

УДК 681.523

Канюк Геннадій Іванович д-р техн. наук, проф., декан енергетичного факультету
Тел. +38-057-733-79-14 E-mail gennadiyy-kanjuk@rambler.ru (orcid.org/ORCID: 0000-0003-1399-9039)

Мезеря Андрій Юрійович кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики
Тел.: (057)733-79-66 E-mail: mezzer@mail.ru ORCID: (orcid.org/ORCID: 0000-0003-2946-9593)

Лаптінов Іван Павлович асистент кафедри «Теплоенергетики та енергозбереження»
Тел. (057) 733-78-03, (050) 403-93-67 E-mail: laptinova@bk.ru

Князева Вікторія Миколаївна інженер кафедри «Теплоенергетики та енергозбереження»
Тел. (057) 733-78-03, (050) 403-93-67, (066) 95-48-307 E-mail: vknjazeva@bk.ru

Українська інженерно-педагогічна академія м. Харків, Україна. Вул. Університетська, 16, м. Харків, Україна, 61003.

Бабенко Ігор Анатолійович директор Зміївської теплової електричної станції Публічного акціонерного товариства «центренерго», 63460, Харківська обл., Зміївський р-н, смт. Комсомольське, Україна, Балаклійське шосе, 2. Тел. 0504021367 E-mail: director@zmtes.kh.energy.gov.ua ORCID: (<http://orcid.org/0000-0001-6640-070X>)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО КЕРУВАННЯ ЦИРКУЛЯЦІЙНИМИ НАСОСАМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

У статті проведено аналіз і обробка даних експериментального дослідження циркуляційного насоса теплової електростанції. Показано можливий економічний ефект при використанні алгоритмів енергозберігаючого керування циркуляційним насосом і визначено закон такого керування.

Ключові слова: циркуляційний насос, енергозбереження, автоматизована система керування.

Канюк Геннадий Иванович д-р техн. наук, проф., декан энергетического факультета
Тел. + 38-057-733-79-14 E-mail gennadiyy-kanjuk@rambler.ru (orcid.org/ORCID: 0000-0003-1399-9039)

Мезеря Андрей Юрьевич кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики
Тел. : (057) 733-79-66 E-mail: mezzer@mail.ru ORCID (orcid.org/ORCID: 0000-0003-2946-9593)

Лаптин Иван Павлович асистент кафедри «Теплоенергетики и энергосбережения»
Тел. (057) 733-78-03, (050) 403-93-67 E-mail: laptinova@bk.ru

Князева Виктория Николаевна инженер кафедры «Теплоенергетики и энергосбережения»
Тел. (057) 733-78-03, (050) 403-93-67, (066) 95-48-307 E-mail: vknjazeva@bk.ru

Украинская инженерно-педагогическая академия г. Харьков, Украина. Ул. Университетская 16, г. Харьков, Украина, 61003.

Бабенко Игорь Анатольевич, директор Змиевской тепловой электрической станции публичного акционерного общества «Центрэнерго», 63460, Харьковская обл., Змиевской р-н, пгт. Комсомольское, Украина, Балаклейское шоссе, 2. Тел. 0504021367 E-mail: director@zmtes.kh.energy.gov.ua ORCID (<http://orcid.org/0000-0001-6640-070X>)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЩОГО УПРАВЛІННЯ ЦИРКУЛЯЦІЙНИМИ НАСОСАМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

В статье проведен анализ и обработка данных экспериментального исследования циркуляционного насоса тепловой электростанции. Показан возможный экономический эффект при использовании алгоритмов энергосберегающего управления циркуляционным насосом и определен закон такого управления.

Ключевые слова: циркуляционный насос, энергосбережение, автоматизированная система управления.

