

**СНИЖЕНИЕ ЗАТРАТ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОСУШИТЕЛЬНЫХ НАСОСНЫХ
СТАНЦИЯХ МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ
ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

А.П. Русецкий, доктор технических наук

РУП «Институт мелиорации»

г. Минск, Беларусь

Ключевые слова: насосная станция, польдерная мелиоративная система, частота вращения электродвигателей, преобразователь частоты, затраты электроэнергии, коэффициент полезного действия

Введение

На существующих насосных станциях для приведения в движение насосов преимущественно используются электрические двигатели. В настоящее время электропривод насосов является основным затратным средством потребления электроэнергии при осушении пойменных земель польдерным способом, орошении дождеванием, заполнении наливных прудов, отводе воды с равнинных территорий и замкнутых понижений местности, осушении земель населенных мест и в др. случаях.

Польдерные мелиоративные системы с машинным водоотводом наибольшее распространение получили в центральной части Полесья. Только в Пинском, Лунинецком и Столинском районах в мелиорации в 2011 г. использовалось более 130 стационарных насосных станций, на которых установлено 366 насосов с электродвигателями общей мощностью 22476 кВт. Затраты электроэнергии в указанных районах по отчетам ПМС в 2011 г. составляли 12038 тыс.кВт·ч.

Снижения затрат электроэнергии можно добиваться за счет устройства более совершенных конструктивных решений, составляющих элементов мелиоративных систем. На действующих польдерных системах в ряде случаев улучшению подлежат устройства срыва вакуума на сифонах, конструкции напорных линий, устройства водовыпусков и самотечных водоотводов.

В некоторых случаях необходимы следующие мероприятия: устройство прямого сброса воды в водоприемник минуя накопительные пруды; ремонт изношенных рабочих колес насосов; ликвидация утечек воды через уплотнения затворов; сброс лишней воды из наливных водохранилищ; наиболее поздняя откачка воды в весенний период; поддержание оптимального водного режима почвы. Устранение недостатков с помощью названных мероприятий возможно при реконструкции систем или их эксплуатации, что может привести к экономии от 3,1 до 21,1% среднееголетнего потребления электроэнергии [1], [2].

Снижение затрат электрической энергии на основе регулирования оборотов электродвигателей

Кроме выше приведенных способов существует не используемый на мелиоративных насосных станциях способ снижения затрат электроэнергии путем регулирования частоты вращения электродвигателей. Насос и электродвигатель соединены между собой через жесткую муфту и имеют всегда одинаковые обороты вращения. Поэтому регулирование оборотов электродвигателя означает такое же регулирование оборотов насоса.

В настоящее время на польдерных насосных станциях применены асинхронные электродвигатели без возможности регулирования частоты вращения. Однако такое положение может быть изменено путем дополнительного монтажа в насосных станциях преобразователей частоты (ПЧ), позволяющих регулировать частоту подаваемого на электродвигатель электрического тока [3]. Вместе с регулированием частоты происходит изменение оборотов электродвигателей и насосов.

Подбор насосных агрегатов на польдерах в Полесье осуществлен по расчетным напорам, для которых геодезические высоты водоподъема принимаются 5%-ой обеспеченности. Для условий с различной геодезической высотой водоподъема ее расчетную величину рекомендуется принимать средневзвешенной с проверкой на обеспечение откачки при максимальном напоре по ТКП [4]. Расчетная обеспеченность расходов для определения притока воды к насосным станциям для полевых севооборотов, пастбищ и сенокосов рекомендуется 10%-ой обеспеченности, а модуль откачки 0,7-1,0 л/с. В результате использования указанных ТКП и раньше действующей нормативной документации на существующих польдерах насосы имеют расчетные напоры в основном в пределах 3,5-4,5 м, а при подаче воды в водохранилища достигают около 8 м. В то же время в течение года фактические напоры в отдельные периоды уменьшаются до 2-3 м и менее. Поэтому регулирование оборотов насосов в такие периоды в сторону их уменьшения приведет к изменению характеристик насосов и уменьшению потребляемой мощности.

