

## РАБОТА МОДЕРНИЗИРОВАННЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТУРБОМЕХАНИЗМОВ

П.В. ТЮТЕВА., Е.В. БЕЙЕРЛЕЙН

Томский политехнический университет

*В работе авторами рассматриваются особенности работы турбомеханизмов на основе модернизированных асинхронных двигателей при использовании в составе частотно-регулируемого электропривода. В статье приводится подробный расчет экономических параметров, получаемых в процессе эксплуатации модернизированных асинхронных двигателей в составе электропривода насосных агрегатов при реализации различных законов управления. Наибольшее снижение энергопотребления достигается путем совместного использования в насосной установке модернизированных энергоэффективных асинхронных двигателей и преобразователей частоты.*

*Ключевые слова: асинхронный двигатель, турбомеханизм, регулируемый электропривод, энергоэффективность, срок окупаемости.*

### Введение

Турбомеханизмы являются установками массового применения, около 25 % всей вырабатываемой электроэнергии расходуется в электроприводах насосов, вентиляторов и компрессоров. Техническое совершенство и экономичность электроприводов турбомеханизмов в значительной степени определяют рациональность их использования. Высокая экономичность электропривода позволяет турбомеханизмам производить работу с наименьшими энергетическими затратами [1, 2]. Наибольшего результата в данной области достигли такие концерны как *ABB, Danfoss, Siemens, Mitsubishi, Toshiba* [3, 4]. Использование разработанных ими преобразователей частоты и энергоэффективных асинхронных двигателей позволит экономить потребляемую энергию, за счет повышения эффективности работы привода при частичной нагрузке [5].

Одной из важнейших проблем, встающей при проектировании и эксплуатации асинхронного электропривода турбомеханизмов, является снижение потерь и повышение энергоэффективности при регулировании производительности. Например, в насосных установках систем водоотведения и водоснабжения из-за неэкономичных способов регулирования производительности теряется от 15 % и более всей потребляемой электроэнергии. Использование регулируемого по скорости электропривода позволит эффективно решить указанную проблему. Большинство насосных агрегатов в жилищно-коммунальном хозяйстве оснащены односкоростными трехфазными асинхронными двигателями (АД) с короткозамкнутым ротором. При этом наиболее экономически эффективно регулировать частоту вращения вала двигателя посредством преобразователя частоты.

В мировой практике, наряду с использованием частотно-регулируемого электропривода (ЭП), сложилось направление решения данной проблемы за счет проектирования и изготовления модернизированных АД с более высокими показателями энергоэффективности. В США и Евросоюзе приняты соответствующие соглашения – в США «Акт об энергетической политике» (*EPACT – EnergyPolicyAct*), в Евросоюзе спецификация СЕМЕР (СЕМЕР – *European Committee of*

*manu facturers of electrical machines and pow erelectronics*), которые регламентируют уровни энергоэффективности вновь проектируемых, изготавливаемых и эксплуатируемых электрических машин переменного тока. В двигателях малой и средней мощности при номинальной нагрузке значительную часть всех потерь составляют электрические потери. Их уменьшение может быть достигнуто за счет увеличения доли использования активных материалов. Таким образом, модернизированные двигатели – это АД с короткозамкнутым ротором, в которых, за счет увеличения массы активных материалов, а также специальных приемов при проектировании, удастся повысить КПД в номинальном режиме, при этом происходит незначительное увеличение цены двигателя [6–8].

Целью данной работы является рассмотрение работы частотно-регулируемого ЭП насосных агрегатов на основе модернизированных АД при учете особенностей механических характеристик насосных агрегатов как нагрузочных машин электроприводов.

#### **Постановка задачи исследования**

Для повышения энергосбережения при использовании регулируемого электропривода на основе АД возможны следующие варианты модернизации двигателей: без изменения геометрии поперечного сечения машины; с изменением геометрии поперечного сечения статора и ротора; а также выбор двигателя с большей высотой оси вращения общепромышленного исполнения. Реализация предложенных направлений модернизации АД [6, 7] для регулируемого электропривода, связанного с увеличением массогабаритных показателей, позволяет спроектировать машину, которая будет обладать улучшенными энергетическими характеристиками, а также меньшими затратами, приходящимися на срок эксплуатации. Энергетические характеристики, такие как КПД, коэффициент мощности, потери в АД и количество потребляемой энергии, позволяют оценить эффективность работы системы в целом, при этом в расчете производится учет характеристик АД, насоса и трубопровода.

