

использование такого алгоритма затруднено наличием ограничений на скорость нарастания управляющего сигнала во многих технологических процессах.

4) использование функций с введением в степень и извлечением корня не продемонстрировали хороших результатов. Скорее всего это обусловлено нулевой величиной производной (или бесконечностью) при значении ошибки равной 0. Введение смещений функций усложнит процесс настройки при практическом использовании.

Окончательные выводы для прикладного использования можно будет сделать только при тестировании работы алгоритмов еще по каналу возмущения и работе при наличии помех.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Олссон Г., Пиани Дж. Цифровые системы автоматизации и управления. — СПб.: Невский проспект, 2001. — 557 с.
2. Пат. 5,570,282 США МКИ G05B 013/02. Multivariable nonlinear process controller P.D. Hansen, P.C. Badavas; The Foxboro Company. — № 333161; Заявл. 29.10.1996; Опубл. 01.11.1994; НКИ 700/41. — 15 с.
3. Пат. 2120655 РФ МКИ G05B011/36. Пропорционально-интегральный регулятор с ограничениями выходных сигналов/ Говоров А.А., Баженов А.В., Говоров С.А. — № 98102222; Заявл. 19.08.1997; Опубл. 11.01.1995. — 5 с.

### АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ НАСОСА

Жакупов Е.С.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Жилищно-коммунальное хозяйство является крупнейшим потребителем энергии в стране, и самой затратной отраслью российской экономики, в которой энергоресурсы используются крайне нерационально. Насосные агрегаты, используемые в ЖКХ, на основе асинхронных двигателей (АД) являются одними из самых массовых потребителей электроэнергии. Один из путей повышения экономичности электропривода (ЭП) насосных агрегатов связан с использованием энергоэффективных АД. Поэтому решение вопросов с разработкой новых подходов к проектированию энергоэффективных АД, предназначенных для регулируемого электропривода (РЭП), является актуальным, имеет научную новизну и практическую значимость [1].

Для оценки энергосбережения приведем пример расчета экономии электроэнергии для регулируемого электропривода насосной станции, в состав которого входит: насос К80-50-315, асинхронный двигатель АИР112М4 и преобразователь частоты. Современные преобразователи частоты легко интегрируются в существующие системы управления и, поэтому практически все могут применяться для частотного регулирования АД насосных агрегатов.

Исходные данные.  $N_n=4,19$  кВт — мощность насоса,  $P_{2n}=5,5$  кВт — мощность двигателя,  $H_n=32$  м — напор насоса,  $Q_n=25$  м<sup>3</sup>/ч — расход насоса,  $\eta_{насн}=0,52$  — КПД насоса,  $\eta_{двн}=0,855$  — КПД двигателя,  $\eta_{нч}=0,98=const$  — КПД преобразователя частоты.

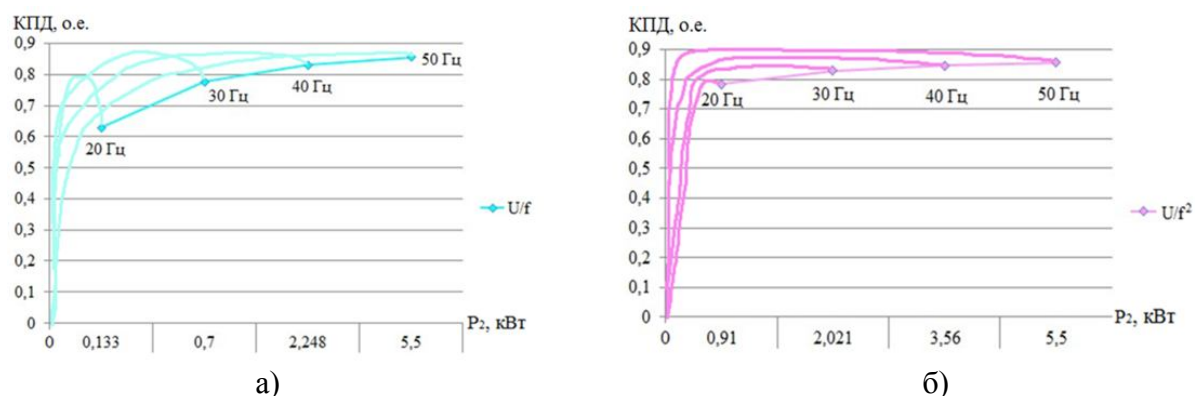
Для насосных агрегатов возможно применение двух законов управления I —  $U/f=const$  и II —  $U/f^2=const$  [3, 4]. Оценка энергетических характеристик по этим законам, рассмотрена при проектировании регулируемого АД на базе общепромышленного АИР112М4 при частотах 50; 40; 30; 20 Гц без изменения

геометрии поперечного сечения. Результаты электромагнитного расчета АД для обоих законов управления представлены в табличном и графическом вариантах.

