

УДК 621.34-52

М.Г. Попович, д.т.н., проф.
 О.І. Кіселичник, к.т.н., доц.
 Національний технічний університет України "КПІ"
 О.Ф. Соколовський, зав. від.
 Житомирський агротехнічний коледж

ОСОБЛИВОСТІ ІНТЕРАКТИВНОГО КЕРУВАННЯ В НАСОСНИХ УСТАНОВКАХ

Розроблено математичну модель інтерактивної електромеханічної системи автоматичного керування насосною установкою при змішаному з'єднанні агрегатів. Отримано закон регулювання частоти обертання привідного двигуна, що враховує вплив регульованого та нерегульованого послідовно з'єднаних агрегатів на створення напору установки. Отримано вираз для граничного опору мережі, який визначає межу енергозберігаючих властивостей алгоритму.

Вступ. За умов стрімкого зростання цін на енергоресурси, враховуючи великі потужності та кількість насосних установок, обмеженість запасів прісної води, розробка електромеханічних систем автоматичного керування установками водопостачання з енергозберігаючими алгоритмами стає однією із пріоритетних задач суспільства. Значний економічний ефект може бути досягнутий за рахунок вдосконалення сучасних електромеханічних систем автоматичного керування насосними установками комунальних підприємств водопостачання на основі електропривода з перетворювачами частоти.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Найефективнішим способом регулювання в насосних установках є зміна частоти обертання робочого колеса насоса [1]. У зв'язку з розвитком напівпровідникової техніки та зменшенням її вартості все більшого поширення набувають частотні електроприводи [2]. Інтерактивна електромеханічна система автоматичного керування насосними установками забезпечує більш високий рівень енергозбереження порівняно з системами стабілізації технологічних параметрів насосів та системами програмного керування на основі графіків добових потреб [3]. Алгоритм інтерактивного контролера спонукає споживачів до ощадливої поведінки. Застосування енергозберігаючого алгоритму зі зворотними зв'язками за продуктивністю та частотою обертання привідних двигунів регульованого та нерегульованого агрегатів при паралельному з'єднанні насосів забезпечує високий рівень енергозбереження [4].

Постановка завдання. Метою роботи є визначення впливу споживачів на реакцію інтерактивного алгоритму, створення математичної моделі алгоритму з врахуванням впливу регульованого та нерегульованого агрегатів на напір установки при послідовному з'єднанні насосів, розробка інтерактивної електромеханічної системи автоматичного керування насосною установкою при змішаному з'єднанні агрегатів.

Особливості регулювання швидкості привідного двигуна в одноагрегатних установках. Швидкість електропривода з урахуванням зворотного зв'язку за продуктивністю насосної установки на кожному такті квантування [3]:

$$\omega_{\theta}((n+1)T_0) = \frac{kQ(nT_0)}{Q((n-1)T_0) + c} \omega_{\theta}((n-1)T_0), \quad (1)$$

де T_0 – період квантування; Q – продуктивність насосної установки; k – коефіцієнт затухання; c – стала величина для уникнення ділення на нуль; n – ціле додатне число.

Аналіз роботи алгоритму показує, що енергозбереження забезпечується при зменшенні частоти насоса на відповідних кроках квантування. Зниження швидкості відбувається при збільшенні опору мережі на попередньому кроці квантування алгоритму або за умови сталого значення опору. Зменшення опору мережі може призвести до зменшення або збільшення швидкості насоса. Тобто існує граничне значення опору мережі, яке визначає межу енергозберігаючих властивостей алгоритму.

Швидкість насоса ω не зміниться на наступному кроці, якщо реакція споживачів призведе до створення продуктивності:

$$Q(nT_0) = \frac{Q((n-1)T_0)}{\mu}, \quad (2)$$

де μ – коефіцієнт, що враховує зміну швидкості та продуктивності на попередніх кроках квантування,

$$\mu = \frac{\omega_{\theta}((n-1)T_0) Q((n-2)T_0) + c}{\omega_{\theta}((n-2)T_0) Q((n-1)T_0) + c}. \quad (3)$$

Спільний розв'язок рівнянь характеристики насоса та характеристики мережі дозволив отримати вираз для граничного опору мережі, при якому швидкість насоса залишиться сталою на наступному кроці алгоритму:

$$a_{sp} = \frac{H_0 \left(\frac{\omega(nT_0)}{\omega_H} \right)^2 - H_{cm} - a_\phi \left(\frac{Q((n-1)T_0)}{\mu} \right)^2}{\left(\frac{Q((n-1)T_0)}{\mu} \right)^2}, \quad (4)$$

де ω_H – номінальна частота обертання насосного агрегату; H_{cm} – статичний напір; H_0 – фіктивний напір насоса; a_ϕ – фіктивний гідравлічний опір насоса.