Для проведения расчетов были выбраны следующие типы АД: 132М4, 160М4, 180М4, 200Л4 с полезной мощностью  $P_{2H}$ , равной соответственно 11; 18,5; 30; 45 кВт. Спроектированные на основе базовых машин энергоэффективные асинхронные двигатели обладают улучшенными энергетическими и экономическими показателями, удовлетворяющими требованиям СЕМЕР по уровням энергоэффективности  $IE1$  и  $IE2$ . Улучшение показателей энергоэффективности достигается за счет увеличения расхода активных материалов, т.е. при изменении длины сердечников статора и ротора на 110...130 % для уровня энергоэффективности  $IE2$ , и на 160...210 % для уровня энергоэффективности  $IE1$ , при этом число витков в обмотке фазы статора для  $IE2$  должно быть снижено на 10 %, а для  $IE1$  на 20...40 %.

Для оценки экономичности спроектированных энергоэффективных АД рассчитаем стоимость электроэнергии, потребляемой АД за год эксплуатации:

$$C_{Э} = \sum C_{ЭЭi} \cdot P_{li} \cdot t_i,$$

где  $C_{ЭЭi}$  – стоимость электроэнергии на конкретном году эксплуатации;  $P_{li}$  – мощность, потребляемая АД за год эксплуатации;  $t_i$  – время работы асинхронного двигателя, при работе в электроприводе насосных установок время работы за год составит 8760 часов.

Также рассчитаем процент экономии электроэнергии при использовании энергоэффективных АД:

$$\Delta_{Э} = \frac{C_{Э(БАЗ)} - C_{Э(IE2)}}{C_{Э(БАЗ)}} \cdot 100\%, \quad \Delta_{Э} = \frac{C_{Э(БАЗ)} - C_{Э(IE1)}}{C_{Э(БАЗ)}} \cdot 100\%,$$

где  $C_{Э(БАЗ)}$  – стоимость электроэнергии, потребленной за период эксплуатации базовым АД;  $C_{Э(IE2)}$  – стоимость электроэнергии, потребленной за период эксплуатации АД с уровнем энергоэффективности  $IE2$ ;  $C_{Э(IE1)}$  – стоимость электроэнергии, потребленной за период эксплуатации АД с уровнем энергоэффективности  $IE1$ .

Расчет срока окупаемости при использовании регулируемого ЭП насосного агрегата ведется при учете входящего в состав установки преобразователя частоты (табл. 3). Срок окупаемости  $T_{OK}$  находится из соотношения объемов капиталовложений к ежегодному доходу, то есть в данном случае – к годовой экономии электроэнергии:

$$T_{OK} = \frac{Ц_{ПЧ}}{C_{ЭЭ}},$$

где  $Ц_{ПЧ}$  – стоимость преобразователя частоты (преобразователи частоты *Danfoss*);  $C_{ЭЭ}$  – годовая экономия электроэнергии.

Для расчетов работы АД в составе частотно-регулируемого электропривода турбомеханизма принят реальный суточный график водопотребления, при этом принимаем, что насосный агрегат работает в составе станции второго подъема (работа насоса на открытую систему со статической и динамической составляющей напора). КПД насосного агрегата и преобразователя частоты в процессе регулирования частоты вращения АД приняты постоянными. Для расчетов используются насосные агрегаты К 160/20а, К 150-125-250, К 150-125-315, К 200-150-315, в состав данных насосных агрегатов входят рассматриваемые АД.

Прежде чем перейти к экономическому анализу характеристик, получаемых при эксплуатации общепромышленного и усовершенствованного АД, остановимся на вопросе получения нагрузочной механической характеристики. Для расчетов используем реальный цикл нагрузки, получаемый из графика реального суточного потребления.

Характеристика трубопровода с постоянными параметрами определяется величинами потерь напора на внутреннем трении, на трение потока о стенки рабочей сети и на преодоление местных сопротивлений, пропорциональных квадрату скорости потока или пропорциональных производительности насоса в квадрате. Характеристика сети определяется следующим уравнением:

$$H = H_{СТ} + R \cdot Q^2,$$

где  $R$  – коэффициент сопротивления сети;  $H_{СТ}$  – статический напор, идущий на подъём жидкости на определенную высоту;  $Q$  – производительность насосного агрегата. Коэффициент сопротивления сети зависит от следующих параметров: поперечного сечения трубопровода, протяженности сети, шероховатости стенок трубопровода, вязкости жидкости, наличия дополнительных элементов сопротивления (колен, обратных клапанов, задвижек и т.д.).