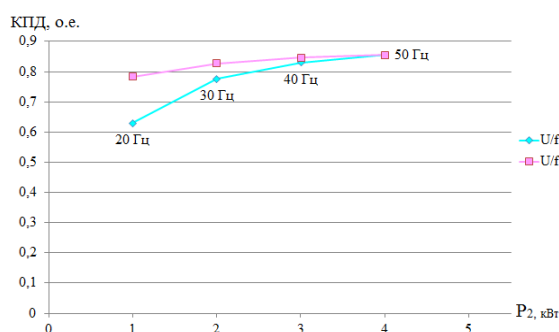
Анализ таблицы 1 показывает, что с уменьшением частоты тока и частоты вращения АД существенно уменьшаются потери в стали и механические потери, значительно уменьшаются потери в меди и коэффициента мощности. Величина номинального скольжения возрастает. Анализ рисунков 1,2 показывает, что при законе регулирования  $Uf^2=const$  величина КПД выше, чем при законе  $Uf=const$ .

**Таблица 1.** Результаты электромагнитного расчета АД

Характеристики АД	Закон регулирования							
	I		II		I		II	
$f$ , Гц	50		40		30		20	
$U$ , В	220	220	176	140,8	132	79,2	88	35,2
$n$ , об/мин	1500	1500	1200	1200	900	900	600	600
$\eta$ , о.е.	0.855	0.855	0.846	0.83	0.828	0.776	0.784	0.629
$\cos \varphi$ , о.е.	0.85	0.85	0.82	0.808	0.767	0.724	0.67	0.585
$S_{ном}$ , о.е.	0.042	0.042	0.07	0.108	0.123	0.276	0.341	0.392
$P_2$ , кВт	5.5	5.5	3.56	2.248	2.021	0.7	0.91	0.133
$P_{ст.очн}$ , Вт	130.1	130.1	93.1	81.7	60.5	43.3	32.9	17
$P_{эл}$ , кВт	0.532	0.532	0.38	0.254	0.26	0.111	0.173	0.047
$P_{мех}$ , кВт	31	31	20	20	11	11	5	5



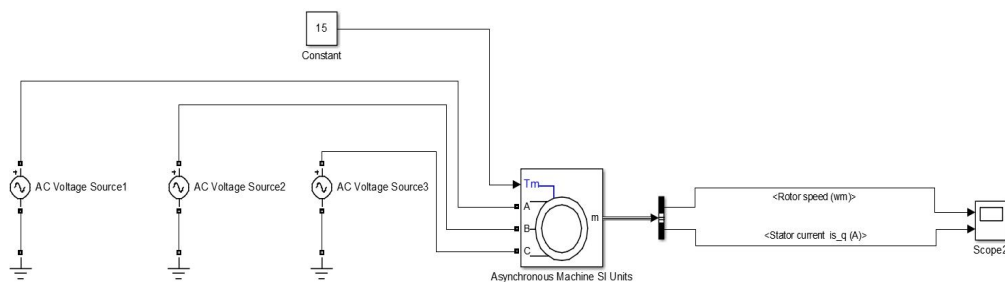
**Рис. 1.** Зависимости  $\eta_{дв}=f(P_2)$  АД при а)  $U/f=const$ , б)  $U/f^2=const$



**Рис. 2.** Зависимости  $\eta_{дв}=f(P_2)$  АД при законах  $U/f=const$  и  $U/f^2=const$

В рамках данной статьи предложена математическая модель асинхронного двигателя АИР112М4, приводящего в действие насосный агрегат. Смоделирован двигатель при помощи программы MatLAB R2014b, которая включает в себя пакет Simulink, с изменениями частоты тока, напряжения сети и числа оборотов для расчетов законов управления.

Данная модель (рисунок 3) состоит из источников напряжения переменного тока, сама модель асинхронного двигателя и осциллографа с такими выходными данными как скорость ротора, ток статора.



**Рис. 3.** Математическая модель проектируемого асинхронного короткозамкнутого двигателя в Simulink MatLAB с изменениями частоты регулирования

Результаты математического расчета АД для обоих законов управления представлены в таблице 2. Анализируя результаты электромагнитного расчета АД для законов регулирования и разработанной математической модели АД в MatLAB Simulink с изменениями частоты и напряжения сети, можно сделать вывод что, разница в выходных параметрах в среднем составила до 5 %.