Kaniuk Gennady Ivanovich, Ph. D., Professor, Dean of the Faculty of Energy
Tel.: (057) 733-79-14, E-mail gennadiyy-kanjuk@rambler.ru (orcid.org/ORCID: 0000-0003-1399-9039)

Mezerya Andrey Yurevich, Ph.D., Associate Professor, Department of electricity
E-mail: mezzer@mail.ru ORCID (orcid.org/ORCID: 0000-0003-2946-9593)

Laptnov Ivan Pavlovich, assistant, Department of power engineering and energy saving
Contact tel.: +38(050) 403-93-67. E-mail: laptinova@bk.ru

Knyazeva Viktoriya Nikolaevna, engineer, Department of power engineering and energy saving
Tel.: +38(050) 403-93-67, (066) 95-48-307. E-mail: vknjazeva@bk.ru

Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy, Kharkov, Ukraine. Str. University, 16, Kharkov, Ukraine, 61003

Babenko Igor Anatolevich, Director Zmiyiv thermal power stations of JSC "Centrenergo", Kharkov region. Zmiyivskiy district, town. Komsomolsk, Ukraine, Balakliysky highway, 2, 63460. Tel.:0504021367 E-mail: director@zmtes.kh.energy.gov.ua ORCID: (<http://orcid.org/0000-0001-6640-070X>)

EXPERIMENTAL STUDY TO EFFICIENCY AUTOMATED ENERGYSAVE MANAGEMENT CIRCULATION PUMP OF POWER STATION

In article is organized analysis and data processing the experimental study circulation pump to heat power station. Possible economic effect is Shown when use algorithm energysave management circulation pump and is determined law of such management.

Keywords: circulation pump, energysave, automated managerial system.

Введение

Основная научная проблема создания энергосберегающих систем управления нагнетательными установками состоит в построении точных математических моделей энергетических процессов и объектов, в определении и минимизации функций энергетических потерь, в синтезе алгоритмов управления, которые реализуют в реальном времени режимы работы нагнетателей с минимальными потерями энергии.

Уменьшение внепроектных затрат энергии на собственные нужды на 5 % эквивалентно экономии 40 млн гривен в год с каждой 1000 МВт. В масштабах Украины (при установленной мощности ТЭС и ТЭЦ порядка 10000 МВт) это составляет порядка 400 млн гривен в год.

В работах [1–4] изложены основные теоретические принципы автоматизированного энергосберегающего управления нагнетательными установками электростанций, показаны алгоритмы, функциональные и структурные схемы такого управления. Согласно теоретическим исследованиям, использование предложенных методик позволит получить значительный экономический эффект. Целью настоящего исследования является экспериментальное определение экономической эффективности такой АСУ при управлении циркуляционными насосами, являющимися ответственными и мощными потребителями собственных нужд энергоблоков. Экспериментальные исследования проводились на базе Змиевской ТЭС.

Изложение основного материала

Циркуляционным насосом на Змиевской ТЭС является центробежный насос типа ОП-2-145, номинальной мощностью 1700 кВт. Основные паспортные данные насоса приведены в табл. 1.

Таблица 1

Паспортные данные циркуляционного насоса

Тип	Номинальная мощность двигателя $N_{ДВ}$, кВт	Расход Q , м ³ /ч (м ³ /с)	Напор H , м	Частота вращения n , об/мин	Тип электродвигателя
ОП-2-145	1700	30000 (8,333)	15	375	ВДД-213/54-16

На станции установлено 11 циркуляционных насосов, работающих в двух группах по 5 и 6 насосов в каждой. Регулирование осуществляется путем переключения количества работающих насосов.

Экспериментальные характеристики насоса ОП-2-145 приведены на рис. 1. Температура $T=20^{\circ}\text{C}$, давление $P=755$ мм.рт.ст.