Характеристики насоса показывают взаимозависимость между напором  $H$ , подачей  $Q$ , мощностью  $N$  насосного агрегата при номинальной частоте вращения двигателя  $n_H$  и могут быть определены из каталожных данных. Характеристика насосного агрегата при номинальной частоте вращения, полученная из справочных данных, по формулам подобия может быть пересчитана для любой частоты вращения [1, 2]. Характеристики насоса при изменении частоты вращения могут быть представлены в виде

$$H = H_0 \left( \frac{n}{n_H} \right)^2 + Q^2 \frac{H_0 - H_H}{Q_H^2},$$

где  $n_H$  – номинальная частота вращения механизма;  $H_0$  – статический напор при номинальной частоте вращения и нулевой производительности;  $H_H$  – номинальный напор насоса;  $Q_H$  – номинальный расход насоса.

Для согласованной работы АД и насосного агрегата требуется знать механические характеристики как двигателя при различных способах регулирования частоты вращения, так и нагрузки, которая определяется через рабочие параметры насоса. Механическая характеристика насосного агрегата получена при совместном анализе характеристик трубопровода и насосного агрегата при изменении частоты вращения приводного АД. Момент сопротивления насосного агрегата

$$M_C = 9565 \frac{N}{n}.$$

Одна из основных особенностей турбомеханизмов – это зависимость статического момента сопротивления на валу насосного агрегата от частоты вращения вала  $M_C=f(n)$  – механическая характеристика. На характер данной зависимости влияет характеристика сети, т.е. соотношение между статической и динамической составляющими напора. На рис. 1 показаны характеристика насосного агрегата К 160/20а, характеристики трубопровода при различных значениях статической составляющей напора:  $H_{CT}=0$ ,  $H_{CT1}=0,25 \cdot H_H$ ,  $H_{CT2}=0,5 \cdot H_H$ ,  $H_{CT3}=0,75 \cdot H_H$ . На рис. 2 показаны характеристики насоса и трубопровода при изменении частоты вращения. Пересечения характеристик сети и насоса определяют рабочие точки насосного агрегата, характеристики соответствуют статической составляющей напора,  $H_{CT2}=0,5 \cdot H_H$ , и при поддержании постоянным номинального значения напора в сети трубопровода.

Представленные характеристики используются в дальнейшем для осуществления расчета механической характеристики насосного агрегата как механической нагрузки АД. Таким образом, используя данные, полученные при расчете механических характеристик насоса и АД, производится анализ экономической эффективности работы регулируемого ЭП.

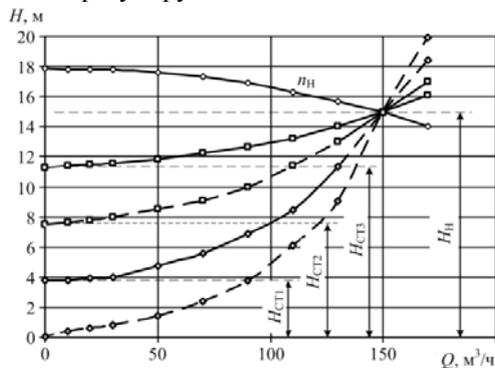


Рис. 1. Характеристики насосного агрегата К 160/20а и трубопровода при  $H_{CT} \neq \text{const}$

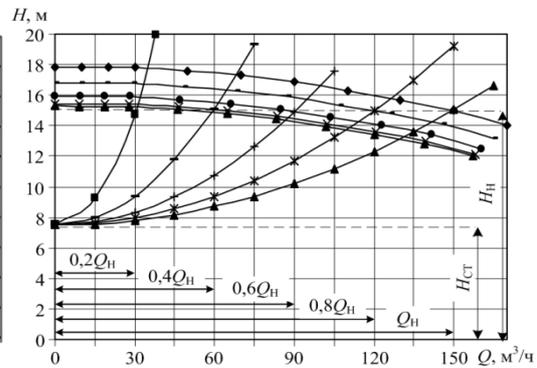


Рис. 2. Характеристики насоса К 160/20а и трубопровода при регулировании частоты вращения

Используя характеристики на рис. 1, 2, получаем характеристику нагрузки при  $H_{CT2}=0,5 \cdot H_H$ , а также при поддержании постоянного напора  $H_H=\text{const}$ . Для насосов характерна отличная от квадратичной (вентиляторной) зависимость момента на валу от © Проблемы энергетики, 2015, № 1-2

частоты вращения механизма, т.к. насосные агрегаты обычно работают на противодавление. На рис. 3 представлен вид механической характеристики. На участке регулирования частоты вращения от нуля до минимальной зависимость момента носит квадратичный характер, затем, на участке напора, достаточного для преодоления статической составляющей, характер зависимости  $M_C=f(n)$  изменяется и зависит от величины  $H_{СТ}$ . В технической литературе насосы обычно называют механизмами с вентиляторным типом нагрузки. Однако данное определение не вполне верно для ЭП насосного агрегата, т.к. зависимость оказывается более сложной.

