

УДК 621.313.333

## АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В НАСОСНЫХ АГРЕГАТАХ

П.В. Тютёва

Томский политехнический университет

E-mail: TyutevaPV@elti.tpu.ru

*Предложен алгоритм оценки эффективности работы асинхронных двигателей в составе регулируемого электропривода насосных агрегатов с учетом различных законов регулирования. Алгоритм включает ввод входных данных, расчет энергетических и экономических характеристик насоса с последующей обработкой результатов. Оригинальность алгоритма заключается в совместном расчете энергетической и экономической части энергосберегающего асинхронного двигателя, что позволяет дать оценку экономической эффективности работы двигателей.*

**Ключевые слова:***Асинхронные двигатели, энергоэффективность, насосный агрегат, регулируемый электропривод.***Key words:***Induction motors, energy efficiency, pump unit, controlled electric drive.***Введение**

Во многих странах уже более 30 лет имеется опыт применения частотно-регулируемых приводов. В течение этого времени закладывались научные и методические основы, разрабатывались и совершенствовались технические средства управления электроприводом, совершенствовались технологические процессы и оборудование, подготавливались методики и алгоритмы оценки эффективности работы асинхронных двигателей в составе электропривода.

В нашей стране сложилась иная ситуация, частотно-регулируемые приводы, отвечающие требованиям надежности и электромагнитной совместимости с электрическими сетями, появились на российском рынке сравнительно поздно, их цена в условиях рыночной экономики достаточно высока. Это часто определяет нежелание предприятий использовать современные частотно-регулируемые электропривода, также остаются неопределенными вопросы относительно ожидаемого экономического эффекта от их внедрения.

Действительно, учитывая сравнительно высокую стоимость полупроводниковых преобразователей, применяемых для регулирования частоты вращения асинхронных приводов, на сегодняшний день наиболее важным является вопрос возврата средств, вложенных в их внедрение. Поэтому встает вопрос о разработке алгоритма позволяющего оценивать эффективность и экономическую целесообразность внедрения частотно-регулируемого электропривода (РЭП) для насосных агрегатов на основе асинхронных двигателей (АД).

**Постановка задачи исследования**

На данный момент существует несколько методик позволяющих оценить эффективность работы асинхронного двигателя, все эти методики можно объединить в две группы. Первая методика оценки экономической эффективности была разработана

Е.П. Бойко, Ю.В. Гаинцевым, Ю.М. Ковалевой [1]. В этой методике экономические расчеты при проектировании асинхронных двигателей проводятся для определения экономической эффективности новых разработок и технико-экономического обоснования выбора оптимального варианта. Данная методика за основную расчетную величину принимает суммарные затраты, приходящиеся на срок эксплуатации. Используется эта методика при проектировании АД для оценки экономической эффективности. Критерием целесообразности создания и внедрения новых разработок является экономический эффект.

Вторая методика связана с оценкой эффективности частотно-регулируемого электропривода. Вопросы энергосбережения всё чаще решаются сегодня с помощью высоких технологий, поэтому в ВОДГЕО Б.С. Лезновым, Н.П. Воробьевой, В.Б. Чебановым и другими была разработана методика расчета экономической эффективности, которая определяет именно экономическую эффективность, получаемую при внедрении частотно-регулируемого электропривода по сравнению с нерегулируемым [2]. Одно из главных направлений здесь занимает внедрение в различные отрасли промышленности и коммунальное хозяйство регулируемых электроприводов на основе преобразователя частоты и асинхронного электродвигателя.

Однако данные методики оценки эффективности энергосбережения не отвечают всем требованиям по учету характеристик двигателя, электропривода и системы, в которой данный электропривод эксплуатируется. Для совершенствования существующих методик была разработана алгоритмическая модель оценки эффективности работы регулируемого электропривода насосного агрегата на основе асинхронных двигателей, которая даст возможность сравнивать экономический эффект как от внедрения регулируемого электропривода в насосные агрегаты, так и от внедрения энергоэффективных АД взамен двигателей общепромы-

шленного исполнения. Энергоэффективные АД – это асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, в которых благодаря заложенному при проектировании увеличению массы активных материалов и специальных приемов проектирования удается поднять номинальный КПД при некотором увеличении цены двигателя, энергоэффективные двигатели также обладают высокой надежностью, увеличенным сроком службы, а также меньшими значениями шума и вибрации.