Відносне зменшення опору мережі:

$$a' = 1 - \left[\frac{H_0 \left(\frac{\omega(nT_0)}{\omega_H} \right)^2 - H_{cm} - a_\phi \left(\frac{Q((n-1)T_0)}{\mu} \right)^2}{\left(\frac{Q((n-1)T_0)}{\mu} \right)^2} \frac{Q^2((n-1)T_0)}{H_0 \left(\frac{\omega((n-1)T_0)}{\omega_H} \right)^2 - H_{cm} - a_\phi Q^2((n-1)T_0)} \right]. \quad (5)$$

Особливості регулювання швидкості привідних двигунів при послідовному з'єднанні агрегатів. Для забезпечення енергозберігаючих властивостей інтерактивної електромеханічної системи автоматичного керування одноагрегатною насосною установкою швидкість привідного двигуна ω_δ визначається згідно з рівнянням [5]:

$$\omega_\delta((n+1)T_0) = \frac{k\sqrt{H((n-1)T_0)}}{\sqrt{H(nT_0) + c}} \frac{\omega_\delta^2(nT_0)}{\omega_\delta((n-1)T_0) + c}, \quad (6)$$

де H – напір насосної установки.

У випадках, коли напір одного насоса недостатній для подачі рідини на задану висоту, або коли необхідно забезпечити розрахункову продуктивність для конкретної характеристики мережі, відцентрові насоси вмикають послідовно. Інтерактивний алгоритм на основі виразу (6), що застосований у схемі послідовно з'єднаних насосів не враховує вплив нерегульованого агрегату на створення напору установки та зменшує рівень енергозбереження системи. Для побудови інтерактивного алгоритму, що враховує вплив регульованого та нерегульованого послідовно з'єднаних агрегатів на створення напору, використані співвідношення:

$$\frac{(\omega_2 + \omega_{нер})^2}{(\omega_1 + \omega_{нер})^2} = \frac{H_B}{H_A}; \quad (7)$$

$$\frac{(\omega_3 + \omega_{нер})^2}{(\omega_2 + \omega_{нер})^2} = \frac{H_B}{H_C}; \quad (8)$$

$$\omega_3 = \sqrt{\frac{H_A}{H_C} \frac{(\omega_2 + \omega_{нер})^2}{\omega_1 + \omega_{нер}}} - \omega_{нер}, \quad (9)$$

де ω_3 – величина бажаної швидкості регульованого насоса; ω_1, ω_2 – попередні швидкості регульованого насоса; $\omega_{нер}$ – швидкість нерегульованого насоса; H_A, H_B, H_C – напори, створені насосною установкою у відповідних точках (рис. 1).

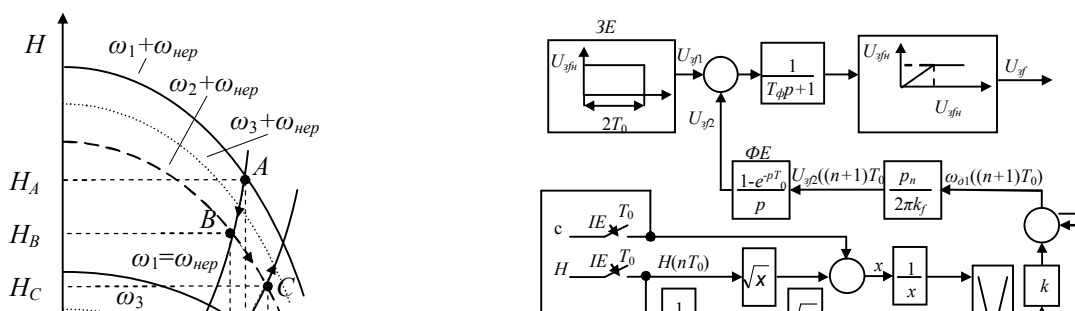
Початок роботи установки при застосуванні алгоритму в схемі послідовно працюючих агрегатів визначається точкою A (рис. 1). Частота обертання регульованого насоса становить ω_1 . При зменшенні швидкості насоса до значення ω_2 робота установки переміститься в точку B . Залежно від потреб споживачів швидкість насоса та напір установки може зростати або зменшуватися. Якщо споживачі не реагують на зменшення напору, – частота обертання буде продовжувати зменшуватися. Якщо опір мережі зменшиться (точка C), – частота обертання зросте.

