

Получена: 11.10.2017 г.

Приета: 20.10.2017 г.

ГРАФИЧНО ПРЕДСТАВЯНЕ И АНАЛИТИЧНИ ЗАВИСИМОСТИ, СВЪРЗАНИ С РАБОТАТА НА ПОМПИ С ПРОМЕНЛИВА ЧЕСТОТА

Б. Борисов¹

***Ключови думи:** помпа с променлива честота на въртене, спестяване на електроенергия, коефициент на полезно действие, разходно-напорна характеристика на помпа, режим на работа на помпа с променлива честота, графично представяне*

РЕЗЮМЕ

Изведени са уравнения за минималната допустима честота на въртене и водно количество на помпа с променлива честота във връзка с наличието на неустойчива област при разходно-напорната характеристика на помпата. Предложени са формули за пряко изчисляване на коефициентите на пълно квадратно уравнение на разходно-напорната характеристика. Предложено е математическо описание на водоразпределителна система, състояща се от помпа с променлива честота, захранваща два резервоара.

В дисциплините Помпи и помпени станции и Мелиорации и помпени станции, които се изучават в Хидротехническият факултет на УАСГ, традиционно е застъпено графичното представяне на работата на водоразпределителни системи с помпи с постоянна честота. В статията са направени графични анализи за различни водоразпределителни системи с помпи с променлива честота.

1. Въведение

Регулирането на производителността на центробежните помпи чрез промяна на оборотите на работното колело е подход, който навлиза широко през последните години във водоснабдителната практика. [1, 7, 8]. Промяната на честотата на въртене на сис-

¹ Боян Борисов, ас. инж., кат. „Водоснабдяване, канализация и пречистване на водите“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: boyan_borisov@abv.bg

темата ротор, вал/работно колело се постига с регулиране на честотата на въртене на електромагнитното поле в електродвигателя, чрез преобразувател на честотата на електрическия ток. Голямото разпространение на помпите с променлива честота (ППЧ) се дължи на следните две обстоятелства: най-често променливите обороти са по-ефективен начин за регулиране на производителността на помпата в сравнение с класическите подходи; намаляването на цената на честотните преобразуватели през последните десетина години.

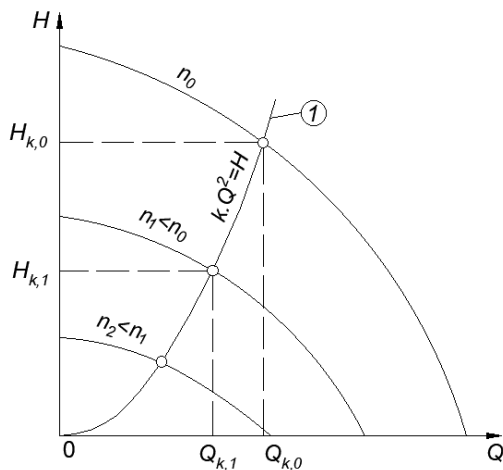
В първата част от статията са предложени инженерни решения на няколко задачи от практиката, свързани с работата на ППЧ.

Обучението в Хидротехническият факултет при УАСГ, свързано с водните помпи, традиционно съдържа графично представяне на тяхната работа при различни водоразпределителни системи [2, 5]. Във втората част на статията са представени графични анализи на работата на ППЧ.

2. Аналитични зависимости, свързани с работата на помпи с променлива честота

2.1. Уравнение на разходно-напорна характеристика на помпа при намалена честота

На фиг. 1 са показани разходно-напорни характеристики (РНХ) на центробежна помпа при номинална и намалена честота (обороты), съответно при n_0 и n_1 , n_2 , както и една крива на пропорционалност.



Фиг. 1. Разходно-напорни характеристики на ППЧ при различни обороти.
Крива на пропорционалност

В програмите за хидравлично моделиране, както и в някои електронни каталози на производители на помпи, има възможност да се работи с редуцираните характеристики на помпите. В случаите от практиката, когато тази възможност не е налична, е полезно да се работи с аналитичен вид на уравнението на намалената РНХ. В [6, 10] се използват уравненията на номиналната и намалената РНХ, съответно (1.1) и (1.2).

$$a - b \cdot Q^c = H \quad (1.1)$$

$$a \cdot \omega_k^2 - b \cdot \omega^{(2-c)} \cdot Q^c = H, \quad (1.2)$$

където a_i са коефициентите на РНХ при номинални обороти;

ω_k – относителна честота на въртене, $\omega = n_k/n$;

n_k и n – съответно честотите на въртене при намалени и номинални обороти, min^{-1} .