Разработанная алгоритмическая модель оценки эффективности работы регулируемого электропривода насосного агрегата на основе асинхронных двигателей является частью компьютерной модели, которая реализуется в виде программно-вычислительного комплекса экономической эффективности асинхронных двигателей. Любая компьютерная модель состоит из математической модели оценки экономической эффективности асинхронных двигателей, математического аппарата и алгоритмической модели или структуры программно-вычислительного комплекса [3]. Рассмотрим более подробно структуру алгоритмической модели.

Алгоритмическая модель предназначена для расчета энергетических и экономических характеристик энергоэффективного асинхронного двигателя при эксплуатации в составе регулируемого электропривода насосного агрегата при заданном законе управления и может применяться для научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Алгоритмическая модель, представляющая собой структуру программно-вычислительного комплекса, может быть разбита на блоки:

1. Ввод входных данных.
2. Расчет энергетических характеристик.
3. Расчет экономических характеристик.
4. Обработка результатов расчета.

Алгоритм рассматриваемой математической модели оценки экономической эффективности асинхронных двигателей в составе насосных агрегатов при различных законах управления представлен на рис. 1. Главным достоинством алгоритма является совместный расчет энергетических и экономических характеристик и параметров энергосберегающего АД, что позволит всесторонне оценивать их экономическую эффективность.

В качестве входных данных для алгоритмической модели (Блок 1, рис. 1) оценки эффективности асинхронных двигателей служат следующие параметры:

- Механическая характеристика центробежного насосного агрегата  $M_c=f(n)$ , получаемая на основе данных трубопровода и насоса, работающего в открытой системе водоснабжения с противодавлением [4], а также цикл нагрузки насосного агрегата, получаемого из реального суточного графика водопотребления. Реальный суточный график водопотребления небольшого населенного пункта принят ориентировочно,

однако конкретные значения расхода могут быть получены только на основе натурных испытаний предполагаемого объекта.