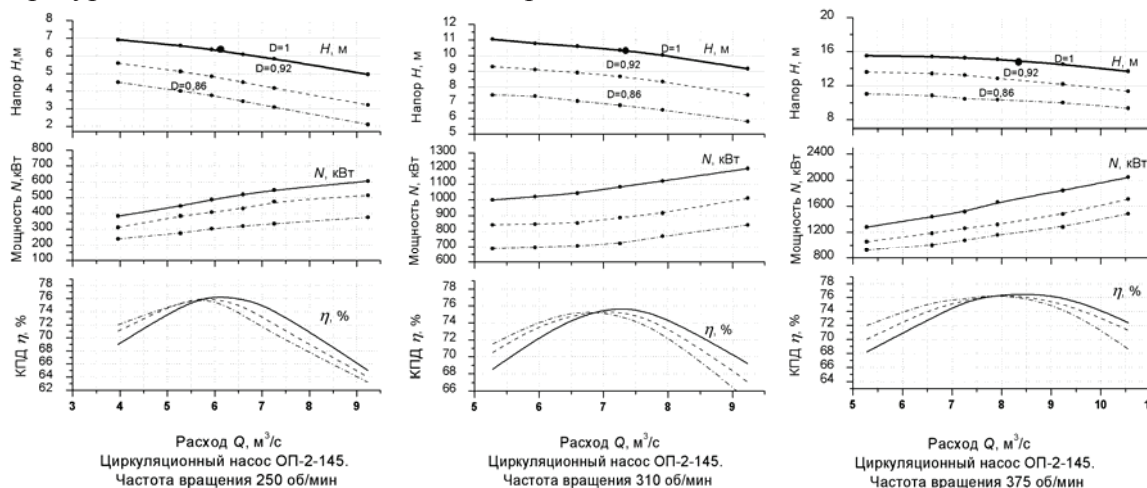


Рис. 1. Характеристика циркуляционного насоса ОП-2-145

Значения параметров насоса при фиксированной подаче и различных частотах вращения приведены в таблицах 2-4:

Таблица 2

Характеристики насоса ОП-2-145 при $Q_1=5,28 \text{ м}^3/\text{с}$

Параметр	Расход $Q_1=19000 \text{ м}^3/\text{ч}$ или $5,28 \text{ м}^3/\text{с}$								
	Частота вращения			Частота вращения			Частота вращения		
	$n_1=250 \text{ об/мин}$			$n_2=310 \text{ об/мин}$			$n_3=375 \text{ об/мин}$		
Относительный диаметр трубопровода (задвижки) D , мм	0,86	0,92	1	0,86	0,92	1	0,86	0,92	1
Напор H , м	4	5,12	6,58	7,5	9,3	11,05	11	13,58	15,5
Потребляемая мощность $Nэ$, кВт	276	384	448	690	840	1000	920	1056	1280
КПД η , %	75,5	75,7	74,9	71,5	70,5	68,5	72	70	68,2
Потери мощности $N=Nэ(1-\eta)$, кВт	67,6	93,2	112,5	196,7	247,8	315	257,6	316,8	407

Таблица 3

Характеристики насоса ОП-2-145 при $Q_2=7,26 \text{ м}^3/\text{с}$

Параметр	Расход $Q_2=26125 \text{ м}^3/\text{ч}$ или $7,26 \text{ м}^3/\text{с}$								
	Частота вращения			Частота вращения			Частота вращения		
	$n_1=250 \text{ об/мин}$			$n_2=310 \text{ об/мин}$			$n_3=375 \text{ об/мин}$		
Относительный диаметр трубопровода (задвижки) D , мм	0,86	0,92	1	0,86	0,92	1	0,86	0,92	1
Напор H , м	3,08	4,17	5,8	6,83	8,67	10,35	10,44	13,22	15,25
Потребляемая мощность $Nэ$, кВт	336	476	548	722	886	1083	1075	1260	1515
КПД η , %	70,5	72	74,5	75	75,5	76	75,7	75,5	75,4
Потери мощности $\Delta N=Nэ(1-\eta)$, кВт	99,1	133,3	139,7	180,5	217,1	259,9	261,2	312,5	372,7

Таблица 4

Характеристики насоса ОП-2-145 при $Q_3=9,24 \text{ м}^3/\text{с}$

Параметр	Расход $Q_3=33250 \text{ м}^3/\text{ч}$ или $9,24 \text{ м}^3/\text{с}$								
	Частота вращения			Частота вращения			Частота вращения		
	$n_1=250 \text{ об/мин}$			$n_2=310 \text{ об/мин}$			$n_3=375 \text{ об/мин}$		
Относительный диаметр трубопровода (задвижки) D , мм	0,86	0,92	1	0,86	0,92	1	0,86	0,92	1
Напор H , м	2,1	3,21	4,95	5,81	7,5	9,17	10	12,1 7	14,5
Потребляемая мощность $Nэ$, кВт	376	515	605	840	1011	1200	1280	1480	1840
КПД η , %	63,2	64	65	65	67,1	69,2	75	75,5	76,6
Потери мощности $\Delta N=Nэ(1-\eta)$, кВт	138	185, 4	211,7	294	332,6	369,6	320	362, 6	430,5