По-удобно за целите на някои математически преобразувания е да се използват пълно или непълно квадратни уравнения.

$$a_2 \cdot Q^2 + a_1 \cdot Q + a_0 = H \quad (2.1)$$

$$a_2 \cdot Q^2 + a_0 = H. \quad (2.2)$$

В [12] е дадено уравнението на намалената разходно-напорна характеристика, описана като пълно квадратно уравнение (3.1). Извършени са следните преобразувания. От законите на подобие $Q/Q_k = n/n_k$ и $H/H_k = (n/n_k)^2$ се изразяват водното количество и напорът от номиналната РНХ, както следва: $Q = Q_k/\omega_k$ и $H = H_k/\omega_k^2$. След заместване във форм. (2) се получават уравненията (3).

$$a_2 \cdot Q^2 + a_1 \cdot \omega_k \cdot Q + a_0 \cdot \omega_k^2 = H \quad (3.1)$$

$$a_2 \cdot Q^2 + a_0 \cdot \omega_k^2 = H. \quad (3.2)$$

2.2. Преки формули за изчисляване на коефициентите в пълно квадратно уравнение на разходно-напорната характеристика

Често е необходимо след визуални отчети на три и повече точки от каталожните РНХ на производителите или въз основа на опитно установени напори и водни количества на съществуващи помпи да се намерят коефициентите a_i в уравненията на РНХ (формули (1) и (2)).

Пълното квадратно уравнение (2.1) описва достатъчно точно РНХ на центробежните помпи. Добра точност се постига и с уравнение (1.1) (изрази за коефициентите са дадени в [3]), но при тях, заради степения показател, който е различен от 2, е затруднено извеждането на аналитични зависимости, описващи работата на ВрС.

В [5] е препоръчан начин за намиране на коефициентите a_i чрез числено решаване на системата от три уравнения (4), въз основа на три двойки каталожни или опитни отчети $Q - H$.

$$\begin{cases} a_2 \cdot Q_1^2 + a_1 \cdot Q_1 + a_0 = H_1 \\ a_2 \cdot Q_2^2 + a_1 \cdot Q_2 + a_0 = H_2 \\ a_2 \cdot Q_3^2 + a_1 \cdot Q_3 + a_0 = H_3 \end{cases} \quad (4)$$

Друг начин е чрез програмен продукт, например MS Excel, да се използва инструмент за регресионен анализ, с помощта на който лесно може да се получат стойностите на a_i .

В настоящото изследване се предлага метод с използване на преки формули за изчисляване на a_i . Следва да се отбележи, че в инженерната практика точните изрази за изчисляване на дадена величина често са най-предпочитаният подход.

При наличие на три двойки Q - H , системата (4) се решава аналитично по отношение на a_i , като се получават изразите (5).

$$\begin{aligned}
 a_2 &= \frac{Q_1 H_2 - Q_2 H_1 - Q_1 H_3 + Q_3 H_1 + Q_2 H_3 - Q_3 H_2}{-Q_1^2 Q_2 + Q_1^2 Q_3 + Q_1 Q_2^2 - Q_1 Q_3^2 - Q_2^2 Q_3 + Q_2 Q_3^2} \\
 a_1 &= -\frac{Q_1^2 H_2 - Q_2^2 H_1 - Q_1^2 H_3 + Q_3^2 H_1 + Q_2^2 H_3 - Q_3^2 H_2}{-Q_1^2 Q_2 + Q_1^2 Q_3 + Q_1 Q_2^2 - Q_1 Q_3^2 - Q_2^2 Q_3 + Q_2 Q_3^2} \\
 a_0 &= \frac{-H_3 Q_1^2 Q_2 + H_2 Q_1^2 Q_3 + H_3 Q_1 Q_2^2 - H_2 Q_1 Q_3^2 - H_1 Q_2^2 Q_3 + H_1 Q_2 Q_3^2}{-Q_1^2 Q_2 + Q_1^2 Q_3 + Q_1 Q_2^2 - Q_1 Q_3^2 - Q_2^2 Q_3 + Q_2 Q_3^2}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

След еднократно въвеждане на изразите (5) в електронни таблици, при въвеждане на отчетите за Q и H , могат да бъдат правени многократни изчисления за коефициентите a_i .

При използване на повече двойки отчети от каталожната или експерименталната РНХ може да се постигне по-голяма точност. В този случай се получава предопределена система по отношение на неизвестните коефициенти a_i . За извеждане на общия вид (независимо от броя на двойките отчети) на преки формули е необходимо първо да се приложи методът на най-малките квадрати (форм. (6)).

$$\begin{aligned}
 F &= \sum (H_i - a_2 \cdot Q_i^2 - a_1 \cdot Q_i - a_0)^2 \\
 \min &\sum (H_i - a_2 \cdot Q_i^2 - a_1 \cdot Q_i - a_0)^2.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Частните производни на израза F се приравняват на 0, в резултат на което се получава системата уравнения (7).