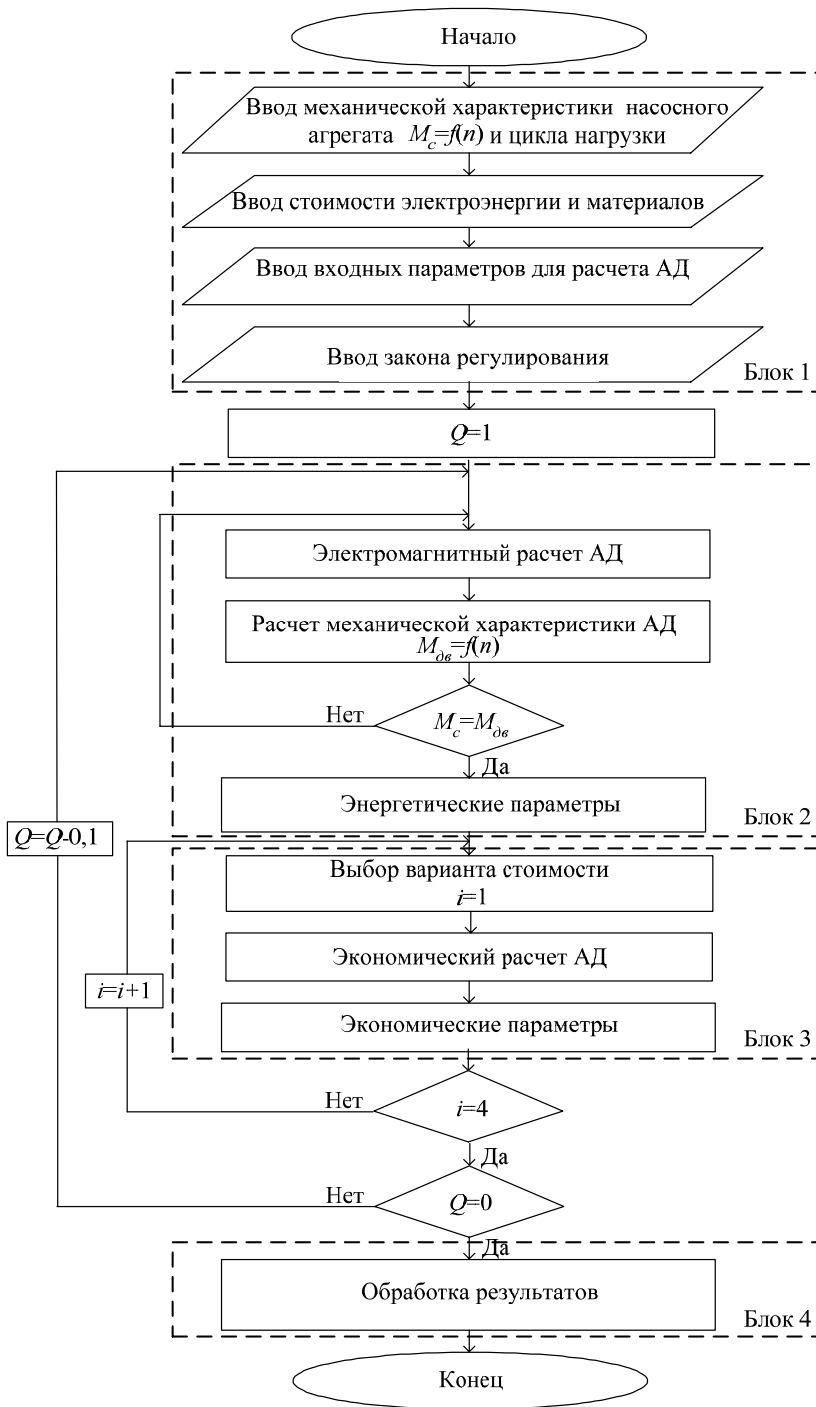
Цикл нагрузки представляет собой зависимость времени работы от производительности насосного агрегата  $t^*=f(Q^*)$ , то есть показывает, какую долю из общего времени работы насосный агрегат работает с определенной производительностью в диапазоне  $Q^*=0,1\dots 1,0$ . Доля времени определяется:

$$t^* = \frac{t_{yi}}{t_{cym}},$$

где  $t_{yi}$  – время работы насосного агрегата в течение суток при определенном значении производительности,  $t_{cym}$  – длительность суток (24 ч).

- Стоимость электроэнергии и материалов, при этом учитывается тенденция роста стоимости электроэнергии [5, 6].
- Поперечная и продольная геометрия АД (общепромышленного или базового и энергоэффективного) [7].
- Закон регулирования производительности насосного агрегата. В практике внедрения РЭП возможно использование преобразователей частоты с векторным и скалярным управлением. Однако в насосных агрегатах наиболее целесообразным будет являться использование скалярного управления, т. к. для управления насосным агрегатом не требуется широкого диапазона регулирования. Также скалярный метод управления обладает требуемой простотой и надежностью. Для насосных агрегатов возможно применение различных законов управления, в общем виде закон управления может быть записан как  $U/f^{1+k/2}=\text{const}$  [4], где  $k$  – коэффициент, зависящий от вида механической характеристики насоса,  $k=2, 3, 4$ , большие значения соответствуют характеристикам насоса с большей статической составляющей напора [2, 4]. Однако в преобразователях частоты для насосных агрегатов используется один скалярный закон  $U/f=\text{const}$ , поэтому требуется исследование законов управления предназначенных именно для данного вида нагрузки.