Швидкість двигуна регульованого насоса:

$$\omega_{\delta 1}((n+1)T_0) = \frac{k\sqrt{H((n-1)T_0)}}{\sqrt{H(nT_0) + c}} \frac{(\omega_{\delta 1}(nT_0) + \omega_{\delta 2})^2}{(\omega_{\delta 1}((n-1)T_0) + \omega_{\delta 2}) + c} - \omega_{\delta 2}, \quad (10)$$

де $\omega_{\delta 2}$ – швидкість привідного двигуна нерегульованого насоса.

Структурна схема енергозберігаючого алгоритму зображена на рис. 2.



Задаючий елемент $ЗЕ$ (рис. 2) формує напругу завдання частоти перетворювача $U_{зф1}$, яка відповідає номінальному значенню частоти і утримується протягом періоду часу $2T_0$. Період квантування T_0 повинен перевищувати час перехідних процесів у системі, викликаних стрибкоподібною зміною напруги завдання частоти. Інформація про напір насосної установки H та швидкість двигунів $\omega_{\partial 1}, \omega_{\partial 2}$ надходить у фіксовані моменти часу nT_0 за допомогою імпульсних елементів $ІЕ$. Ланки $1/z$ реалізують затримку сигналів на такт квантування. Формуючий елемент ΦE перетворює дискретний сигнал в аналоговий. Через нульові початкові умови роботи системи напруга $U_{зф2}$ буде дорівнювати нулю протягом $2T_0$.

Особливості роботи при змішаному з'єднанні агрегатів. Насосні установки можуть складатися із декількох насосних агрегатів, з'єднаних паралельно, послідовно, або в змішану схему [1].

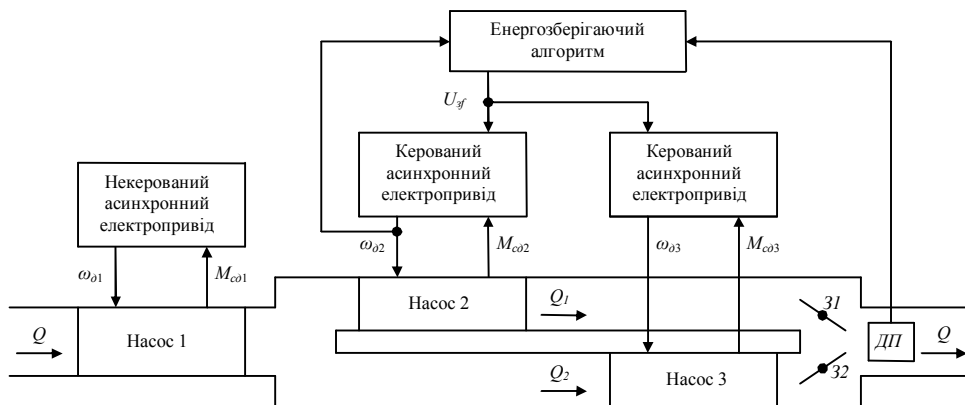
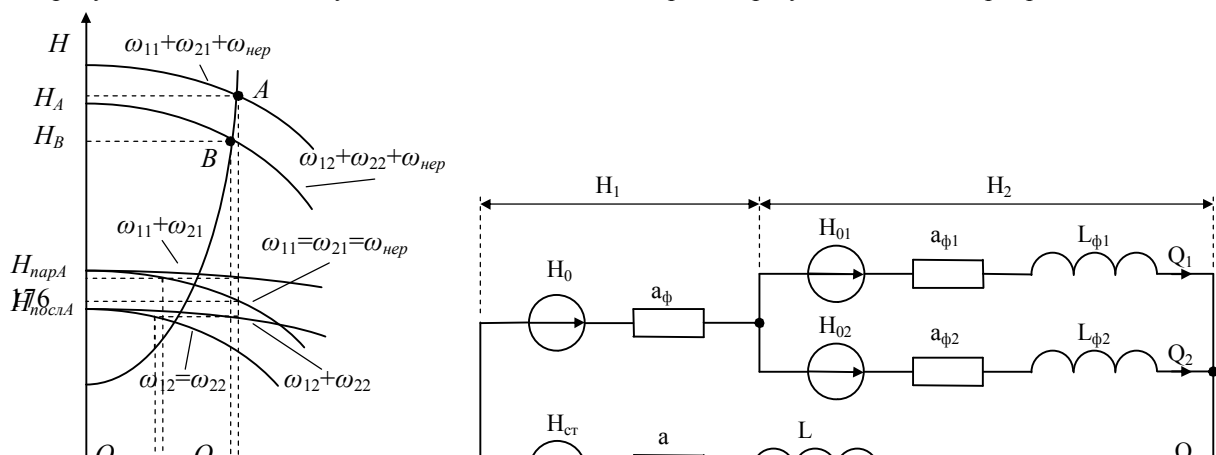