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial F}{\partial a_2} &= \sum (H_i - a_2 \cdot Q_i^2 - a_1 \cdot Q_i - a_0) \cdot Q_i^2 = 0 \\
 \frac{\partial F}{\partial a_1} &= \sum (H_i - a_2 \cdot Q_i^2 - a_1 \cdot Q_i - a_0) \cdot Q_i = 0 \\
 \frac{\partial F}{\partial a_0} &= \sum (H_i - a_2 \cdot Q_i^2 - a_1 \cdot Q_i - a_0) = 0.
 \end{aligned} \tag{7}$$

Получената система може да се реши аналитично. Използван е методът на Крамер. След преобразувания се достига до преките изрази (8) за a_i .

$$a_2 = \frac{\sum H_i (\sum Q_i^2)^2 + (\sum Q_i)^2 \sum H_i Q_i^2 + n \sum Q_i^3 \sum Q_i H_i - n \sum Q_i^2 \sum H_i Q_i^2 - \sum Q_i \sum Q_i^3 \sum H_i - \sum Q_i \sum Q_i^2 \sum Q_i H_i}{(\sum Q_i^2)^3 + (\sum Q_i)^2 \sum Q_i^4 + n (\sum Q_i^3)^2 - n \sum Q_i^4 \sum Q_i^2 - 2 \sum Q_i \sum Q_i^3 \sum Q_i^2}$$

$$a_1 = \frac{(\sum \varrho_i^2)^2 \sum \varrho_i H_i + \sum \varrho_i \sum \varrho_i^4 \sum H_i + n \sum \varrho_i^3 \sum H_i \varrho_i^2 - n \sum \varrho_i^4 \sum \varrho_i H_i - \sum \varrho_i \sum \varrho_i^2 \sum H_i \varrho_i^2 - \sum H_i \sum \varrho_i^3 \sum \varrho_i^2}{(\sum \varrho_i^2)^3 + (\sum \varrho_i)^2 \sum \varrho_i^4 + n (\sum \varrho_i^3)^2 - n \sum \varrho_i^4 \sum \varrho_i^2 - 2 \sum \varrho_i \sum \varrho_i^3 \sum \varrho_i^2} \quad (8)$$

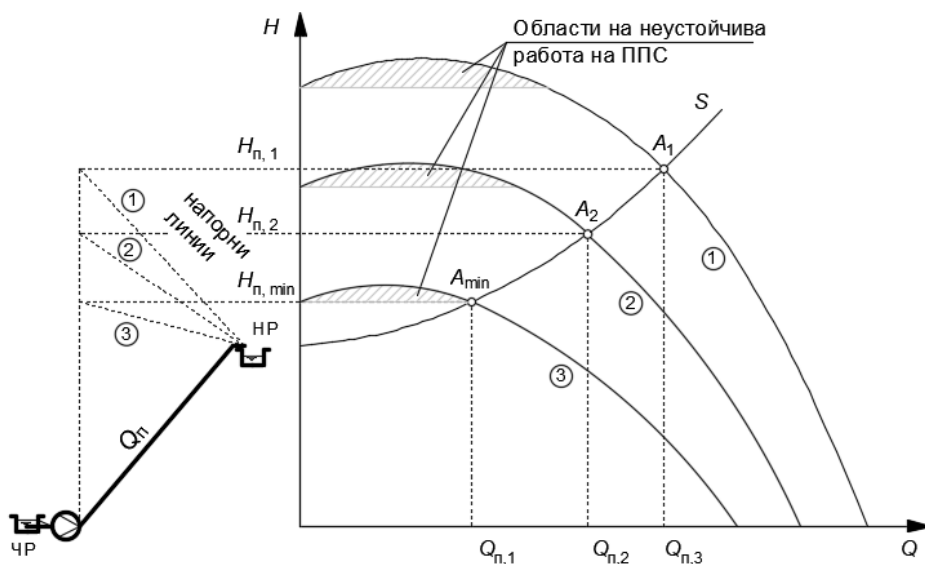
$$a_0 = \frac{(\sum \varrho_i^2)^2 \sum H_i \varrho_i^2 + \sum \varrho_i \sum \varrho_i^4 \sum \varrho_i H_i + (\sum \varrho_i^3)^2 \sum H_i - \sum \varrho_i^4 \sum \varrho_i^2 \sum H_i - \sum \varrho_i^3 \sum \varrho_i H_i \sum \varrho_i^2 - \sum \varrho_i^3 \sum \varrho_i \sum H_i \varrho_i^2}{(\sum \varrho_i^2)^3 + (\sum \varrho_i)^2 \sum \varrho_i^4 + n (\sum \varrho_i^3)^2 - n \sum \varrho_i^4 \sum \varrho_i^2 - 2 \sum \varrho_i \sum \varrho_i^3 \sum \varrho_i^2}$$

където n е броят на двойките отчети ($Q-H$).