Возможные резервы повышения КПД при обеспечении оптимального режима работы циркуляционного насоса:

$$\Delta\eta = \eta_{\max} - \eta_{\min}$$

	$n_1 = 250$ об/мин	$n_2 = 310$ об/мин	$n_3 = 375$ об/мин
$\Delta\eta, \%$	$75,7-74,9 = 0,8$	$76-75 = 1$	$76,5-75 = 1,6$

Возможные резервы снижения затрат мощности на привод насоса: $\Delta N = N_{\text{ср}} \cdot \Delta\eta$,
 где $N_{\text{ср}}$ – среднее значение потребляемой мощности для данной частоты вращения в рабочем диапазоне (в диапазоне максимальных КПД)

	$n_1 = 250$ об/мин	$n_2 = 310$ об/мин	$n_3 = 375$ об/мин
$\Delta N, \text{кВт}$	$384 \cdot 0,8/100 = 3,1$	$886 \cdot 1/100 = 8,86$	$1480 \cdot 1,6/100 = 23,7$

Потенциальная годовая экономия в денежном эквиваленте: $\Xi = \Delta N \cdot T_{\text{уст}} \cdot C$,
 где: $T_{\text{уст}} = 4500$ ч – число часов использования установленной мощности;
 $C = 0,9$ грн/кВт·ч – себестоимость выработки 1 кВт·ч электроэнергии (2012 г.).

	$n_1 = 250$ об/мин	$n_2 = 310$ об/мин	$n_3 = 375$ об/мин
$\Xi, \text{грн/год}$	12500	35850	95900

Из экспериментальных характеристик получаем:

1. Зависимость напора H от частоты вращения n и расхода Q при открытой задвижке:

	$D = 1$			$Q, \text{м}^3/\text{с}$
	$n, \text{об/мин}$			
	250	310	375	
$H, \text{м}$	6,58	11,05	15,5	5,28
	5,83	10,35	15,25	7,26
	4,95	9,17	14,5	9,24

Аппроксимируя табличные данные, получим:

$$H(Q, n) = 5,6378 \cdot 10^{-6} \cdot Q^2 \cdot n^2 - 0,0039 \cdot Q^2 \cdot n + 0,60634 \cdot Q^2 - 4,6093 \cdot 10^{-5} \cdot Q \cdot n^2 + 0,03556 \cdot Q \cdot n - 6,18068 \cdot Q + 3,78910 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 + 0,0225399 \cdot n - 0,05876 \text{ м.}$$

2. Зависимость потребляемой мощности N_{Ξ} от частоты вращения n и расхода Q при открытой задвижке:

	$D = 1$			$Q, \text{м}^3/\text{с}$
	$n, \text{об/мин}$			
	250	310	375	
$N_{\Xi}, \text{кВт}$	448	1000	1280	5,28
	548	1083	1515	7,26
	605	1200	1840	9,24

Аппроксимируя табличные данные, получим:

$$N_{\Xi}(Q, n) = 0,40467 \cdot Q^2 \cdot n - 4,30359 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2 \cdot n^2 - 79,755 \cdot Q^2 + 0,015989 \cdot Q \cdot n^2 - 11,14986 \cdot Q \cdot n + 1907,378 \cdot n - 0,11156 \cdot n^2 + 78,707 \cdot n - 12732,735 \text{ кВт.}$$

3. Зависимость КПД η от частоты вращения n и расхода Q при открытой задвижке:

	D = 1			Q, м³/с
	n, об/мин			
	250	310	375	
η, %	74,9	68,5	68,2	5,28
	74,5	76	75,4	7,26
	65	69,2	76,6	9,24

Аппроксимируя табличные данные, получим:

$$\eta(Q, n) = 0,0002187 \cdot Q^2 \cdot n^2 - 0,13353 \cdot Q^2 \cdot n + 18,55 \cdot Q^2 - 0,003293 \cdot Q \cdot n^2 + 2,04934 \cdot Q \cdot n - 292,1536 \cdot Q + 0,0121 \cdot n^2 - 7,6617 \cdot n + 1190,185 \%$$