Рис. 3. Функціональна схема інтерактивної електромеханічної системи при змішаному з'єднанні насосних агрегатів

Комбінація різноманітних способів з'єднання дає можливість отримати характеристику насосної установки, що задовольняє технологічні вимоги.

На рис. 3 зображена функціональна схема насосної установки із застосуванням інтерактивного алгоритму. Регульованим електроприводом обладнані насоси 2, 3. За необхідності один із паралельно включених агрегатів може бути виведений із роботи. Засувки $31, 32$ слугують для попередження руху води в протилежному напрямку.

Датчик $ДП$ забезпечує сигнал зворотного зв'язку за продуктивністю на вході інтерактивного контролера. Для спрощення реалізації енергозберігаючого алгоритму в схемі реалізовані зворотні зв'язки за продуктивністю насосної установки та за частотою обертання регульованого електропривода.



Після пуску насоси обертаються з однаковою частотою (рис. 4). З метою повного забезпечення можливих режимів роботи всі агрегати обладнані насосами з однаковими напірними характеристиками. Нерегульований насос 1 створює напір $H_{\text{послА}}$. Регульовані насоси 2, 3 створюють напір $H_{\text{парА}}$. Продуктивність насоса 1 складає Q_A . Кожен із паралельно включених насосів забезпечує подачу $Q_{\text{парА}}$. Через час $2T_0$ швидкість насосів 2, 3 зменшується, робота установки переміститься в точку В. Насоси 2, 3 працюватимуть з продуктивністю $Q_{\text{парВ}}$. Далі швидкість насосів 2, 3, режим насосної установки буде змінюватись залежно від потреб споживачів.

Математичну модель насосної установки побудовано на основі еквівалентної схеми заміщення (рис. 5). Система рівнянь, що описує математичну модель:

$$H_1 = H_0 - a_{\phi} Q^2, \quad (11)$$

$$H_2 = H_{01} - a_{\phi 1} Q_1^2 - L_{\phi 1} \dot{Q}_1, \quad (12)$$

$$H_2 = H_{02} - a_{\phi 2} Q_2^2 - L_{\phi 2} \dot{Q}_2, \quad (13)$$

$$H = H_{cm} + aQ^2 + L \dot{Q}, \quad (14)$$

$$L_{\phi 1} = \frac{m_1}{\rho g S_1^2}, \quad (15)$$

$$L_{\phi 2} = \frac{m_2}{\rho g S_2^2}, \quad (16)$$

$$L = \frac{m}{\rho g S^2}, \quad (17)$$

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (18)$$

де H_1 – напір послідовно з'єднаного насоса; H_2 – напір паралельно з'єднаних насосів; H_{01} – фіктивний напір послідовно з'єднаного насоса; H_{02} , H_{03} – фіктивні напори паралельно з'єднаних насосів; Q – продуктивність послідовно з'єднаного насоса; Q_1 , Q_2 – продуктивність паралельно з'єднаних насосів; $a_{\phi 1}$ – фіктивний гідравлічний опір послідовно з'єднаного насоса; $a_{\phi 2}$, $a_{\phi 3}$ – фіктивні гідравлічні опори паралельно з'єднаних насосів; L – фіктивна індуктивність мережі; $L_{\phi 1}$, $L_{\phi 2}$ – фіктивні індуктивності паралельно з'єднаних насосів; ρ – густина води; g – прискорення вільного падіння; m – маса води в трубопроводі мережі; m_1 , m_2 – маса води в паралельно з'єднаних насосах; S – площа поперечного перерізу трубопроводу мережі; S_1 , S_2 – площа перерізу трубопроводів паралельно з'єднаних насосів.

Для визначення енергоефективності алгоритму при змішаному з'єднанні насосів проведено дослідження схеми із зворотними зв'язками за продуктивністю насосної установки та частотою обертання регульованого агрегату. В дослідженні використано три багатоступеневі вертикальні відцентрові насоси CV 125-30 [6] та привідні двигуни 4A250M2Y3 [7].

Для зменшення часу розрахунків перехідних процесів, викликаних зміною швидкості, прийнято: $m = 10000$ кг; $m_1 = 3000$ кг; $m_2 = 3000$ кг.

Параметри енергозберігаючого алгоритму: $U_{\text{зфн}} = 10$ В; $T_0 = 10$ с; $T_{\phi} = 0,1$ с; $k = 0,96$; $c = 10^{-8}$.

Результати дослідження роботи системи представлено на рис. 6.

За час $2T_0$ здійснюється пуск системи при гідравлічному опорі $0,035$ м/(м⁶/год.²). Працюють всі насоси. У момент часу 20 с швидкість паралельно з'єднаних насосів зменшується. Через 0,5 с споживачі знижують опір мережі на величину $0,007$ м/(м⁶/год.²) для збільшення продуктивності. При $t = 30$ с швидкість насосів 2, 3 зростає. Аналогічна картина спостерігається в моменти часу 40 с, 40,5 с, 50 с. При

відсутності реакції споживачів швидкість насосу буде тільки зменшуватися внаслідок дії енергозберігаючого алгоритму.

Під час досліджень на проміжку часу 60 с було спожито 2,74 кВт год. електроенергії.

На рис. 6: P_1 – корисна потужність двигуна послідовно з'єданого насоса, P_2 – двигуна паралельно з'єданого насоса 2, P_3 – двигуна паралельно з'єданого насоса 3, ω_{n1} – швидкість двигуна послідовно з'єданого насоса; ω_{n2} – швидкість двигуна паралельно з'єданого насоса 2; ω_{n3} – швидкість двигуна паралельно з'єданого насоса 3.

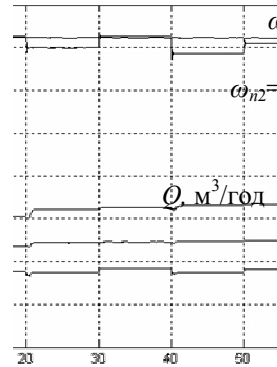


Рис. 6. Графіки перехідн

Для порівняння проведено дослідження інтерактивної електромеханічної системи з опором мережі у відповідні моменти часу $a_0 = 0,035 \text{ м}/(\text{м}^6/\text{год.}^2)$, $a_{20,5} = 0,042 \text{ м}/(\text{м}^6/\text{год.}^2)$, $a_{40,5} = 0,045 \text{ м}/(\text{м}^6/\text{год.}^2)$: з одним регульованим паралельно працюючим агрегатом та нерегульованим послідовно працюючим агрегатом; з одним регульованим паралельно працюючим агрегатом та регульованим послідовно працюючим агрегатом; з двома регульованими паралельно працюючими агрегатами та регульованим послідовно працюючим агрегатом; з двома нерегульованими паралельно працюючими агрегатами та регульованим послідовно працюючим агрегатом.

За 60 с спожито електричної енергії відповідно: 2,77 кВт год., 2,66 кВт год., 2,64 кВт год., 2,76 кВт год.