Във връзка с дължината на изразите и тук, както при (5), следва да се отбележи, че след еднократното им въвеждане в електронни таблици, може да се извършва многократно изчисляване на стойностите на коефициентите a_i след въвеждане на отчетените стойности на Q и H .

2.3. Уравнения за пряко изчисляване на хидравлични параметри на водоразпределителна система, състояща се от помпа с променлива честота, тласкател и резервоар

При проектирането и експлоатацията на ВрС със схемата на фиг. 2 могат да бъдат поставени няколко практически задачи.



Фиг. 2. Схема на ВрС, състояща се от ППЧ, тласкател и напорен резервоар

1, 2 и 3 – режими на ППЧ с променливи водни количества; S – характеристика на водопровода

Задача 1: Необходимо е да се намери водното количество, което ще постъпва в резервоара при дадена относителна честота на въртене на помпата ω ;

Решение:

Приравняват се изразите за РНХ (форм. (3)) и характеристиката на водопровода (форм. (9)).

$$a_2 \cdot Q^2 + a_0 \cdot \omega^2 + a_1 \cdot \omega \cdot Q = H_{stat} + s \cdot Q^2, \quad (9)$$

където s е съпротивителният коефициент на тласкателя;
 H_{stat} – геодезичната височина.

Полученото уравнение се решава спрямо Q . Получават се два корена:

$$Q_{1,2} = \left\{ -\frac{a_1 \cdot \omega - \sigma_1}{2 \cdot (a_2 - s)}, -\frac{a_1 \cdot \omega + \sigma_1}{2 \cdot (a_2 - s)} \right\},$$

където $\sigma_1 = \sqrt{4 \cdot H_{stat} \cdot a_2 - 4 \cdot H_{stat} \cdot s + a_1^2 \cdot \omega^2 + 4 \cdot a_0 \cdot s \cdot \omega^2 - 4 \cdot a_0 \cdot a_2 \cdot \omega^2}$.

След заместване в положителния корен се получава изразът за търсеното водно количество $Q_{red,w}^{VSP}$ при относителна честота на въртене ω (форм. (10)).

$$Q_{red,w}^{VSP} = -\frac{a_1 \cdot \omega + \sqrt{4 \cdot H_{stat} \cdot a_2 - 4 \cdot H_{stat} \cdot s + a_1^2 \cdot \omega^2 + 4 \cdot a_0 \cdot s \cdot \omega^2 - 4 \cdot a_0 \cdot a_2 \cdot \omega^2}}{2 \cdot (a_2 - s)}. \quad (10)$$

При обратната задача, където се търси относителната честота на въртене, за да бъде подадено определено водно количество, уравн. (9) се решава по отношение на ω .

$$\omega = -\frac{a_1 \cdot Q - \sqrt{4 \cdot H_{stat} \cdot a_0 + a_1^2 \cdot Q^2 + 4 \cdot a_0 \cdot s \cdot Q^2 - 4 \cdot a_0 \cdot a_2 \cdot Q^2}}{2 \cdot a_0}. \quad (11)$$

Задача 2: При оптимизационните методики и различните режими на работа на ППЧ е необходимо да се задават граници на изменението на някои от параметрите на системата. Във връзка с наличието на неустойчива област от работата на ППЧ (фиг. 2), в рамките на настоящото изследване ще бъде предложен аналитичен израз за минимално-то допустимо водно количество $Q_{VSP,min}^{adm}$ и минималната¹ относителна честота на въртене $\omega_{VSP,min}^{adm}$ при даден водопровод с характеристика s . Следва да се отбележи, че при необходимост от голямо намаляване на оборотите, трябва да се съобразят и други ограничаващи обстоятелства, свързани с работата на помпения агрегат [9].

Разглеждаме РНХ при минималната допустима честота на въртене – режим 3 на фиг. 2. Търсят се координатите на т. $A_{min}(Q_{min}, H_{min})$.