**Таблица 2.** Сравнительная таблица результатов математического моделирования и электромагнитного расчета для законов регулирования

Характеристики АД	Закон регулирования															
	I		II		I		II		I		II		I		II	
	Электромаг. расчет	Мат. модель	Электромаг. расчет	Мат. модель	Электромаг. расчет	Мат. модель	Электромаг. расчет	Мат. модель	Электромаг. расчет	Мат. модель	Электромаг. расчет	Мат. модель	Электромаг. расчет	Мат. модель		
$f$ , Гц	50		50		40		40		30		30		20		20	
$U$ , В	220	220	220	220	176	140,8	176	140,8	132	79,2	132	79,2	88	35,2	88	35,2
$n$ , об/мин	1500	1500	1500	1500	1200	1200	1200	1200	900	900	900	900	600	600	600	600
$\eta$ , о.е.	0.855	0.855	0.855	0.855	0.846	0.83	0.85	0.84	0.828	0.776	0.83	0.78	0.784	0.629	0.785	0.632
$\cos \varphi$ , о.е.	0.85	0.85	0.85	0.85	0.82	0.808	0.83	0.81	0.767	0.724	0.77	0.73	0.67	0.585	0.7	0.6
$P_2$ , кВт	5.5	5.5	5.5	5.5	3.56	2.248	3.6	2.25	2.021	0.7	2	0.7	0.91	0.143	0.9	0.15
Погрешность	0 %				1.11 %		0.09 %		1.04 %		0 %		1.1 %		4.67 %	

Полученные энергетические характеристики АД при регулировании частоты вращения используем для расчета электрической энергии, потребляемым насосным агрегатом. По значениям  $H_i$ ,  $Q_i$ ,  $\eta_{наси}$ ,  $\eta_{дв}$  находим потребляемые насосным агрегатом: мощность ( $P_{нас.агр}$ ), энергию ( $\Sigma W$ ) [2].

Для нерегулируемого электропривода, мощность, потребляемая насосным агрегатом, без учета КПД преобразователя частоты составляет 4,9 кВт. Энергия, потребляемая за сутки рассчитанная без регулирования частоты вращения насоса составила 118 кВт·ч.

Результаты расчетов для регулируемого электропривода при законе  $U/f^2 = const$  сведены в таблицу 3. При заданной мощности насосного агрегата и характеристиках трубопровода экономия электроэнергии составляет при законе  $U/f^2 = const$  – 63 кВт·ч – за сутки.

**Таблица 3.** Расчет потребляемой электроэнергии при регулировании частоты вращения насосного агрегата в течение суток

$Q_i/Q_n$	$Q_i, \text{м}^3/\text{ч}$	$H_i, \text{м}$	$n_i, \text{об/мин}$	$n_{\text{нас-}i}, \text{о.е.}$	$P_{\text{дв}i}, \text{кВт}$	$\eta_{\text{дв}i}, \text{о.е.}$	$P_{\text{нас.асп}i}, \text{кВт}$	$t_i, \text{ч}$	$W_i, \text{кВт} \cdot \text{ч}$
0,1	7	2,51	792,636	0,134	0,43	0,808	0,451	5	2,255
0,15	8,8	3,96	848,12	0,16	0,61	0,811	0,747	1	0,747
0,2	9,7	4,82	907,5	0,2	0,78	0,815	0,798	1	0,798
0,3	11,5	6,77	989,165	0,26	1,13	0,818	1,018	2,5	2,545
0,5	15,1	11,67	1049,5	0,373	1,45	0,822	1,598	1	1,598
0,6	16,9	14,62	1117,72	0,41	1,72	0,835	1,99	1	1,99
0,65	18,7	17,9	1184,78	0,447	2,18	0,842	2,473	1	2,473
0,7	19,6	19,67	1255,872	0,454	2,88	0,844	2,798	4,5	12,591
0,8	21,4	23,45	1332,48	0,498	3,74	0,848	3,767	3	11,301
0,9	23,2	27,56	1412,1	0,505	4,56	0,852	4,132	1,5	6,198
1,00	25	32	1500	0,52	5,5	0,855	5,003	2,5	12,5075
<b>Итого:</b>									<b>55,0035</b>

Предложена методика расчета энергосбережения насосного агрегата при частотном регулировании, в которой учтены характеристики насоса, трубопровода и энергетические характеристики асинхронного двигателя.

Применение регулируемого электропривода при обоих рассмотренных законах управления обеспечивает экономию электроэнергии свыше 50 %. Однако, наиболее приемлемым для вентиляторной нагрузки является закон  $U/f^2 = const$ . Он обеспечивает меньшую потребляемую мощность при той же величине частоты в диапазоне регулирования вниз от номинального значения и имеет КПД выше, чем при использовании закона с линейной зависимостью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ливчак В. И. Энергосбережение в системе централизованного теплоснабжения на новом этапе развития. – «Энергосбережение», № 2, 2000.
2. Муравлева О. О., Вехтер Е. В., Жарикова Т. В. Оценка влияния энергетических характеристик асинхронного двигателя на энергосбережение насосного агрегата // Известия ТПУ. 2005. №1 С.174-178.
3. Центробежные консольные насосы общего назначения для воды. Каталог. – М., 1989.
4. Загорский А.Е. Регулируемые электрические машины переменного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 288 с.

#### ИНФОРМАТИВНЫЕ СВОЙСТВА АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА

Яцкая Т.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Объект, вызывающий интерес в исследовании мехатронных систем, является автономный инвертор напряжения. Автономный инвертор, который используют для питания электрической машины, несет в себе как электрические, так и информативные свойства. Основные аспекты информативных свойств приведены в статье [1].