4. Зависимость потерь мощности ΔN от частоты вращения n и расхода Q при открытой задвижке:

	D = 1			Q, м³/с
	n, об/мин			
	250	310	375	
ΔN, кВт	112,4	315	407,0	5,28
	139,7	259,9	372,7	7,26
	211,7	369,6	430,6	9,24

Аппроксимируя табличные данные, получим:

$$\Delta N(Q, n) = -0,001298 \cdot Q^2 \cdot n^2 + 0,98232 \cdot Q^2 \cdot n - 158,737 \cdot Q^2 + 0,0203 \cdot Q \cdot n^2 - 15,277 \cdot Q \cdot n + 2491,2 \cdot Q - 0,08681 \cdot n^2 + 65,4394 \cdot n - 10676 \text{ кВт}$$

Для определения закона управления насосом, аппроксимируем зависимость КПД η от расхода для различных частот:

N = 250 об/мин		N = 310 об/мин		N = 375 об/мин	
Q, м³/с	η, %	Q, м³/с	η, %	Q, м³/с	η, %
3,9583	69	5,2778	68,5	5,2778	68,2
5,2778	74,9	5,9375	72	6,5972	73,1
5,9375	76,5	6,5972	74,81	7,2569	75,4
6,5972	76	7,2569	76	7,9167	76,5
7,2569	74,5	7,9167	75	9,2361	76,6
9,2361	65	9,2361	69,2	10,5556	72,4

Для частоты $n=250$ об/мин получаем: $\eta = 24,825 + 16,337 \cdot Q - 1,299 \cdot Q^2$.

Приравняв первую производную $\eta' = 16,337 - 2,598 \cdot Q$ к нулю, получим значение расхода $Q = 6,288$ м³/с, при котором КПД будет максимальным.

Для частоты $n=310$ об/мин получаем: $\eta = -19,437 + 26 \cdot Q - 1,776 \cdot Q^2$.

Приравняв первую производную $\eta' = 26 - 3,552 \cdot Q$ к нулю, получим значение расхода $Q = 7,3198$ м³/с, при котором КПД будет максимальным.

Для частоты $n=375$ об/мин получаем: $\eta = 14,142 + 14,829 \cdot Q - 0,88 \cdot Q^2$.

Приравняв первую производную $\eta' = 14,829 - 1,76 \cdot Q$ к нулю, получим значение расхода $Q = 8,435$ м³/с, при котором КПД будет максимальным.

Графически эти зависимости показаны на рис. 2.

Пересчитав число оборотов на расход, при котором будет максимальный КПД, получим зависимость экономической эффективности плавного частотного управления (в отличие от ступенчатого) от расхода (рис. 3.) и зависимость частоты вращения n от расхода Q , при которой будет обеспечен максимальный КПД насосной установки (рис. 4):