Постъпва се по следния начин. Ординатата на пресечната точка на РНХ₃ с оста y се получава след заместване във форм. 3.1 с $Q = 0$.

$$H_0 = a_0 \cdot \omega_{min}^2. \quad (12)$$

Следва да се съобрази, че минималният допустим напор H_{min} е равен на напора H_0 при $Q = 0$ (форм. (12)).

$$H_0 = H_{min} = H_{stat} + s \cdot Q_{min}^2. \quad (13)$$

¹ За удобство по-нататък в изложението ще се използват съкратените означения Q_{min} и ω_{min}

След приравняване на десните страни на уравнения (12) и (13) и заместване с израза за водното количество от (10), се получава следното уравнение.

$$H_{stat} + s \cdot \frac{\left(a_1 \cdot \omega + \sqrt{4 \cdot H_{stat} \cdot a_2 - 4 \cdot H_{stat} \cdot s + a_1^2 \cdot \omega^2 + 4 \cdot a_0 \cdot s \cdot \omega^2 - 4 \cdot a_0 \cdot a_2 \cdot \omega^2} \right)^2}{4 \cdot (a_2 - s)^2} = a_0 \cdot \omega^2. \quad (14)$$

Уравнение (14) има 4 корена по отношение на ω , от които търсеният е:

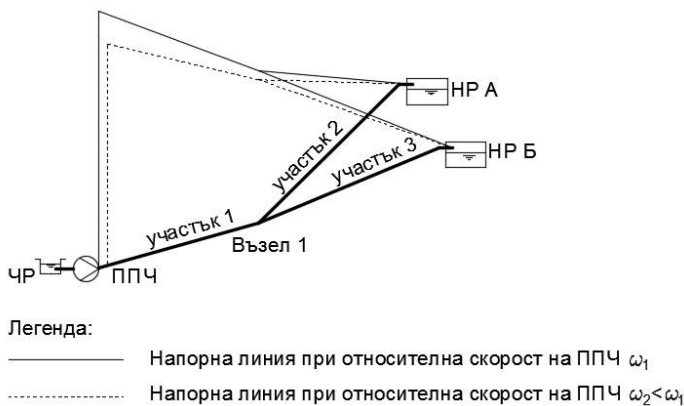
$$\omega_{min} = - \frac{H_{stat} \cdot a_2}{\sqrt{H_{stat} \cdot (a_0 \cdot a_2^2 - a_1^2 \cdot s)}}. \quad (15)$$

За да се получи минималното допустимо водно количество, е необходимо да се замести изразът за ω във (9). След решаване на уравнението се достига до положителния корен (16).

$$Q_{min} = \frac{H_{stat} \cdot a_1}{\sqrt{H_{stat} \cdot (a_0 \cdot a_2^2 - a_1^2 \cdot s)}}. \quad (16)$$

2.4. Уравнения за пряко изчисляване на хидравлични параметри на водоразпределителна система, състояща се от помпа с променлива честота, тласкател и два резервоара

Разглежда се ВрС на фиг. 3, състояща се от помпа, захранваща двата резервоара А и Б.



Фиг. 3. Схема на ВрС, състояща се от една помпа с променлива честота, захранваща два напорни резервоара

Поставена е следната задача. Ако е известна РНХ на помпата, съпротивителните коефициенти на тласкателите и геодезичната денивелация между ЧР, възел 1 и двата напорни резервоара, да се намерят водните количества към двата резервоара при различни

честоти на въртене на ППЧ. Необходимо е да се съставят три уравнения, които да описват разглежданата водоразпределителна система. Предлага се системата уравнения (17).

$$\begin{cases} a_2 \cdot Q_{red,AB}^2 + a_1 \cdot \omega \cdot Q_{red,AB} + a_0 \cdot \omega^2 = H_{stat,1} + s_1 \cdot Q_{red,AB}^2 + H_{stat,2} + s_2 \cdot Q_{red,A}^2 \\ a_2 \cdot Q_{red,AB}^2 + a_1 \cdot \omega \cdot Q_{red,AB} + a_0 \cdot \omega^2 = H_{stat,1} + s_1 \cdot Q_{red,AB}^2 + H_{stat,3} + s_3 \cdot Q_{red,B}^2, \\ Q_{red,A} + Q_{red,B} = Q_{red,AB} \end{cases} \quad (17)$$

където $Q_{red,AB}$, $Q_{red,A}$ и $Q_{red,B}$ са съответно водните количества за участъците ППЧ–1, 1–НР "А" и 1–НР "Б".

Първото и второто уравнение отразяват обстоятелството, че загубите на напор от помпата до всеки от двата резервоара са равни на ординатата на работната точка на ППЧ. Третото уравнение е следствие от закона за запазване на масата във възел 1.

Системата (17) е нелинейна по отношение на Q и може да се реши с програмен продукт. В табл. 1 и 2 е показано решение чрез използване на инструмента *Solver* на *MS Excel*. Структурата на задачата е следната. В клетките за уравнения от 1 до 3 е въведена системата (17), като всички членове са прехвърлени в лявата страна на равенството и е зададено ограничително условие за стойност 0. Варируемите параметри са трите водни количества. Словесното описание на задачата е: ако са дадени физическите параметри на водоразпределителната система (входните данни в табл. 1 и табл. 2), да се намерят водните количества в трите водопровода от системата.