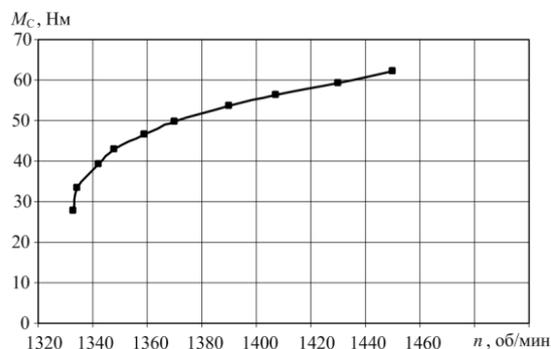


Рис. 3. Механическая характеристика насосного агрегата К 160/20а

Таким образом, можно сделать вывод, что использование формул подобия не позволяет с точностью определить рабочие параметры насосов, расчет механических характеристик следует проводить с учетом реального режима работы насосного агрегата. Полученные характеристики используются для расчета эффективности работы системы насосный агрегат – асинхронный двигатель. Для дальнейших расчетов используется характеристика насосного агрегата при  $H_{СТ2}=0,5 \cdot H_N$ .

#### Анализ результатов моделирования

Для оценки энергосбережения будет проводиться сравнительный расчет экономии электроэнергии при эксплуатации частотно-регулируемого ЭП насосной станции, в состав которого входит насос, преобразователь частоты и асинхронный двигатель при использовании АД общепромышленного исполнения и модернизированного АД, спроектированного на базе общепромышленного [3–5]. Модернизированный АД получен путем усовершенствования двигателя общепромышленного исполнения без изменения поперечной геометрии статора и ротора. Критерием оптимальности модернизированного АД служит показатель расходов, приходящихся на срок эксплуатации, учитывающий стоимость материалов и энергетические показатели [3].

На рис. 4 показан процент экономии от базового значения стоимости потребляемой электроэнергии при использовании энергоэффективных асинхронных двигателей. Как видно из проведенных расчетов, экономия потребленной электроэнергии не зависит от уровня цен на энергию.

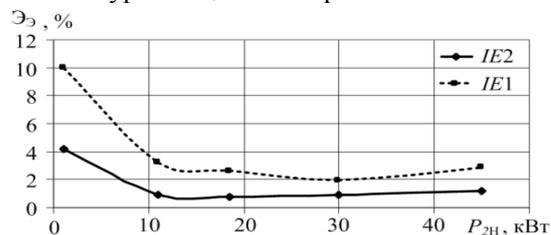


Рис. 4. Экономия электроэнергии при использовании энергоэффективных АД

Рассмотрим работу асинхронных двигателей в составе регулируемого ЭП насосных агрегатов, при этом будет рассматриваться работа с использованием общепромышленных и энергоэффективных АД, полученных на основе общепромышленных, с уровнем энергоэффективности  $IE1$ .

При эксплуатации насосных агрегатов возможна реализация различных законов регулирования, в общем виде закон регулирования может быть записан в виде  $U/f^{1+k/2}=\text{const}$  [1], где  $k$  – коэффициент, который зависит от вида механической характеристики насоса, может принимать значения от 2 до 4; большие значения соответствуют насосным агрегатам с большей статической составляющей напора. В табл. 1 представлены результаты расчетов стоимости потребляемой электроэнергии при эксплуатации регулируемого ЭП насосного агрегата и реализации различных законов управления (уровень цен на 2011 год) [6].

