

УДК 681.523

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ
ЦИРКУЛЯЦИОННЫМИ НАСОСАМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

©Канюк Г. И., Мезеря А. Ю., Хорошун Д. М., Князева В. Н.

*Українська інженерно-педагогічна академія***Інформація про авторів:**

Канюк Геннадій Іванович: ORCID: 0000-0003-1399-9039; melnykov.viacheslav@gmail.com; доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теплоенергетики та енергозберігаючих технологій, Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Мезеря Андрій Юрійович: ORCID: 0000-0003-2946-9593; vitok911@ukr.net; кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетики та енергозберігаючих технологій, Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Хорошун Дмитро Михайлович: ORCID: 0000-0001-6427-6805; vitok911@ukr.net; аспірант кафедри теплоенергетики та енергозберігаючих технологій, Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Князева Вікторія Миколаївна: ORCID: 0000-0002-3106-4897; vitok911@ukr.net; інженер кафедри теплоенергетики та енергозберігаючих технологій, Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

В статье рассмотрены актуальные вопросы снижения потребления электроэнергии на собственные нужды тепловых электростанций путем энергосберегающего управления. С этой целью проведен анализ экспериментальных энергетических характеристик циркуляционного насоса ОП-2-145 тепловой электростанции Змиевская ТЭС, а именно зависимости напора, потребляемой мощности, коэффициента полезного действия и потерь энергии в циркуляционном насосе от частоты его вращения, расхода и степени закрытия регулирующей задвижки. На основе экспериментальных данных выявлены возможные резервы энергосбережения при автоматизированном энергосберегающем управлении циркуляционными насосами. Показан возможный экономический эффект при использовании различных алгоритмов управления циркуляционными насосами, включая дроссельное регулирование, частотное ступенчатое регулирование и частотное плавное регулирование. Определен закон управления, при котором потери в циркуляционном насосе будут минимальны.

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

Канюк Г. И., Мезеря А. Ю., Хорошун Д. М., Князева В. М. «Ефективність систем енергозберігаючого керування циркуляційними насосами електростанцій».

У статті розглянуто актуальні питання зниження споживання електроенергії на власні потреби теплових електростанцій шляхом енергозберігаючого керування. Із цією метою проведено аналіз експериментальних енергетичних характеристик циркуляційного насосу ОП-2-145 теплової електростанції Зміївська ТЕС, а саме залежності напору, споживаної потужності, коефіцієнта корисної дії та втрат енергії в циркуляційному насосі від частоти його обертання, витрати та ступеня закриття регулюючої засувки. На основі експериментальних

даних виявлені можливі резерви енергозбереження при автоматизованому енергозберігаючому керуванні циркуляційними насосами. Показано можливий економічний ефект при використанні різних алгоритмів керування циркуляційними насосами, включаючи дросельне регулювання, частотне східчасте регулювання та частотне плавне регулювання. Визначено закон керування, при якому втрати в циркуляційному насосі будуть мінімальні.

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

Kanyuk G., Mezerya A., Horoshun D., Knyazeva V. “Efficiency of the systems of energy-saved control circulation pumps power station”.

In article are considered actual questions of the reduction of the consumption to electric powers on own necessities heat power station by way of energy-saved control. Is it for this purpose organized analysis of the experimental energy features circulation pump OP-2-145 heat power stations Zmievskaaya TES, as follows dependencies of the pressure, consumed to powers, coefficient of efficiency and losses to energy in circulation pump from frequency of its rotation, consumption and degree of the closing adjusting bolts. On base experimental given are revealed possible reserves energy-save under automated of energy-saved control circulation pumps. Possible economic effect is shown when use different algorithm control circulation pumps, including choke regulation, frequency step-like regulation and frequency fluent regulation. The certain law of control, under which loss in circulation pump will be minimum.

Key words: circulation pump; energy-saved; automated managerial system.

1. Введение

Высокий уровень износа основных фондов тепловой энергетики, использование углей непроектных и низкосортных марок, проблемы с его закупкой и поставкой, отсутствие надежного источника инвестиций в модернизацию отраслевой инфраструктуры неизбежно ведут к дальнейшему росту себестоимости вырабатываемой электроэнергии.