Расчет на основе программно-вычислительного комплекса оценки экономической эффективности асинхронных двигателей охватывает диапазон производительности насосного агрегата  $Q^*=0,1\dots 1,0$ , а также различные варианты стоимости электроэнергии. Расчет ведется на основе блоков расчета, Блок 2 – включает в себя энергетический расчет, в данном блоке происходит определение рабочей точки АД механическая характеристика АД  $M_{об}=f(n)$  сравнивается с характеристикой насосного агрегата  $M_c=f(n)$ , Блок 3 – экономический расчет. К энергетическим параметрам, получаемым на основе расчета Блока 3, относятся КПД и коэффициент мощности АД, количество потребляемой электроэнергии за год  $\Sigma W$  насосного агрегата системы водоснабжения, а также потери в асинхрон-



**Рис. 1.** Алгоритм расчета эффективности работы регулируемого электропривода насосных агрегатов при различных законах регулирования

ном двигателе в процессе эксплуатации. Экономические параметры, получаемые в Блоке 3, рассмотрены ниже.

Стоимость электроэнергии потребляемой насосным агрегатом за год эксплуатации в случае нерегулируемого и регулируемого электропривода:

$$C_{ЭЭ_{нр\text{ЭП}}} = \Sigma W_{нр\text{ЭП}} \cdot C_{ЭЭ},$$

$$C_{ЭЭ_{р\text{ЭП}}} = \Sigma W_{р\text{ЭП}} \cdot C_{ЭЭ},$$

где  $\Sigma W_{нр\text{ЭП}}$  – количество электроэнергии, потребленной за год в случае нерегулируемого электропривода на основе АД;  $\Sigma W_{р\text{ЭП}}$  – количество электроэнергии, потребленной за год в случае регулируемого электропривода насосного агрегата на основе АД;  $C_{ЭЭ}$  – стоимость электроэнергии за 1 кВтч потребленной энергии. Стоимость электроэнергии, потребляемой насосным агрегатом за год эксплуатации, может быть рассчитан при использовании как базового АД, так и энергоэффективного АД в составе насосного агрегата.

Тогда экономия потребленной электроэнергии за год может быть определена как  $\mathcal{E}_3 = C_{\text{ЭЭ}_{\text{нрэл}}} - C_{\text{ЭЭ}_{\text{рэл}}}$ , по такому же принципу определяется экономия потребленной электроэнергии за год при переходе с нерегулируемого электропривода на регулируемый электропривод на основе энергоэффективной машины.

Для определения процента экономии электроэнергии при внедрении регулируемого электропривода вместо нерегулируемого воспользуемся формулой справедливой для базовых и энергоэффективных АД:

$$\mathcal{E}_3\% = \frac{C_{\text{ЭЭ}_{\text{нрэл}}} - C_{\text{ЭЭ}_{\text{рэл}}}}{C_{\text{ЭЭ}_{\text{нрэл}}}} \cdot 100\%.$$

Также на основе полученных данных будет производиться расчет срока окупаемости при эксплуатации электропривода насосного агрегата, в состав которого входит преобразователь напряжения или преобразователь частоты, в зависимости от проводимых исследований. Срок окупаемости  $T_{\text{ок}}$  определяется как отношение объемов вложений к предполагаемому ежегодному доходу (годовой экономии электроэнергии). При переходе на регулируемый электропривод на основе базовых и энергоэффективных машин  $T_{\text{ок}} = C_{\text{п}} / \mathcal{E}_3$ , где  $C_{\text{п}}$  – стоимость преобразователя частоты.

Экономические параметры рассчитывались при следующих вариантах стоимости за электроэнергию [5, 6]:

1 и 2 варианты – тариф Региональной энергетической компании Томской области на 2008 г. с учетом НДС 1,43 р за 1 кВт·ч; плановый ежегодный рост стоимости электроэнергии 25 % (1 вариант) и 10 % (2 вариант);

3 вариант – тариф Евросоюза на 2008 г. 0,121 € за 1 кВт·ч (расчеты проводились при курсе €=45 р); в среднем ежегодный рост тарифов в Евросоюзе составляет около 5 %.