Таблица 1. Хидравлични данни при честота на въртене $\omega = 1$

Входни данни									
коэффициенти на РНХ			характеристика на водопровода			разлики в котите			относителна честота
a_2	a_1	a_0	s_1	s_2	s_3	$H_{stat,1}$	$H_{stat,2}$	$H_{stat,3}$	ω
-44304,04	579,12	85,40	8354,00	167700,00	28000,00	18,00	16,00	21,70	1

Изходни данни

Q_1	Q_2	Q_3	H
0,031	0,010	0,021	60,15

Уравнение 1	Уравнение 2	Уравнение 3
0,0000	0,0000	0,0000

Таблица 2. Хидравлични данни при честота на въртене $\omega = 0,9$

Входни данни									
коэффициенти на РНХ			характеристика на водопровода			разлики в котите			относителна честота
a_2	a_1	a_0	s_1	s_2	s_3	$H_{stat,1}$	$H_{stat,2}$	$H_{stat,3}$	ω
-44304,04	579,12	85,40	8354,00	167700,00	28000,00	18,00	16,00	21,70	0,9

Изходни данни

Q_1	Q_2	Q_3	H
0,026	0,009	0,017	53,15

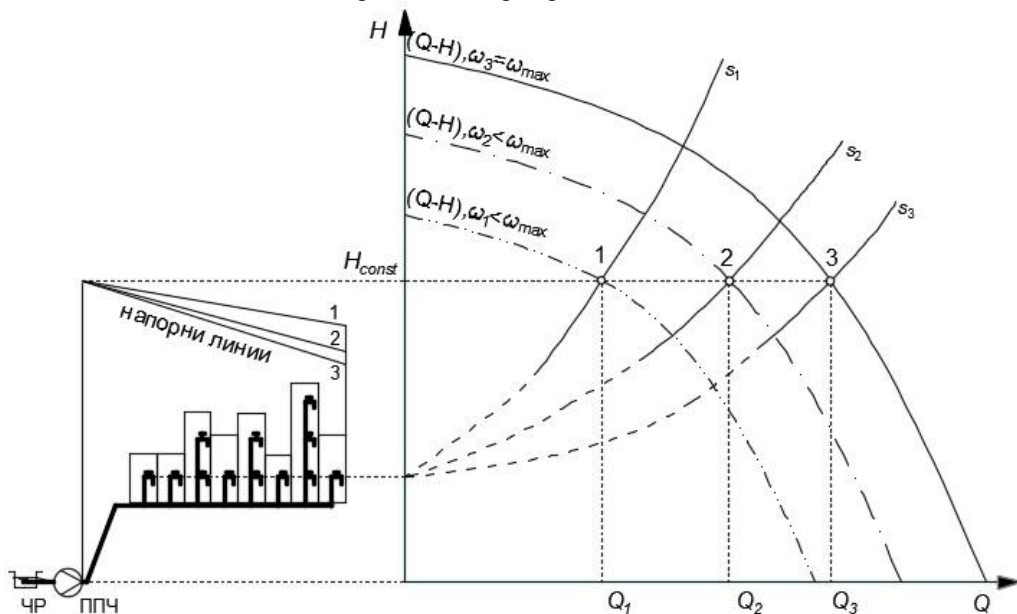
Уравнение 1	Уравнение 2	Уравнение 3
0,0000	0,0000	0,0000

3. Графично представяне на работата на помпа с променлива честота за различни случаи

3.1. Помпа с променлива честота, захранваща пряко водопроводната мрежа с постоянно налягане непосредствено след помпата

На фиг. 4 е дадена схема на ВрС, състояща се от помпа с променлива честота, която захранва пряко водопроводната мрежа. Непосредствено след помпата има датчик за налягане, който е свързан с честотния преобразувател. При промяна на налягането спрямо зададена стойност, датчикът подава сигнал към честотния преобразувател, който променя честотата на тока, а оттам и оборотите на помпата, в резултат на което РНХ се изменя съгласно форм. 1.1.4 – 4.

Работата на системата е разгледана при три водни количества.