2. Актуальность исследований

Как сообщает УНИАН [1], в конце февраля 2017 года себестоимость электроэнергии, которая производится на теплоэлектростанциях, достигла рекордного значения – 1,83 гривны за 1 кВт·ч.

Вместе с тем, резервы энергосбережения имеются на самих электростанциях. Уменьшение внепроектных затрат энергии на собственные нужды на 5% эквивалентно экономии 80 млн. гривен в год с каждой 1000 МВт. В масштабах Украины (при установленной мощности ТЭС и ТЭЦ порядка 29000 МВт) это может составить более 2 млрд. гривен в год. Таким образом, поиск решений, позволяющих снизить потери энергии на электростанциях без существенной модернизации оборудования, представляет собой своевременную задачу и определяет актуальность исследований.

3. Анализ публикаций выявил большое количество работ, направленных на повышение экономичности работы основного и вспомогательного оборудования электростанций, однако

принцип управления режимами работы оборудования непосредственно по критерию минимума энергетических потерь в алгоритмах существующих систем управления не реализуется. В предыдущих работах авторов [2-5] изложены основные теоретические принципы автоматизированного энергосберегающего управления нагнетательными установками электростанций, показаны алгоритмы, функциональные и структурные схемы такого управления. Целью данной работы является определение экономической эффективности использования энергосберегающего управления циркуляционными насосами в реалиях современной экономики Украины. Экспериментальные исследования проводились на базе Змиевской ТЭС.

4. Изложение основного материала

Циркуляционными насосами, подающими охлаждающую воду в конденсаторы паровых турбин Змиевской ТЭС являются центробежные насосы типа ОП-2-145, номинальной мощностью 1700 кВт. В таблице 1 приведены паспортные данные насоса [6].

Таблица 1 – Паспортные данные циркуляционного насоса ОП-2-145

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 Змиевской ТЭС установлено 11 циркуляционных насосов, работающих в двух группах по 5 и 6 насосов в каждой. Регулирование может осуществляться путем изменения угла лопастей и переключения количества работающих насосов.

Экспериментальные характеристики насоса ОП-2-145 приведены на рис.1. Исходные данные, при которых проводились эксперименты следующие: температура $T=20^{\circ}\text{C}$, давление $P=755$ мм.рт.ст. Снятие характеристик проводились для трёх частот: 250 об/мин (рис. 1 а), 310 об/мин (рис. 1 б) и 375 об/мин (рис. 1 в).

