diss.]. Irkutsk, IrGTU, 2009. 36 p.

6. Khramshin T.R., Karandaev A.S., Khramshin R.R., Gubajdullin A.R., Khramshin V.R., Kornilov G.P. *Ustrojstvo upravlenija dvuhkorostnym jelektroprivodnym dut'evogo ventilatora kotel'nogo agregata* [Control device for two-speed electric motor of the boiler blower fan]. Patent RF, no. 137437, 2014.

7. Khramshin R.R., Khramshin T.R., Gubajdullin A.R. [Stability improvement of the two-speed frequency control electric drive at interruptions of power supply]. *Jelektroprivod, jelektrotehnologii i jelektrooborudovanie predpriyatij: sbornik nauchnyh trudov I Mezhdunarodnoj (IV Vserossijskoj) nauchno-tehnicheskoi konferencii* [Electric drive, electrical engineering and electrical facilities of enterprises: collection of scientific papers of I International (IV All-Russian) scientific and technical conference]. Ufa, 2013, pp. 27–30. (in Russ.)

8. Khramshin V.R., Odintsov K.E., Gubajdullin A.R., Karandaeva O.I., Kondrashova Ju.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. Karandaev A.S., Khramshin R.R., Khramshin T.R., Khramshin V.R., Gubajdullin 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.)

10. Krylov Ju.A., Selivanov I.A., Karandaev A.S., Gubajdullin A.R., Rovnejko V.V., Galljamov R.R. [Problems of variable-frequency electric drives introduction for thermal power station critical mechanisms]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Jelektromehanika* [Sci. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 19–25. (in Russ.)

11. Vinogradov A.B., Sibircev A.N., Chistoserdov V.L., Kolodin I.Ju., Monov D.A. [New functional capabilities and intelligent properties EPV series electric drives]. *Silovaja jelektronika* [Power Electronics], 2008, no. 3, pp. 61–64. (in Russ.)

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 kompleksy* [Automation systems and complexes], 2009, no. 1, pp. 136–145. (in Russ.)

13. Blower fan VD-18 TU 24.08.844-92 // <http://transmash.su/content/ventilyator-dutevoi-vd-18-tu2408844-92>.

14. GOST 9725-82. [Centrifugal blower fans for boiler houses, general specifications]. Available at: <http://www.derev-grad.ru/stroitelstvo/tehicheskoe-regulirovanie-promyshlennosti/energetika/gost-9725-82--ventilyatory-centrobeznye-dute.html>.

*Received 29 July 2014*