Например, без регулирования оборотов насоса при напорной характеристике H_1 (рис.), $n_1=750$ об/мин и геодезической высоте водоподъема $h_r=4$ м (раб. точка A_1) напор будет 4,8 м, расход 0,68 м³/с и коэффициент полезного действия 0,74. При уменьшении геодезической высоты до $h_r=2,0$ м (раб. точка A_3) напор станет 3,2 м, расход 0,78 м³/с и к.п.д. 0,62.

Если уменьшить обороты насоса с помощью преобразователя частоты до $n_2=700$ об/мин, то напорная характеристика займёт положение H_2 (раб. точка A_4), напор при той же геодезической высоте ($h_r=2,0$ м) ещё уменьшится до 2,9 м, к.п.д. возрастет до 0,73 при расходе 0,72 м³/с.

В итоге при снижении геодезической высоты и регулировании оборотов насоса произойдет снижение напора, увеличение к.п.д., уменьшение расхода (рис.1), что снизит потребляемую мощность.

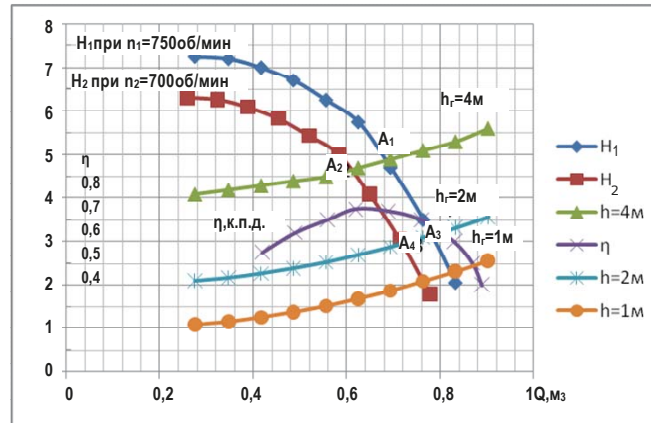


Рис.1 –Характеристики насоса1ОПВ2500-4.5.
H₁ – характеристика *H-Q* при оборотах *n₁*=750 об/мин;
H₂ – характеристика *H-Q* при оборотах *n₂*=700 об/мин;
h_z – характеристика трубопровода *h_z-Q* при *h_z*=4м, *h_z*=2м, *h_z*=1м;
η –характеристика *η-Q* коэффициента полезного действия.

По этим характеристикам может оказаться нежелательным уменьшение расхода. Но откачка воды на польдерах в вегетационный период ведётся с большими перерывами между циклами, поэтому уменьшение расхода откачки приведёт к увеличению времени работы насоса. Однако это увеличение допустимо и в большинстве случаев не повлияет на ухудшение водного режима почвы. В иных случаях можно подключить дополнительный насос и увеличить расход откачки.

Что касается уменьшения потребляемой мощности, то это обстоятельство еще не дает ответа на вопрос о снижении затрат электроэнергии. Для получения ответа проведем сравнение вариантов. Затраты электроэнергии определяются произведением потребляемой мощности на время работы механизма. Рассмотрим два варианта: без регулирования (вариант 1) и с регулированием оборотов преобразователем частоты (вариант 2) при откачке одного и того же объема воды. Затраты электроэнергии будут определяться уравнениями [5]:

$$\mathcal{E}_1 = N_1 t_1 = \rho g Q_1 H_1 t_1 + \eta_1 \quad (1)$$

$$\mathcal{E}_2 = N_2 t_2 = \rho g Q_2 H_2 t_2 + \eta_2 \quad (2)$$

где \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 – соответственно затраты энергии (Дж) в вариантах 1 и 2 (индексы 1 и 2 относятся к 1-му и 2-му вариантам);
 N_1 и N_2 – потребляемые мощности, Дж;
 t_1 и t_2 – время работы насосов, с;
 ρ – плотность жидкости, кг/м³;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 Q_1 и Q_2 – расходы откачки, м³/с;
 H_1 и H_2 – напоры, м;
 η_1 и η_2 – к.п.д., ед.