Висновок. Спільний розв'язок рівнянь характеристики насоса та характеристики мережі дозволив отримати вираз для граничного опору мережі, який визначає межу енергозберігаючих властивостей алгоритму. Врахування впливу регульованого та нерегульованого агрегатів на створення напору установки забезпечує коректну роботу алгоритму при послідовному з'єднанні насосів. Інтерактивне керування в схемах змішаного з'єднання насосів надає універсальності електромеханічній системі та забезпечує широкий діапазон регулювання технологічних параметрів. Обладнання установки двома регульованими агрегатами в різних комбінаціях зменшує споживання потужності. За неможливості регулювання частоти обертання всіх насосів перевагу слід надати застосуванню одного регульованого паралельно працюючого агрегату та регульованого послідовно працюючого агрегату.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуховых установках. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
2. Попович М.Г., Кіселичник О.І. Задачі автоматизації установок водопостачання на основі електромеханічних систем керування // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Вип. 3 (50). – 2008. – С. 8–12.
3. Попович М.Г., Печеник М.В., Кіселичник О.І., Соколовський О.Ф. Энергозберігаючі інтерактивні електромеханічні системи автоматичного керування насосними установками // Електромашинобудування та електрообладнання. – Одеський національний політехнічний університет: Міжвідомчий науково-технічний збірник. – Вип. 66. – К.: Техніка, 2006. – С. 311–314.
4. Соколовський О.Ф. Інтерактивна електромеханічна система автоматичного керування паралельно працюючими насосними агрегатами // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – Вип. III (42). – 2007. – С. 133–138.
5. Соколовський О.Ф. Застосування інтерактивного алгоритму в схемах багатоагрегатних насосних установок // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – Вип. IV (43). – 2007. – С. 48–54.

6. Grundfos – WinCAPS версія 7.90, CD.
7. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.

ПОПОВИЧ Микола Гаврилович – доктор технічних наук, професор кафедри автоматизації електромеханічних систем та електропривода Національного технічного університету України "КПІ".

Наукові інтереси:

- електромеханічні системи автоматизації;
- системи автоматичного керування турбомеханізмами, ліфтовими та шахтними підйомними установками.

Тел.: 8-044-2418556.

КІСЕЛИЧНИК Олег Іванович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електропривода Національного технічного університету "КПІ".

Наукові інтереси:

- системи автоматичного керування турбомеханізмами;
- системи автоматичного керування електроприводами;
- мікроконтролерні системи автоматичного керування.

Тел.: 8-044-2418556; 8-096-301-70-90.

E-mail: koi@gala.net

СОКОЛОВСЬКИЙ Олег Феліксівич – завідувач відділення електрифікації та автоматизації сільського господарства Житомирського агротехнічного коледжу.

Наукові інтереси:

- енергозбереження в системах автоматизованого електропривода;
- дослідження електромеханічних систем автоматичного керування насосними установками.

Тел.: 8-0412-259549; 8-097-578-77-54.

E-mail: of@ukr.net

Подано 24.10.2008

Попович Н.Г., Киселичник О.И., Соколовский О.Ф. Особенности регулирования в насосных установках

Попович М.Г., Киселичник О.И., Соколовський О.Ф. Особливості інтерактивного керування в насосних установках

Popovich M.G., Kiselychnyk O.I., Sokolovsky O.F. Features of interactive control of pump installations.

УДК 621.34-52

Особенности регулирования в насосных установках / Н.Г. Попович, О.И. Киселичник, О.Ф. Соколовский

Разработана математическая модель интерактивной системы автоматического управления насосной установкой при смешанном соединении агрегатов. Получено закон регулирования частоты вращения приводного двигателя с учетом влияния регулируемого и нерегулируемого агрегатов на обеспечение напора установки. Получено выражение для предельного сопротивления сети, которое определяет границу энергосберегающих свойств алгоритма.

УДК 621.34-52

Features of interactive control of pump installations / M.G. Popovich, O.I. Kiselychnyk, O.F. Sokolovsky

The mathematical model of interactive electromechanical automatic control system of pump installation with mixed connection of aggregates has been developed. The control law of pump driving motor velocity taking mutual influence of controlled and uncontrolled series aggregates producing pump head into account has been proposed. The equation of critical net resistance defining energy saving algorithm validity has been obtained.