Таблица 1

Стоимость электроэнергии, потребленной ЭП за 1 год эксплуатации, руб

Тип АД	Закон регулирования	Мощность АД, кВт			
		11	18,5	30	45
Базовый АД	$U/f=\text{const}$	94,1	180,0	200,9	311,2
	$U/f^2=\text{const}$	94,0	180,7	201,2	314,7
	$U/f^{2,5}=\text{const}$	93,4	181,1	201,9	313,9
	$U/f^3=\text{const}$	94,0	181,7	202,1	315,1
АД с уровнем $IE1$	$U/f=\text{const}$	92,3	176,7	199,4	305,3
	$U/f^2=\text{const}$	91,8	176,8	200,4	306,7
	$U/f^{2,5}=\text{const}$	92,3	177,5	200,3	307,6
	$U/f^3=\text{const}$	92,3	177,3	199,7	308,2

На рис. 5 представлен процент экономии потребляемой электроэнергии при использовании модернизированных энергоэффективных двигателей с уровнем  $IE1$  по сравнению с базовыми АД, при реализации различных законов регулирования. Как видно, с ростом номинальной мощности двигателя, используемого в частотно-регулируемом ЭП насосного агрегата происходит изменение наиболее экономически выгодного закона регулирования [6, 7, 8]. Процент экономии не зависит от цены за 1 кВт электроэнергии.

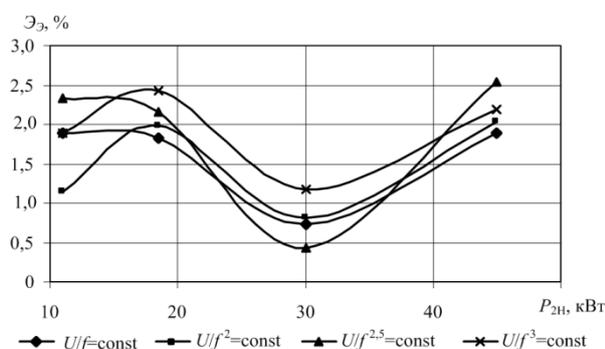


Рис. 5. Экономия электроэнергии при использовании регулируемого ЭП

Как видно из рис. 5, по сравнению с базовыми АД энергоэффективные машины при использовании различных законов регулирования оказываются более экономически выгодными. Однако при использовании различных асинхронных двигателей, а также при различных нагрузочных характеристиках насоса наиболее экономически выгодными оказываются разные законы регулирования частоты

вращения насоса. Так при использовании насосных агрегатов К 160/20а и К 200-150-315 при номинальных мощностях машин 11 и 45 кВт соответственно наибольшую экономию электроэнергии дает закон  $U/f^{2,5}=\text{const}$  – 2,33 % и 2,55 %, при эксплуатации насосов К 150-125-250 и К 150-125-315 с номинальными мощностями двигателей 18,5 и 30 кВт наибольшую экономию получаем при использовании закона  $U/f^3=\text{const}$ , при этом процент экономии 2,43 и 1,18 % от базового энергопотребления соответственно. Таким образом, расчет показывает важность выбора используемого закона регулирования для конкретных условий эксплуатации: номинальной мощности АД и вида нагрузочной характеристики насоса.

Проведенные расчеты при учете характеристик насоса и АД позволяют сказать, что наиболее экономичным является закон управления  $U/f^{2,5}=\text{const}$  и  $U/f^3=\text{const}$ , в дальнейшем приведем результаты расчетов при реализации закона управления  $U/f^{2,5}=\text{const}$  для насосного агрегата К 160/20а.

В табл. 2 приведены сроки окупаемости при замене нерегулируемого электропривода насосного агрегата на регулируемый, при этом были проведены расчеты для различных законов регулирования [9].

Таблица 2

Сроки окупаемости при использовании различных законов регулирования ЭП

Тип АД	Закон регулирования	Мощность АД, кВт			
		11	18,5	30	45
Базовый АД	$U/f=\text{const}$	1,37	1,82	1,03	1,08
	$U/f^2=\text{const}$	1,36	1,85	1,04	1,12
	$U/f^{2,5}=\text{const}$	1,31	1,84	1,05	1,10
	$U/f^3=\text{const}$	1,37	1,87	1,04	1,09
АД с уровнем IE1	$U/f=\text{const}$	1,28	1,72	0,94	0,98
	$U/f^2=\text{const}$	1,27	1,75	0,95	1,02
	$U/f^{2,5}=\text{const}$	1,22	1,74	0,95	1,00
	$U/f^3=\text{const}$	1,28	1,77	0,94	1,00

Как видно из табл. 2, срок окупаемости при эксплуатации регулируемого ЭП при учете характеристик как АД, так и насосного агрегата не превышает двух лет, при этом дополнительный срок окупаемости составляет около одного месяца.