Объемы откачки в обоих вариантах приняты одинаковыми и равными:

$$W = Q_1 t_1 = Q_2 t_2 \quad (3)$$

где W – объем откачки, м³.

Вводя в уравнения (1) и (2) объем откачки по (3), получим:

$$\mathcal{E}_1 = \rho g W H_1 + \eta_1 \quad (4)$$

$$\mathcal{E}_2 = \rho g W H_2 + \eta_2 \quad (5)$$

Разница затрат электроэнергии между вариантами 1 и 2 составит:

$$\Delta \mathcal{E}_{1-2} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = \rho g W \left(\frac{H_1}{\eta_1} - \frac{H_2}{\eta_2} \right) \quad (6)$$

Так как напор $H_1 > H_2$, а к.п.д. $\eta_1 < \eta_2$, то $H_1/\eta_1 > H_2/\eta_2$ и разница $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2$ будет положительной и равной снижению затрат электроэнергии в варианте применения регулирования оборотов.

Определение оптимальных оборотов электронасоса для обеспечения снижения затрат электрической энергии и требуемого осушения

Задачей оптимизации откачек воды с мелиорированных земель является обеспечение оптимального водного режима почвы с наименьшими затратами электроэнергии с учетом организации эксплуатации насосной станции.

Эта задача решается определением расхода откачки и требуемого числа оборотов насоса, обеспечивающих отвод из почвы избыточного объема влаги за необходимое время.

Для обеспечения оптимального водного режима почвы требуется контроль уровней грунтовых вод на характерном участке, определение требуемых уровней воды в проводящем канале у створа характерного участка [6], расчет начальной отметки горизонта в аванкамере H_n , при которой насосная станция включается на откачку, и конечной отметки H_k снижения горизонта в аванкамере [4]. В результате действий согласно [4], [6] и [7] устанавливается режим откачки воды насосной станцией.

При установлении режима откачки следует учитывать возможность насосов работать с разными характеристиками при регулировании числа оборотов электродвигателей. Рассмотрим обоснование режима откачки в случаях, когда насосная станция включает несколько насосов, а один из них соединен с электродвигателем, обороты которого регулируются преобразователем частоты (ПЧ).

Пусть в расчётных условиях насос рассчитывался при создании польдера с постоянными оборотами n_1 при расчётном напоре, геодезической высоте водоподъёма, расходе и к.п.д. Если геодезическая высота h_g понизилась, что в реках, являющихся водоприемниками на польдерах, случается не редко, насос при тех же оборотах n_1 будет работать с пониженным к.п.д. и завышенным, чем требуется, напором. Если к насосному агрегату подключить преобразователь частоты, то в этом случае подбором числа оборотов можно добиться работы его с максимальным к.п.д. и требуемым напором, что приведёт к снижению затрат электроэнергии на откачку избыточных вод.

Подбор числа оборотов и снижение затрат электроэнергии в этом случае можно сделать по ниже приведённой методике.

1. Исходными данными, определяемыми предварительно, устанавливаются отметки начального H_n и конечного H_k эксплуатационных горизонтов в аванкамере, отметка уровня в водоприемнике $H_{вп}$.

2. Определяется средневзвешенная отметка требуемого горизонта в аванкамере насосной станции:

$$H_c = 0,5(H_n + H_k) \quad (7)$$

3. Определяется расчетная геодезическая высота водоподъёма:

$$h_r = H_{вп} - H_c \quad (8)$$

4. Строится расходная характеристика трубопровода при h , и по ней для оптимальной откачки, которая принимается при максимальном коэффициенте полезного действия η_{\max} , определяются расход Q_2 и напор H_2 подбираемого (натурного) насоса. Также по рабочей точке, т.е. на пересечении характеристики трубопровода и характеристики модельного насоса, определяется расход Q_1 , напор H_1 , к.п.д. η_1 и число оборотов n_1 .