Фиг. 4. Схема на ВрС, състояща се от ППЧ, захранваща пряко водопроводна мрежа с постоянно налягане непосредствено след помпата. Графично представяне на работата на системата

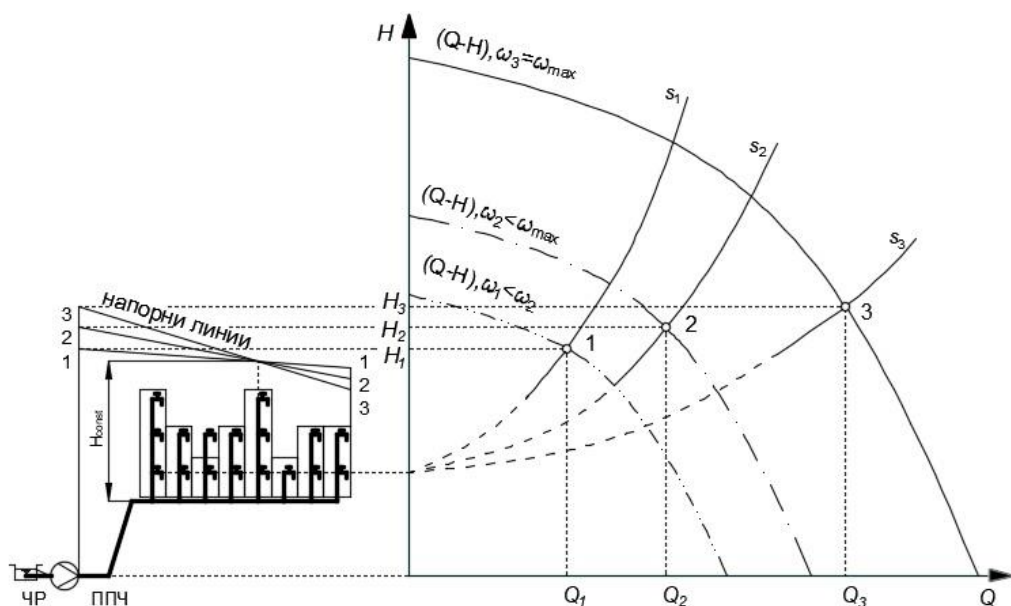
1, 2, 3 – режими на работа, съответно при малко, средно и голямо водно количество

Използвана е концепцията за системна крива на водопроводната мрежа, предложена в [11]. Тя може да се обясни, ако се направи аналогия с характеристиката на единичен тласкател със спирателен кран, който подава вода към напорен резервоар. Притварянето на спирателния кран се отразява върху стръмнината на характеристиката на тласкателя. По същия начин броят и степента на отваряне на водочерпните арматури на потребителите в селището се отразява върху стръмнината на системната крива на мрежата. Колкото по-голямо е водопотреблението, толкова по-полегата е системната крива и обратно.

Нека първоначално ППЧ да работи при средно водно количество (случай 2). При повишаване на водопотреблението системната крива става по-полегата, съответно работната точка на помпата се измества вдясно и надолу от т. 2 по РНХ₂. Датчикът за налягане установява намаляването на налягането и подава сигнал до контролера, който подава команда към преобразувателя да увеличи честотата на тока (оборотите на вала и колелото на помпата). В резултат на това РНХ₂ се преобразува в РНХ₃, която пресича новата системна крива в работна точка 3 със зададения напор. По същия начин при намаляване на водопотреблението, ППЧ намалява оборотите си, за да достигне зададената стойност на напора, непосредствено след нея. Системните крива стават прекъснати под напора на помпата, при който критичният водочерпен прибор остава без вода.

3.2. Помпа с променлива честота, захранваща пряко водопроводна мрежа с постоянно налягане в отдалечена точка

На фиг. 5 е дадена схема на ВрС и РНХ със системните криви при режим с постоянно налягане в отдалечена точка (в разглеждания случай в средата на мрежата) за три случая на водопотребление. Този режим е по-икономичен в сравнение с поддържането на постоянно налягане непосредствено след помпата.

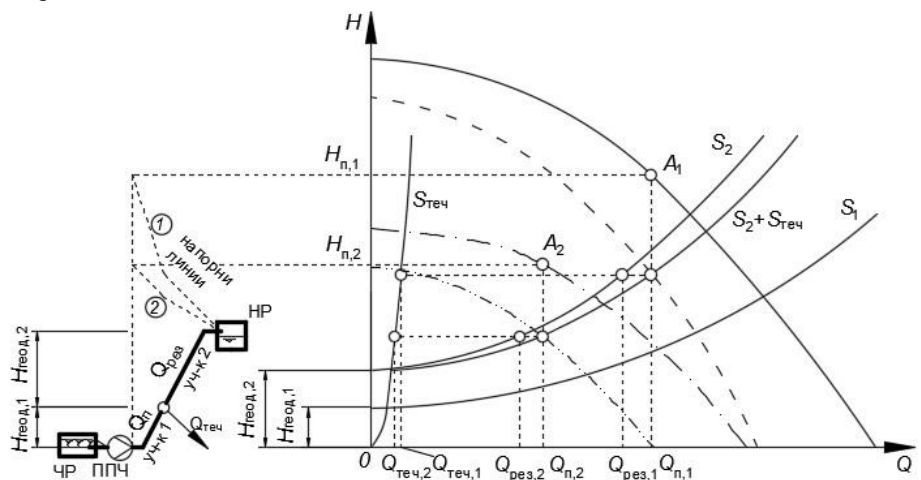


Фиг. 5. Схема на ВрС, състояща се от ППЧ, захранваща пряко водопроводна мрежа с постоянно налягане в отдалечена точка и графично представяне на работата на системата

Аналогично на случая в т. 3.1 системните крива стават прекъснати под напора на помпата, при който критичният водочерпен прибор остава без вода.