Блок 4 служит для сбора и обработки результатов расчета, полученных на основе Блоков 2 и 3. Алгоритмическая модель оценки эффективности работы регулируемого электропривода насосных агрегатов обеспечивает выполнение следующих расчетов (расчет производится на основе базовых и энергоэффективных АД):

- энергетических характеристик при изменении производительности насосного агрегата на основе цикла нагрузки (КПД, коэффициент мощности);
- электрических потерь в обмотках статора и ротора, а также постоянных потерь в АД при изменении производительности насосного агрегата на основе цикла нагрузки;
- тепловых параметров, таких как среднее превышение температуры обмотки статора;
- экономических характеристик – количество потребленной электроэнергии, стоимость по-

требленной электроэнергии, экономия потребленной электроэнергии при реализации различных законов управления на основе цикла нагрузки. Также на основе данных, полученных при помощи алгоритмической модели, производится расчет срока окупаемости.

Экономический расчет производится на основе данных энергетического расчета, при этом данные экономического расчета позволяют проводить технико-экономическое обоснование эффективности внедрения регулируемого электропривода.

### Результаты моделирования

Для того, чтобы оценить экономическую эффективность работы АД в электроприводе насосного агрегата при частотном регулировании частоты вращения, рассчитаем количество энергии потребляемой насосным агрегатом согласно циклу нагрузки [4]. В табл. 1 представлено количество потребленной энергии в зависимости от закона регулирования частота вращения и типа АД; эти данные получены на основе данных Блока 2. Согласно результатам расчета количество потребляемой электроэнергии сокращается при применении энергоэффективных АД взамен общепромышленных в составе регулируемого электропривода насосных агрегатов. Уменьшение количества потребленной электроэнергии происходит за счет улучшения энергетических показателей, в среднем сокращение энергопотребления составляет 2,54...0,74 % от энергопотребления общепромышленного АД.

На рис. 2 представлена экономия потребляемой электроэнергии для энергоэффективных АД по сравнению с общепромышленными при реализации различных законов регулирования. Согласно данным на рис. 2 с повышением мощности двигателя ( $P_{2н}$ ), используемого в насосном агрегате, происходит изменение наиболее экономически выгодного закона регулирования производительности насосного агрегата [1, 4]. При этом процент экономии электроэнергии не зависит от цены за 1 кВт·ч электроэнергии.

**Таблица 1.** Количество потребленной насосным агрегатом электроэнергии, кВт·ч

Тип АД	Вид закона	Мощность АД, кВт			
		11,0	18,5	30,0	45,0
Базовый	$U/f = \text{const}$	65791	100704	89903	111405
	$U/f^2 = \text{const}$	65733	101089	90059	112685
	$U/f^{1.5} = \text{const}$	65323	101341	90359	112402
	$U/f = \text{const}$	65758	101635	90453	112810
Энергоэффективный	$U/f = \text{const}$	64550	98868	89240	109296
	$U/f^2 = \text{const}$	64202	98905	89668	109815
	$U/f^{1.5} = \text{const}$	64572	99325	89626	110124
	$U/f = \text{const}$	64517	99162	89385	110342

На рис. 2 наглядно видно, что по сравнению с общепромышленными АД энергоэффективные АД при использовании любого закона регулирования оказываются более экономически выгодными. Од-