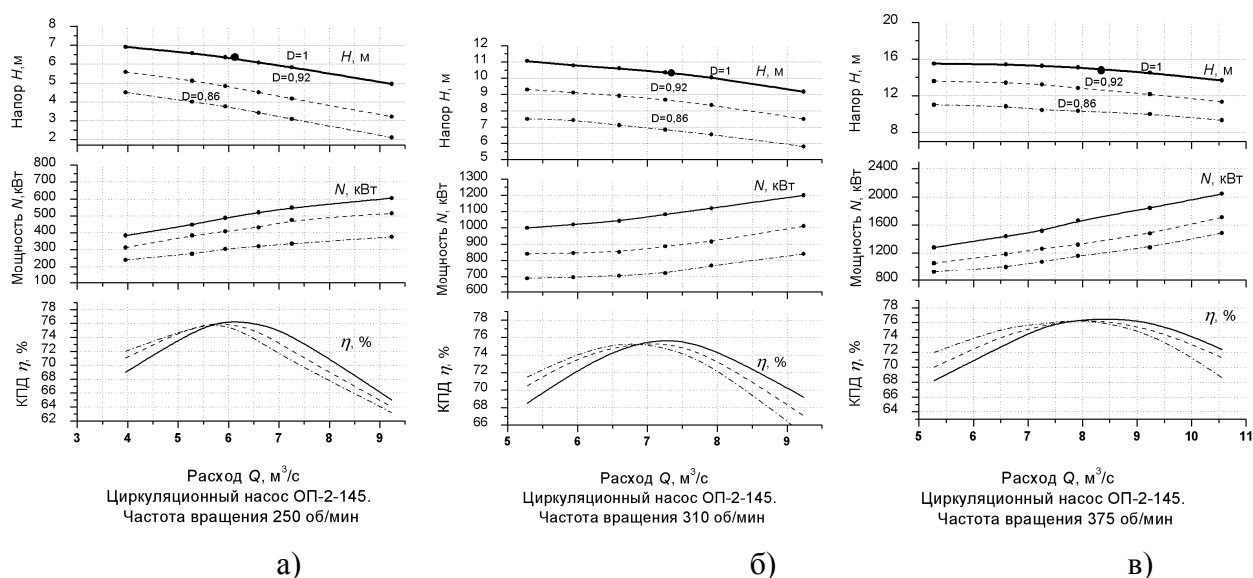


Рис. 1 – Характеристика циркуляционного насоса ОП-2-145

Технологія машинобудування

Экспериментальные значения параметров насоса при фиксированном расходе 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	<u>384</u>	448	690	840	1000	920	1056	1280
КПД η , %	<u>75,5</u>	75,7	<u>74,9</u>	71,5	70,5	68,5	72	70	68,2
Потери мощности $N=Nэ(1-\eta)$, кВт	67,6	93,2	<u>112,4</u>	196,7	247,8	315	<u>257,6</u>	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	<u>886</u>	1083	1075	1260	1515
КПД η , %	70,5	72	74,5	<u>75</u>	75,5	<u>76</u>	75,7	75,5	75,4
Потери мощности $\Delta N=Nэ(1-\eta)$, кВт	99,1	133,3	139,7	180,5	217,1	<u>259,9</u>	261,2	<u>309</u>	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	12,17	14,5
Потребляемая мощность $Nэ$, кВт	376	515	605	840	1011	1200	1280	<u>1480</u>	1840
КПД η , %	63,2	64	65	65	67,1	69,2	<u>75</u>	75,5	<u>76,6</u>
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 определяются:

$$\Delta\eta = \eta_{\max} - \eta_{\min} \quad (1)$$

Результаты расчетов сводим в таблицу 5. Значения η_{\max} , η_{\min} в (1), а далее и $N_{\text{ср}}$ в (2) взяты из таблиц 2-4, где они, для наглядности, выделены подчеркиванием.

Таблиця 5

	$n_1=250$ 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, определяются по выражению (2). Значения заносим в таблицу 6.

$$\Delta N = N_{\text{ср}} \cdot \Delta\eta, \quad (2)$$

где $N_{\text{ср}}$ – среднее значение потребляемой мощности для данной частоты вращения в рабочем диапазоне (в диапазоне максимальных КПД)

Таблиця 6

	$n_1=250$ 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:

$$\mathcal{E} = \Delta N \cdot T_{\text{уст}} \cdot \mathcal{C}, \quad (3)$$

где: $T_{\text{уст}} = 4500$ ч – число часов использования установленной мощности;

\mathcal{C} – себестоимость выработки 1 кВт·ч электроэнергии. Согласно [1], можно принять

$\mathcal{C} = 1,8$ грн/кВт·ч.

Таблиця 7 – Потенциальная годовая экономия

	$n_1=250$ об/мин	$n_2=310$ об/мин	$n_3=375$ об/мин
$\mathcal{E}, \text{грн/год}$	25000	71700	191800

Годовой экономический эффект, показанный в табл. 7, определяет денежный эквивалент разницы в потерях энергии при 3-х ступенчатом частотном и плавном частотном способе регулирования насоса.