3.3. Водоразпределителна система, състояща се от помпа с променлива честота, тласкател със свободно изтичане и напорен резервоар. Наличие на повреда на тласкателя

На фиг. 6 е показана работата на ВрС с ППЧ, при която по трасето на тласкателя има повреда и съответно теч.



ЛЕГЕНДА за разходно-напорните характеристики:

- | | | | |
|-----------|------------------------------------------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------|
| — | при честота на въртене на работното колело 100%; | - - - - - | честота на въртене по-малка от 100%; |
| - - - - - | приведена помпа при честота на въртене на работното колело 100%; | - - - - - | приведена помпа при честота на въртене по-малка от 100%. |

Фиг. 6. Схема на ВрС, състояща се от ППЧ и резервоар с повреда на тласкателя

1 – случай при работа на ППЧ при максимална честота; 2 – работа на ППЧ при намалена честота; S_1 и S_2 – характеристики на участъците преди и след повредата; $S_{теч}$ – характеристика на повредата

Предложено е изобразяване на характеристиката на повредата, въз основа на формула (17), дадена в [4].

$$Q_{теч} = k_e \cdot H^{n_e}, \quad (17)$$

където $Q_{теч}$ е изтичащото водно количество от повредата; H – напорът в мястото на повредата; k_e и n_e – коефициенти.

В разгледания случай е приета стойност на степенния показател $n_e = 0,5$. Характеристиката на повредата се дава с (18) след изразяване на H .

$$H = (1/k_e)^2 \cdot Q_{теч}^2. \quad (18)$$

При изготвянето на фиг. 6 е използвана система с характеристики, при които загубите са около 10%. Характеристиката на по-голяма повреда би била по-полегата (голяма стойност на k_e). В този случай при намаляване на честотата на ППЧ, съответно на напора в тласкателя, водното количество от изтичането ще намалява в по-голяма степен.

ЛИТЕРАТУРА

1. Регламент (ЕО) N 640/2009 на комисията от 22.07.2009 за прилагане на Директива 2009/125/ЕО за екопроектиране на електродвигатели.
2. *Боянов, Б.* Хидромелиорации и помпени станции. С., АВС Техника, 2004.
3. *Иванов, Сл.* Водоснабдителни мрежи и съоръжения. С., УАСГ, 1999.
4. *Димитров, Г.* Намаляване на загубите на вода от водоснабдителните системи. АВС Техника, 2014.
5. *Славов, М.* и кол. Помпи и помпени станции. С., Техника, 1989.
6. Програмен продукт Watergems, на разработчика Bentley.
7. *Bower, J. et al.* Variable speed pumping. Oxford: Elsevier, 2004.
8. Hydraulic Institute. Optimizing pump systems. New Jersey, 2008.
9. *Tredinnick, St.* Variable speed pumping. How low you can go. // District Energy. www.districtenergy.org/de_magazine.htm.
10. *Walski, T. et al.* Advanced Water Distribution Modeling and Management. Exton: Haestad Methods, 2007.
11. *Walski, T. et al.* Developing system head curves for closed system. // AWWA, 09.2010.
12. *Wu, Zheng et al.* Modeling variable speed pump operations for target hydraulic characteristics. // AWWA, 01.2009.

GRAPHICAL REPRESENTATION AND ANALYTICAL EQUATIONS RELATED WITH THE WORK OF A VARIABLE SPEED PUMP

B. Borisov¹

Keywords: *variable speed pump, energy efficiency, efficiency, pump curve, regime of the work of a variable speed pump, graphical representation*

ABSTRACT

Equations for the minimal allowable rotation speed and flow rate of a variable speed pump (VSP) are derived in relation with the presence of an unstable area of the pump curve. Formulae for direct calculation of the coefficients of pump curves in the form of full quadratic equations are suggested. A mathematical model of water distribution system consisting of one VSP and two tanks is considered.

In the disciplines *Pump and Pump Stations* and *Meliorations and Pump Stations*, which are studied in the Faculty of Hydraulic Engineering, the graphical representation of the work of water distribution systems with pumps is traditionally well comprised. Graphical representations for different schemes of water distribution systems with VSP are made.

¹ Boyan Borisov, Assist. Prof. Eng., Dept. "Water Supply, Sewerage, Water and Wastewater Treatment", UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: boyan_borisov@abv.bg