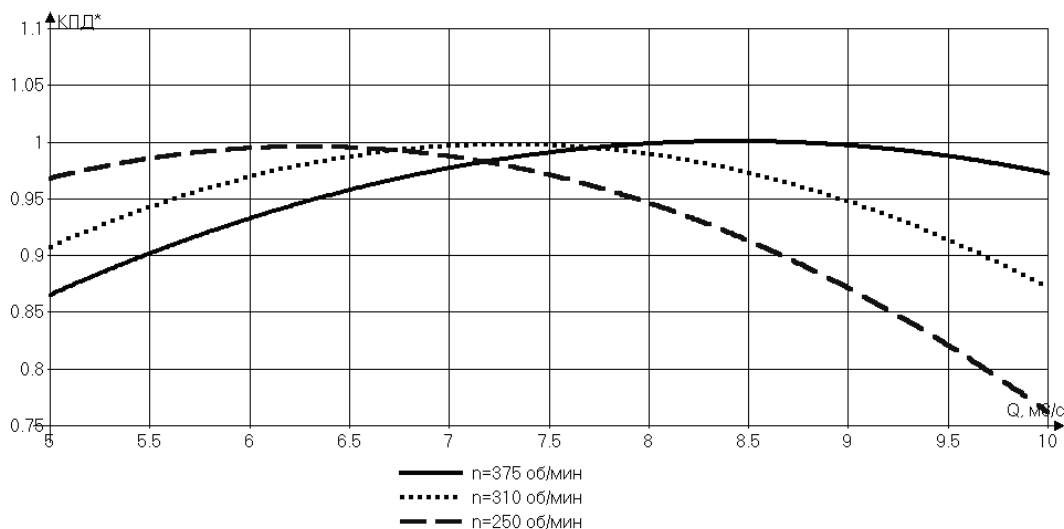


Рис. 2. Зависимость относительного КПД*= $\eta/\eta_{\text{макс}}$ от расхода Q для различных частот вращения циркуляционного насоса ОП-2-145

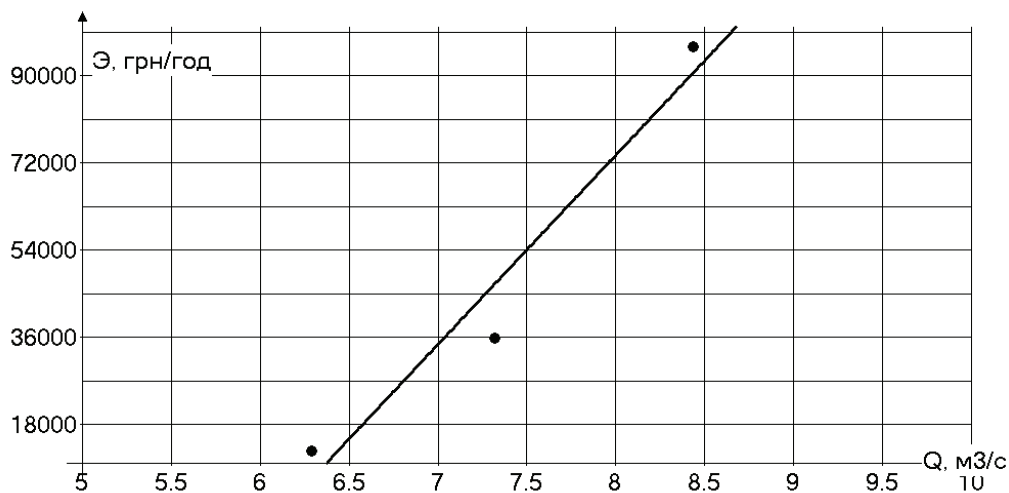


Рис. 3. Ожидаемая экономическая эффективность

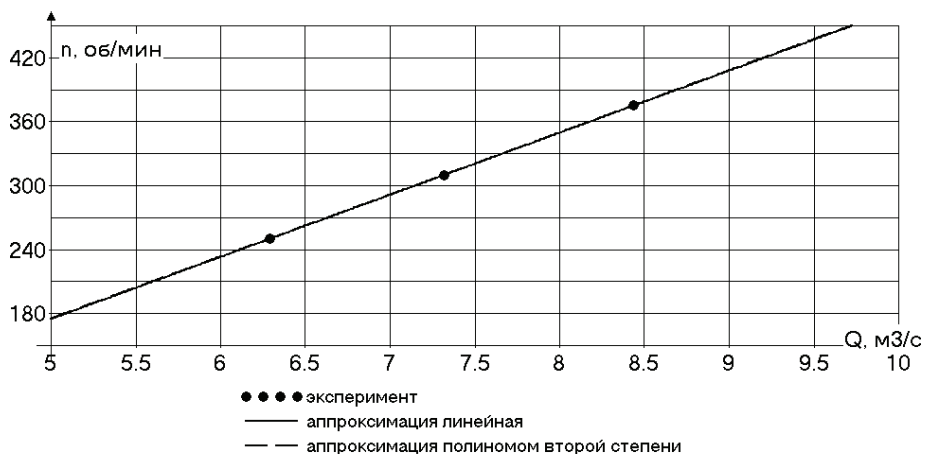


Рис. 4. Зависимость частоты вращения n от расхода Q , при которой будет обеспечен максимальный КПД насосной установки

Закон управления:

– при аппроксимации полиномом второго порядка:

$$n(Q) = A Q^2 + B Q + C$$

$$n(Q) = 0,0627 \cdot Q^2 + 57,297 \cdot Q - 112,764 \text{ об/мин}$$

– при линейной аппроксимации:

$$n(Q) = 58,22 \cdot Q - 116,12 \text{ об/мин}$$

На станции управление циркуляционным насосом осуществляется на одной частоте путем изменения местного сопротивления задвижки.