Под модельным насосом будем понимать насос, характеристики и параметры которого приведены в каталоге, под натурным – тот же насос, но с другим числом оборотов n_2 .

5. Определяется отношение чисел оборотов и расходов Q_1 и Q_2 модельного и натурного (с оборотами n_2) насосов. Используется формула подобия [8]:

$$\alpha = \frac{n_1}{n_2} = \frac{Q_1}{Q_2} \quad (9)$$

где n_2 – число оборотов натурного насоса

6. Определяются требуемые обороты насоса n_2 для откачки расходом Q_2 :

$$n_2 = n_1 + \alpha \quad (10)$$

7. Устанавливаются на электронасосе с помощью преобразователя частоты обороты электродвигателя n_2 и производится пробная откачка расходом Q_2 до понижения уровня в аванкамере с H_n до H_k . Определяются время снижения уровня (откачки) t_0 , время восстановления уровня от H_k до H_n (паузы) t_n , и время цикла $t_{ц}$.

8. Определяется объём воды, подлежащей откачке [9]:

$$W = [N + Q_n + \delta(\alpha - \alpha_1) - \epsilon t]F \quad (11)$$

где W —объём откачки воды, м³;

N —атмосферные осадки, просочившиеся до уровня грунтовых вод (УГВ) за расчётное время, м;

Q_n —грунтовое подпитывание за расчётное время, м;

δ — водоотдача;

α — положение УГВ от поверхности почвы на конец расчётного времени, м;

α_1 — положение УГВ от поверхности почвы на начало расчётного времени, м;

ϵ — интенсивность испарения за расчётный период, м/сут.;

t — расчётный период, за который необходимо отвести избыточную воду, сут.;

F — площадь осушения, м².

9. Находится по ТКП [4] с учётом других сельскохозяйственных требований период t , за который необходимо отвести избыточную воду, сут.

10. Определяется продолжительность цикла:

$$t_{ц} = t_0 + t_n \quad (12)$$

11. Определяется объём откачки W_0 в одном цикле:

$$W_0 = Q_2 t_0 \quad (13)$$

12. Определяется фактическое время откачки всего избыточного стока W :

$$t_{ф} = \frac{W}{W_0} t_{ц} \quad (14)$$

13. Сопоставляем фактическое время откачки избыточных вод $t_{ф}$ с требуемым периодом t , за который необходимо отвести избыточную воду.

Если окажется, что $t_{ф} < t$, то откачка производится циклично расходом Q_2 при оборотах насоса n_2 в пределах изменения отметок уровней в аванкамере от H_n до H_k до стабилизации средневзвешенного горизонта H_c , определяемого формулой (7).

Если окажется, что фактическое время $t_{ф} > t$, то следует принять меры для сокраще-

ния откачки до времени t . Этими мерами могут быть: увеличение расхода откачки за счёт увеличения оборотов насоса, или подключение к откачке на некоторое время параллельно второго насоса.

14. Снижение затрат электроэнергии в случае $t_{\text{ф}} \leq t$ составит (принимая в формуле (6) $\rho=1000\text{кг/м}^3$, $g=9,81\text{м/с}^2$ и учитывая, что $1\text{кВт}\cdot\text{ч}=3,6 \cdot 10^6\text{Дж}$):

$$\Delta \mathcal{E}_{1-2} = 0,00272W \frac{H_1}{\eta_1} - \frac{H_2}{\eta_{\text{нз}} \eta_{\text{пч}}} \quad (15)$$

где η_1 – к.п.д. модельного насоса, ед;
 $\eta_{\text{нз}}$ – к.п.д. насоса при оборотах n_2 , ед;
 $\eta_{\text{пч}} \approx 0,98$ – к.п.д. преобразователя частоты, ед.