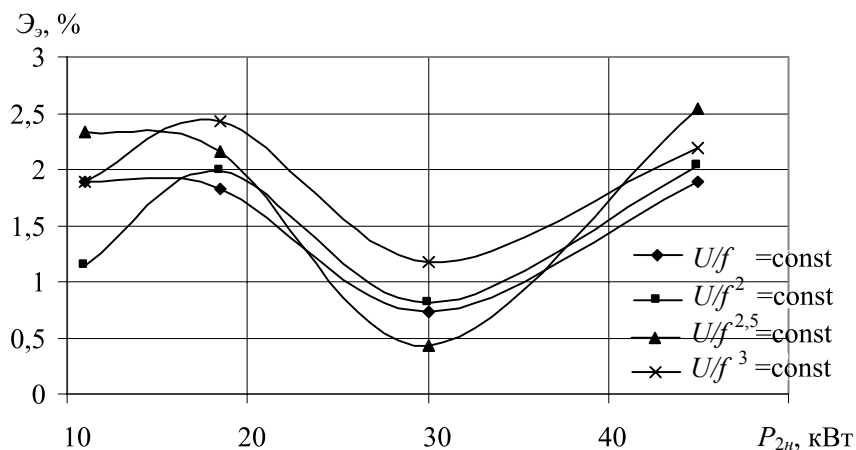


Рис. 2. Экономия электроэнергии за 10 лет эксплуатации при использовании регулируемого электропривода

нако в насосных агрегатах, с различными нагрузочными характеристиками насоса наиболее экономически выгодными оказываются различные законы регулирования частоты вращения насоса. Так, при использовании насосного агрегата К 160/20а и К 200-150-315 при мощности двигателя 11 и 45 кВт, соответственно наибольшую экономию электрической энергии дает закон  $U/f^{2.5} = const$  – 2,33 и 2,55 %. При эксплуатации насосов К 150-125-250 и К 150-125-315 с мощностями АД 18,5 и 30 кВт соответственно наибольшую экономию даст использование закона  $U/f^2 = const$ , экономия составит 2,43 и 1,18 % от базового потребления соответственно. Таким образом, данные расчеты показывают важность определения используемого закона регулирования для конкретных условий эксплуатации: мощности АД, а также вида нагрузочной характеристики насосного агрегата [1, 4].

На основе результатов расчета алгоритмической модели проведем расчет срока окупаемости при эксплуатации ЭП насосного агрегата, в состав которого входит преобразователь частоты. Срок окупаемости  $T_{ок}$  определяется как отношение объемов вложений к предполагаемому ежегодному доходу, то есть в нашем случае годовой экономии электроэнергии. Срок окупаемости при замене нерегулируемого электропривода при заданных мощностях насосного агрегата и характеристиках трубопровода представлен в табл. 2, для российского и европейского уровней цен за электроэнергию [5, 6].

Сроки окупаемости при реализации различных законов управления получаются от одного до двух лет (российский уровень цен). Так как сроки окупаемости приближаются к 1 году, то на них не оказывает влияние динамика роста цен на энергоносители (1 и 2 вариант). За счет увеличения экономии электроэнергии при реализации европейского сценария происходит снижение срока окупаемости (3 вариант). Возврат вложенных средств во внедрение регулируемого электропривода насосного агрегата при европейском уровне цен осуществляется за срок менее полугода.

Таблица 2. Диапазон изменения срока окупаемости при всех законах регулирования, лет

Тип АД	Мощность АД, кВт			
	11,0	18,5	30,0	45,0
1, 2 вариант уровня цен				
Базовый	1,31...1,37	1,82...1,87	1,03...1,05	1,08...1,12
Энергоэффективный	1,22...1,28	1,72...1,77	0,94...0,95	0,98...1,02
3 вариант уровня цен				
Базовый	0,34...0,36	0,48...0,49	0,27	0,28...0,29
Энергоэффективный	0,26...0,27	0,38...0,39	0,18	0,19...0,20

Учитывая диапазон изменения срока окупаемости (табл. 2), для всех законов регулирования следует отметить, что закон регулирования не влияет на срок окупаемости базового и энергоэффективного АД. С учетом европейского уровня цен период окупаемости значительно меньше, чем при российском, и в среднем составляет 0,35 г. для базового АД и 0,26 г. для энергоэффективного АД. При российском уровне цен сроки окупаемости в среднем: для базового АД – 1,33 г., для энергоэффективного АД – 1,24 г. С переходом от базового к энергоэффективному АД срок окупаемости уменьшается на 7,7 % при российском уровне цен и на 36,3 % при европейском.