По экспериментальным данным (значения в табл. 2-4) получен ряд зависимостей, которые в дальнейшем могут быть использованы для определения потерь энергии и создания модели энергосберегающего управления:

1. Зависимость напора H от частоты вращения n и расхода Q при открытой задвижке (табл. 8):

Таблиця 8

	$D = 1$			$Q, \text{м}^3/\text{с}$
	$n, \text{об/мин}$			
	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:

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

Технологія машинобудування

2. Зависимость потребляемой мощности N_{Σ} от частоты вращения n и расхода Q при открытой задвижке (табл. 9):

Таблица 9

	D = 1			Q, м ³ /с
	n, об/мин			
	250	310	375	
N _Σ , кВт	448	1000	1280	5,28
	548	1083	1515	7,26
	605	1200	1840	9,24

Аппроксимируя табличные данные, получим:

$$N_{\Sigma}(Q,n)=0,40467 \cdot Q^2 \cdot n - 4,30359 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2 \cdot n^2 - 79,755 \cdot Q^2 + 0,015989 \cdot Q \cdot n^2 - 11,14986 \cdot Q \cdot n + 1907,378 \cdot n - 0,11156 \cdot n^2 + 78,707 \cdot n - 12732,735 \text{ кВт} \quad (5)$$

3. Зависимость КПД η от частоты вращения n и расхода Q при открытой задвижке (табл. 10):

Таблица 10

	D = 1			Q, м ³ /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:

$$\eta(Q,n)=0,0002187 \cdot Q^2 \cdot n^2 - 0,13353 \cdot Q^2 \cdot n + 18,55 \cdot Q^2 - 0,003293 \cdot Q \cdot n^2 + 2,04934 \cdot Q \cdot n - 292,1536 \cdot Q + 0,0121 \cdot n^2 - 7,6617 \cdot n + 1190,185 \% \quad (6)$$

4. Зависимость потерь мощности ΔN от частоты вращения n и расхода Q при открытой задвижке (табл. 11):

Таблица 11

	D = 1			Q, м ³ /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:

$$\Delta N(Q,n)=-0,001298 \cdot Q^2 \cdot n^2 + 0,98232 \cdot Q^2 \cdot n - 158,737 \cdot Q^2 + 0,0203 \cdot Q \cdot n^2 - 15,277 \cdot Q \cdot n + 2491,2 \cdot Q - 0,08681 \cdot n^2 + 65,4394 \cdot n - 10676 \text{ кВт} \quad (7)$$

Для определения закона управления насосом, аппроксимируем зависимость КПД η от расхода для различных частот вращения (табл. 12):

Таблица 12

$n=250$ об/мин		$n=310$ об/мин		$n=375$ об/мин	
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$\eta, \%$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$\eta, \%$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$\eta, \%$
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 $Q = 6,288 \text{ м}^3/\text{с}$, 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 $Q = 7,3198 \text{ м}^3/\text{с}$, 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 $Q = 8,435 \text{ м}^3/\text{с}$, 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 от расхода (рис. 3.) и зависимость частоты вращения n от расхода Q , при которой будет обеспечен максимальный КПД насосной установки (рис. 4):

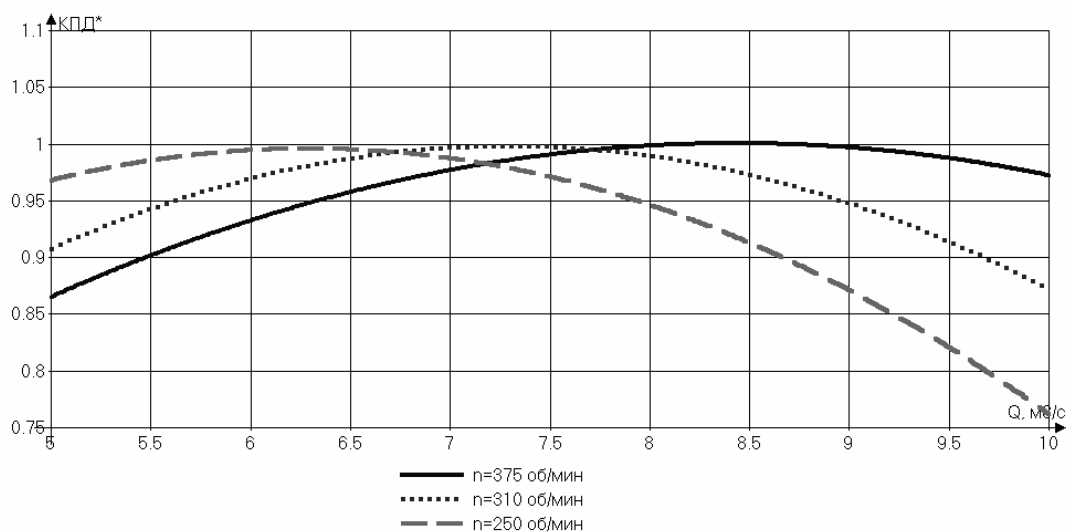


Рис. 2 – Зависимость относительного КПД*= $\eta/\eta_{\text{макс}}$ от расхода Q для различных частот вращения циркуляционного насоса ОП-2-145