### Заключение

Комплексное рассмотрение характеристик насоса, трубопровода, а также цикла нагрузки и энергетических характеристик АД позволяет оценить эксплуатационные характеристики при внедрении регулируемого ЭП в насосные установки. С ростом статической составляющей напора происходит уменьшение диапазона регулирования, при этом снижение скорости дает более интенсивное снижение момента, чем при квадратичной зависимости. Для определения рабочих параметров насосов недостаточно использования формул подобия, расчет механических характеристик насосного агрегата должен проводиться с учетом режима работы установки в целом. Полученные характеристики используются для расчета эффективности работы системы насосный агрегат – асинхронный двигатель.

Результаты расчетов показывают, что использование модернизированного АД в составе частотно-регулируемого ЭП насосного агрегата с большими, по сравнению с общепромышленным исполнением, массогабаритными показателями позволяет снизить потери электроэнергии, происходящие при эксплуатации АД в регулируемом электроприводе насосной установки. Большой диаметр провода и меньшее число витков в обмотке фазы статора позволяет снизить электрические потери, возникающие

в обмотках АД. Стоимость модернизированного АД оказывается выше, чем двигателя общепромышленного исполнения, увеличение стоимости компенсируется за счет улучшения энергетических показателей, а значит и уменьшения потребляемой электроэнергии в процессе эксплуатации. При этом меньшие потери в статоре АД позволяют снизить температуру нагрева обмотки, что повышает надежность и срок службы. Наибольший эффект энергосбережения для данного характера нагрузки насосного агрегата получается при реализации законов  $U/f^{2.5}=\text{const}$  и  $U/f^3=\text{const}$  для насосных агрегатов К 160/20а, К 200-150-315, К 150-125-250 и К 150-125-315 соответственно, что доказывает важность определения используемого закона управления для конкретного вида нагрузочной характеристики турбомеханизма. Дополнительный срок окупаемости при внедрении частотно-регулируемого электропривода на основе модернизированного АД, по сравнению с общепромышленным, составляет около одного месяца при общем сроке окупаемости, не превышающем 2 лет.

### Summary

*In this paper, the authors discuss the main features of turbo mechanisms based on improved induction motors for usage as a part of variable speed drive. The article gives a detailed calculation of economic parameters obtained during the operation of improved induction motors consisting of variable speed drives of pump units while implementing various control laws. The greatest reduction in energy consumption is achieved by shared use of improved induction motors with higher energy efficiency in pump units and variable speed drives with frequency converters.*

**Keywords:** *Induction motor, turbomechanism, variable speed drive, efficiency, payback period.*

### Литература

1. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый электропривод в насосных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006. 360 с.
2. Лезнов Б.С. Методика оценки эффективности применения регулируемого электропривода в водопроводных и канализационных насосных установках. М.: Машиностроение, 2011. 88 с.
3. ABB drive helps reduce treatment maintenance costs by £2000 // World Pumps. 2005. Issue 469. October 2005. P. 18–19.
4. Danfoss 40 years in the water pump industry // World Pumps. 2009. Issue 508. January 2009. P. 42.
5. Pemberton M. Variable speed pumping: myths and legends // World Pumps. 2005. Issue 460. January 2005. P. 22–24.
6. Тютеева П.В. Алгоритм оценки эффективности работы асинхронных двигателей в насосных агрегатах // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 315. № 4. С. 74–79.
7. Муравлева О.О., Тютеева П.В. Совершенствование асинхронных двигателей для регулируемого электропривода // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т. 310. № 2. С. 177–181.
8. Муравлева О.О., Тютеева П.В. Использование энергетически эффективных двигателей в регулируемом приводе насосов // Водоснабжение и санитарная техника: Ежемесячный научно-технический журнал. М.: Издательство ВСТ. 2008. № 5. С. 29–33.
9. Бейерлейн Е.В., Тютеева П.В., Муравлева О.О. Комплексная оценка затрат при проектировании энергоэффективных асинхронных двигателей // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2011. № 6. С. 25–28.

*Поступила в редакцию*

*27 октября 2014 г.*

**Тютева Полина Васильевна** – доцент кафедры «Электротехнические комплексы и материалы» Энергетического института Томского политехнического университета (ТПУ). Тел: 8(3822)563453.  
E-mail: Tyutevapv@gmail.com.

**Бейерлейн Евгений Викторович** – доцент кафедры «Электротехнические комплексы и материалы» Энергетического института Томского политехнического университета (ТПУ). Тел: 8(3822)563453.  
E-mail: Beierleinev@gmail.com.