Сравним потери при дросселировании и 3-х ступенчатом частотном управлении (табл. 5).

Таблица 5

Сравнение эффективности способов управления

	Расход Q , м ³ /с				
	5,3	6,6	7,26	7,9	9,24
Потери при дросселировании, кВт	257,6	245	309	391	460
Потери при 3-х ступенчатом частотном управлении, кВт	112,4	125	260	–	–
Разница потерь, кВт	145,2	120	51	–	–
Годовой экономический эффект, грн	558 060	486 000	206 550	–	–

Выводы

1. Экспериментальные исследования показали работоспособность алгоритмов автоматизированного энергосберегающего управления нагнетателями, изложенных в [1–4] и экономическую целесообразность их использования.

2. Годовой экономический эффект для одного циркуляционного насоса составляет 200–500 тыс. грн /год, что в масштабах станции составит 1–2 млн грн/год.

Список использованной литературы:

1. Канюк Г. И., Мезеря А. Ю., Фокина А. Р., Лаптинова Е. В., Лаптинов И. П. Энергосберегающее управление и повышение технико-экономической эффективности насосных установок тепловых и атомных электростанций/ Східно-Європейський журнал передових технологій. –Харків: –2012. –№. 3/8 (57). – С. 58–62.
2. Канюк Г. И., Мезеря А. Ю., Михайский Д. В., Лаптинов И. П., Фокина А. Р. Резервы энергосберегающего управления технологическими процессами на действующих ТЭС и АЭС. –Харьков: Изд-во «Точка», 2012. – 184 с. Русс. яз.
3. Канюк Г. И., Артюх С. Ф., Мезеря А. Ю., Лаптинова Е. В., Мельников В. Е. Научные принципы энергосбережения в тепловой и атомной энергетике. –Харьков: Изд-во «Точка», 2013. – 140 с. Русс. яз.
4. Канюк Г. И., Мезеря А. Ю., Лаптинов И. П. Модель энергосберегающего управления нагнетательными установками тепловых электростанций. Вісник НТУ «ХП»: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. № 12 (1055), 2014. – С. 90–97.

References:

- 1.Kanyuk G.I., Mezerya A.Y., Fokina A.R., Laptinova E.V., Laptinov I.P. Energysave management and increasing to technical-economic efficiency of the pumping installation heat and atomic power station/ East-European journal leading tehnology [Energoberegaiushshee upravlenie i povyshenie tekhniko-ekonomicheskoy effektivnosti nasosnykh ustanovok teplovykh i atomnykh stantsiy] //Harkov: – 2012. – 3/8 (57). – P. 58–62.
- 2.Kanyuk G.I., Mezerya A.Y., Mihayskiy D.V., Laptinov I.P., Fokina A.R. The Reserves energysave management technological process on acting TES and AES [Rezervy energoberegaiushshego upravlenia tekhnologicheskimi protsessami na deystvuyushshikh TES i AES] //Harkov: Izd-in "Point", 2012. –184 c. Russ.
- 3.Kanyuk G.I., Artyuh S.F., Mezerya A.Y., Laptinova E.V., Miller V.E. The Scientific principles energysave in heat and atomic energetike [Nauchnye pritsipy energoberezhnia v teplovy i atomnoy energetike] // Harkov: Izd-in "Point", 2013. –140 p. Russ. .
- 4.Kanyuk G.I., Mezerya A.Y., Laptinov I.P. The Model of energysave management pump installation heat power station [Model energosberigaiushshego upravleniia nagnetatelnyimi ustanovkami teplovykh elektrostantsiy]// Vesnik NTU "HPI": Energetic that teplotekhnich process and management. – 12(1055), 2014. – P. 90–97.

Поступила в редакцию 23.06 2015 г.