15. Максимальный коэффициент полезного действия насоса $\eta_{\text{нз}}$ при оборотах n_2 уточняется уравнением Муди [8]:

$$\eta_{\text{нз}} = 1 - (1 - \eta_{\text{нз}}) i_n^{-0,2} \quad (16)$$

где $i_n = n_2/n_1$ – отношение оборотов натурального (n_2) и модельного (n_1) насосов;
 $\eta_{\text{н}}$ – к.п.д. модельного насоса ($\eta_{\text{н}} = \eta_{\text{макс}}$).

Затраты электроэнергии на мелиоративной системе «Жук» Пинского района и возможная ее экономия при оптимизации числа оборотов электродвигателей

Польдерная система «Жук» расположена в пойме р.Ясельда и занимает площадь 636 га. Водоприемником откачиваемой с системы воды является р.Ясельда. Поэтому напор насосной станции определяется гидрологическим режимом р.Ясельды, положением уровней в аванкамере и потерями напора в напорной линии. В 2011 году сток р.Ясельды был маловодным и средние напоры насосной станции «Жук» были в пределах 1,7-2,7 м. Расчетный напор для насосной станции принят 4,2 м по многоводным годам расчетной обеспеченности. Насосы в 2011 году работали при постоянных числах оборотов $n_1 = 750$ об/мин. Затраты энергии согласно годовому отчету Пинского ПМС составили 90,04 т.кВт·час.

Расчет возможных затрат электроэнергии при оптимизации чисел оборотов насосов для откачки тех же объемов воды, которые откачивались нам.с. «Жук» в 2011 году, выполнен по формуле (15) (табл.1).

В этом расчёте принято, исходя из больших объёмов избыточных вод, в январе, феврале и мае откачку вести двумя насосами (одним с регулируемым числом оборотов и параллельно одним без регулирования) и тремя насосами (одним с регулируемым числом оборотов и двумя параллельно без регулирования) в марте и апреле. В результате расчётов затраты электрической энергии в 2011 году могли бы составить 61,04 т.кВт·ч (табл. 1), а экономия могла быть 90,04-61,04=29 т.кВт·ч, т. е. 32,2%.

Практически около третьей части электроэнергии было потрачено на обогрев окружающей среды.

Таблица 1– Параметры работы насосной станции на м.с. «Жук» при пг=const и возможные результаты при уменьшении числа оборотов с п₁ на пг=п₁ в 2011 г.

Месяц	Гидравлический напор, м			при пг=750 об/мин						при пг=п ₁			
	2	3	Затраты электроэнергии, т.кВтч	Напор Н ₁ , м	Расход Q ₁ , м ³ /ч	Кэффициент полезного действия η _з , ед.	Объем откачки W, млн.м ³	Кэффициент полезного действия η _з , ед.	Расход Q ₂ , м ³ /ч	Кэффициент полезного действия η _з , ед.	Напор Н ₂ , м	Число оборотов n ₂ , об/мин	Уточненное к.п.д., η _з , ед.
1	1,15	8,64		2,6	2925	0,61	0,746	0,75	2250	2	600	0,739	7,07
2	1,25	8,64		2,7	2900	0,62	0,730	0,75	2325	2,2	625	0,741	7,27
3	1	11,07		2,45	2915	0,6	0,997	0,75	2275	1,9	600	0,739	9,70
4	1	14,05		2,45	2915	0,6	1,265	0,75	2275	1,9	600	0,739	12,31
5	0,65	8,64		2,15	3000	0,58	0,857	0,75	2300	1,5	585	0,737	6,69
6	0,25	5,22		1,9	3045	0,51	0,515	0,745	2400	1,05	585	0,732	2,011
7	0,75	6,30		2,2	2985	0,58	0,611	0,75	2300	1,5	585	0,737	3,381
8	0,9	4,95		2,3	2975	0,595	0,471	0,75	2300	1,35	600	0,739	2,342
9	0,64	4,77		2,14	3005	0,58	0,476	0,75	2310	1,45	585	0,737	2,544
10	0,6	4,86		2,17	3007	0,575	0,474	0,75	2305	1,42	585	0,737	2,481
11	0,15	5,76		1,8	3060	0,5	0,588	0,745	2385	1,1	585	0,732	2,405
12	0,04	7,11		1,7	3075	0,49	0,754	0,744	2400	1	585	0,731	2,805
Год		90,04					8,483						61,04