Технологія машинобудування

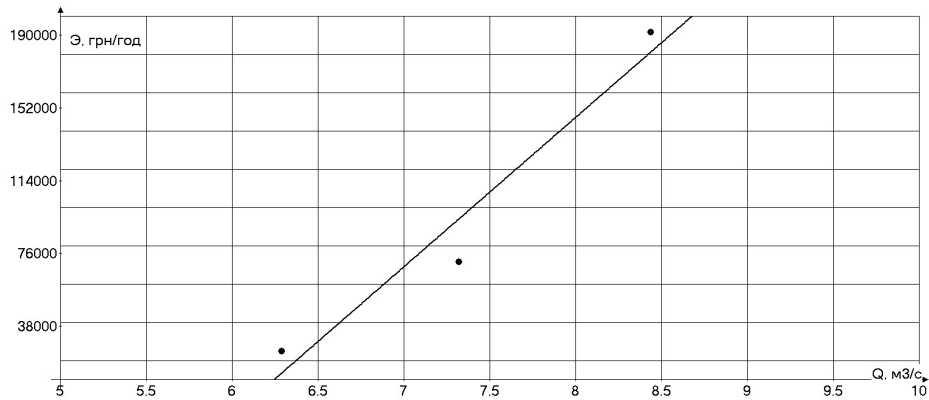


Рис. 3 – Ожидаемая экономическая эффективность при управлении циркуляционным насосом

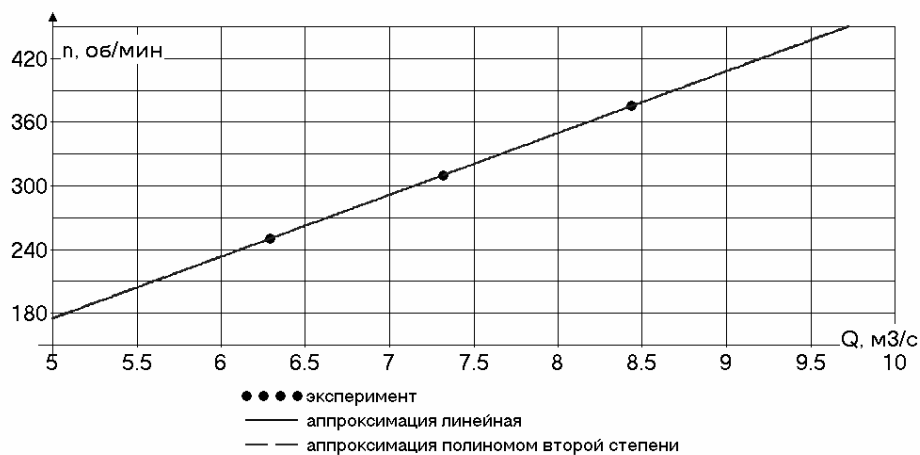


Рис. 4 – Зависимость частоты вращения n от расхода Q , при которой будет обеспечен максимальный КПД насосной установки

Закон управления:

– при аппроксимации полиномом второго порядка:

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

$$n(Q) = 0,0627 \cdot Q^2 + 57,297 \cdot Q - 112,764 \text{ об/мин} \quad (8)$$

– при линейной аппроксимации:

$$n(Q) = 58,22 \cdot Q - 116,12 \text{ об/мин} \quad (9)$$

Сравним потери при дросселировании и 3-х ступенчатом частотном управлении (табл. 13). Значения потерь мощности взяты из таблиц 2-4 (экспериментальные характеристики) **или получены** при помощи экстраполяции для промежуточных значений расходов.