С наметившейся тенденцией роста цен на энергоносители внедрение частотно-регулируемого электропривода на основе энергоэффективных АД является экономически целесообразным способом энерго- и ресурсосбережения. При европейском уровне цен (3 вариант) сроки окупаемости по сравнению с 1 и 2 вариантом сокращаются в 4...5 раз. Поэтому в ситуации значительного роста цен на энергоносители следует вкладывать средства в энергосберегающие технологии, что позволит повысить конкурентоспособность в дальнейшем.

**Выводы**

Разработанная в виде программно-вычислительного комплекса алгоритмическая модель оцен-

ки эффективности работы асинхронных двигателей в насосных агрегатах может быть использована для решения различных задач. Комплекс позволит осуществлять расчет экономической эффективности при использовании различных суточных графиков водопотребления и циклов нагрузки, характеристиках трубопровода и значениях статической составляющей напора сети. Алгоритм включает ввод входных данных, расчет энергетических и экономических характеристик насоса с последующей обработкой результатов. Алгоритмическая модель эффективности работы асинхронных двигателей в насосных агрегатах позволяет производить расчет экономических и энергетических параметров на основе геометрии базовых и энергоэффективных двигателей, кроме того возможна реализа-

ция различных законов регулирования частоты вращения.

Разработанная алгоритмическая модель эффективности работы асинхронных двигателей в насосных агрегатах используется для осуществления технико-экономического обоснования эффективности внедрения регулируемого электропривода в области ЖКХ, в частности, насосного хозяйства. Она позволяет обосновать экономическую целесообразность внедрения энергоэффективных асинхронных двигателей в привод насосных агрегатов. Будет актуальна для предприятий, осуществляющих проектирование и выпуск асинхронных двигателей для нужд ЖКХ, а также жилищных компаний, желающих повысить свою конкурентоспособность и интерес со стороны потенциальных потребителей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойко Е.П., Гаинцев Ю.В., Ковалев Ю.М. Асинхронные двигатели общего назначения. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.
2. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
3. Птах Г.К. Методологические аспекты разработки компьютерных моделей электромеханических преобразователей // Известия вузов. Электромеханика. – 2003. – № 1. – С. 7–11.
4. Муравлева О.О., Тютеева П.В. Использование энергетически эффективных двигателей в регулируемом приводе насосов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2008. – № 5. – С. 29–33.
5. Приказ № 69/508 от 27.11.2007. РЭК Томской области. О тарифах на электрическую энергию, поставляемую потребителям Томской области [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://rec.tomsk.gov.ru/document/docto/12992.html>. – 10.06.2009.
6. Песковская П. Правительство готовит бум тарифов // Коммерсантъ. – 2008. – № 70 (3887). – 24 апреля.
7. Муравлева О.О., Тютеева П.В. Совершенствование асинхронных двигателей для регулируемого электропривода // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310. – № 2. – С. 177–181.

Поступила 10.05.2009 г.

УДК 621.313.32

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ НА ОСНОВЕ МЕТОДА QR РАЗЛОЖЕНИЯ

Н.В. Шишков

Инновационный Евразийский университет, г. Павлодар, Казахстан  
E-mail: serg\_nikoni@rambler.ru

*Рассмотрен метод определения основных параметров двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением с использованием метода QR разложений. Показаны относительные ошибки в определении электрических параметров электродвигателей различной мощности.*

#### Ключевые слова:

*Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения, математическая модель, идентификация параметров, QR метод разложения.*

#### Key words:

*Direct current motor of series excitation, mathematical model, parameter identification, QR decomposition technique.*

Параметры двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением (ДПТ ПВ), определяющие эксплуатационные характеристики и надежность, в частности, активные сопротивления и индуктивности обмоток, как показано в работе [1], зависят от теплового режима нагрузки и

технического состояния и могут отклоняться от номинального значения на 30...40 % и более. Это влечет за собой ухудшение качества управления в статических и динамических режимах работы, снижается эффективность и надежность функционирования.