Заключение

При снижении уровней воды в водоприемнике в отдельные периоды года при неизменных оборотах насоса происходит снижение коэффициента полезного действия и некоторое уменьшение напора. Если при этом устанавливать обороты насоса такие, при которых будет иметь место оптимальное значение коэффициента полезного действия, то произойдет еще большее снижение напора. В результате повышения к.п.д. и уменьшения напора насоса затраты электроэнергии на откачку избыточных вод снижаются.

Установку требуемых оборотов электродвигателя, а следовательно и насоса, можно производить с помощью преобразователей частоты (ПЧ), широко применяющихся в промышленности в развитых странах более 10 лет. Применение этого метода в мелиорации также позволит значительно уменьшить затраты электроэнергии (в примере уменьшение годовых затрат составило 32,2%).

Библиографический список

1. Русецкий, А.П. Пути снижения затрат электрической энергии при эксплуатации водооборотных польдерных систем. – Мелиорация переувлажненных земель. Сборник научных работ. Том XLIV. – БелНИИ-Мил, 1997. – С. 207-217.
2. Русецкий, А.П., Нестеров, М.В., Галковский, В.Ф. Затраты электроэнергии и возможная ее экономия на насосных станциях польдерных систем. – Мелиорация и водное хозяйство XXI века. Наука и образование. Материалы международной научно-практической конференции (г. Горки, 4-5 июня 2009 г.) – БГСХА, 2009. – С. 197-203.
3. Масандилов, Л.Б., Москаленко, В.В. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 96 с.
4. Мелиоративные системы и сооружения. Нормы проектирования. ТКП 45-3.04-8-2005 (02250). – Минск: РУП «Стройтехнорм», РУП «Минстиппроект». – 2006. – 106 с.
5. Карелин, В.Я., Минаев, А.В. Насосы и насосные станции. Издание второе, переработанное и дополненное. – М.: Стройиздат, 1986. – 320 с.
6. Способы оперативного контроля водного режима почвы и принятие решений по его регулированию на мелиоративных системах. Рекомендации. – РУП «Институт мелиорации». – Минск. – 2007. – 28 с.
7. Польдерные мелиоративные системы. Правила проектирования. ТКП 45-3.04-179-2009 (02250). – Минск: РУП «Стройтехнорм», РУП «Минстиппроект». – 2010. – 100 с.
8. Рычагов, В.В., Флоринский, М.М. Насосы и насосные станции. 4-е издание, переработанное и дополненное. – М.: «Колос». – 1975. – 416 с.
9. Проектирование и расчеты регулирующей сети осушительно-увлажнительных систем на торфяных почвах (рекомендации). – Минск: «Ураджай». – 1979. – 80 с.

Summary

A. Rusetsky

REDUCING OF ELECTRICITY CONSUMPTION ON DRAINAGE PUMPING STATIONS OF RECLAMATION SYSTEMS BASED ON THE CONTROL OF MOTOR ROTATION SPEED

Conditions of electricity consumption reducing on drainage pumping stations of reclamation system equipped with a outfall are shown. The article demonstrates that reduction in water intake during vegetation period at the constant pump speed leads to excessive costs of electricity, but reducing of the pump speed save electricity. Methods of optimization the process of water pumping with minimal costs are given. Possible energy saving in the hydrological conditions of 2011 on polder "Zhuk" is determined, which would make 32.2% of the annual costs in the case of frequency converter using to regulate pump speed on the one of motors.

Поступила 2.02.2015