Таблица 13 – Сравнение эффективности способов управления

	Расход Q , м ³ /с				
	5,3	6,6	7,26	7,9	9,24
Потери при дросселировании, кВт	<u>257,6</u>	245	<u>309</u>	391	<u>430</u>
Потери при 3-х ступенчатом частотном управлении, кВт	<u>112,4</u>	125	<u>260</u>	-	-
Разница потерь, кВт	145,2	120	51	-	-
Годовой экономический эффект, грн	1 176 120	972 000	413 100	-	-

Общий экономический эффект от применения плавного регулирования (в сравнении с дросселированием) будет равен сумме значений, взятых из таблиц 7 и 13.

Выводы

1. Экспериментальные исследования показали возможные резервы энергосбережения при управлении циркуляционными насосами ТЭС, а также экономическую целесообразность частотного ступенчатого и частотного плавного регулирования.

2. Поддержание оптимальных режимов работы циркуляционных насосов может обеспечить годовой экономический эффект до 1 млн.грн/год на один насос мощностью 1700 кВт при числе часов использования максимума 4500 ч.

Список использованных источников:

1. Средняя цена электроэнергии ТЭС выросла почти на 13 % [Электронный ресурс] // Уніан. – Режим доступа: <https://economics.unian.net/energetics/2283414-srednyaya-tsena-elektroenergii-tes-za-mesyats-vyrosla-pochti-na-13.html>
2. Энергосберегающее управление и повышение технико-экономической эффективности насосных установок тепловых и атомных электростанций / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, А. Р. Фокина и др. // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2012. – № 3/8 (57). – С. 58-62.
3. Резервы энергосберегающего управления технологическими процессами на действующих ТЭС и АЭС / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, Д. В. Михайский и др. – Харьков : Точка, 2012. – 184 с.
4. Научные принципы энергосбережения в тепловой и атомной энергетике / Г. И. Канюк, С. Ф. Артюх, А. Ю. Мезеря и др. – Харьков : Точка, 2013. – 140 с.
5. Нормативные режимы энергоэффективной эксплуатации турбогенераторных и нагнетательных установок электростанций / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, Е. Н. Близниченко, Д. М. Хорошун. – Харьков : Мадрид, 2017. – 196 с.
6. Графики исходно-нормативных удельных расходов топлива энергоблока ст. № 8 : отчет НАК «Энергетическая компания Украины» / Змиевская ТЭС. – Змиев, 2012.

References

1. Unian 2017, *Srednyaya tsena elektroenergii TES vyrosla pochti na 13%*, viewed 2018, <<https://economics.unian.net/energetics/2283414-srednyaya-tsena-elektroenergii-tes-za-mesyats-vyrosla-pochti-na-13.html>>.
2. Kanyuk G, Mezerya, A & Fokina, A 2012, 'Energosberegayushcheye upravleniye i povysheniye tekhniko-ekonomicheskoy effektivnosti nasosnykh ustanovok teplovykh i atomnykh elektrostantsiy' *Skhidno-Ievropeiskiy zhurnal передовых технологий*, no. 3/8 (57), pp. 58-62.
3. Kanyuk G, Mezerya, A & Mikhauskii, D 2012, *Rezervy energosberegayushchego upravleniya tekhnologicheskimi protsessami na deystvuyushchikh TES i AES*, Tochka, Kharkov.
4. Kanyuk, G, Artyukh, S & Mezerya, A 2013, *Nauchnyye printsipy energosberezheniya v teplovoi i atomnoy energetike*, Tochka, Kharkov.
5. Kanyuk G, Mezerya, A, Bliznichenko, E & Khoroshun, D 2017, *Normativnyye rezhimy energoeffektivnoy ekspluatatsii turbogeneratorsnykh i nagnetatelnykh ustanovok elektrostantsiy*, Madrid, Kharkov.
6. Zmievskaia TES 2012, *Grafiki iskhodno-normativnykh udelnykh raskhodov topliva energobloka st. № 8: otchet NAK "Energeticheskaya kompaniya Ukrainy"* Zmievskaia TES, Zmiyev.

Стаття надійшла до редакції 15 травня 2018 р.