

УДК 644.1+004.9:517.9

П. Е. Христо

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ

Аннотация. Выполнен сравнительный анализ переходных режимов насосной установки, предназначенной для подачи воды в резервуар водонапорной башни, для двух случаев – с нерегулируемым и частотно-регулируемым электроприводом. Сделан анализ потребляемой мощности для этих вариантов.

Ключевые слова: центробежный насос, нерегулируемый электропривод, частотно-регулируемый электропривод, энергосбережение, водонапорная башня, резервуар

P. Khristo

RESEARCH OF PUMP OPTIMIZATION POSSIBILITY

Annotation. The comparative analysis of the pump transient behaviors, intended for the serve of water in the water-tower reservoir, is executed, for two cases - with a non-controlled electric drive and frequency-controlled electric drive.

Keywords: chempump, non - controlled electric drive, frequency - controlled electric drive, energy - savings, water - tower, reservoir

П. Є. Христо

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

Анотація. Виконаний порівняльний аналіз перехідних режимів насосної установки, призначеної для подачі води в резервуар водонапірної башти, для двох випадків - з нерегульованим і частотно-регульованим електроприводом. Зроблено аналіз щодо споживаної потужності для цих варіантів.

Ключові слова: відцентровий насос, нерегульований електропривод, частотно-регульований електропривод, енергозбереження, водонапірна башта, резервуар.

Введение. Как известно, в современном мире наряду с непрерывно растущими объемами энергопотребления все более остро встает проблема истощения запасов первичных энергоресурсов. Для преодоления этой проблемы прибегают к поиску новых месторождений полезных ископаемых, а также к использованию альтернативных неисчерпаемых и нетрадиционных источников энергии. К неисчерпаемым источникам энергии, можно, прежде всего, отнести гидроэлектростанции. Однако, на протяжении последнего времени достаточно стремительно развиваются такие направления в отрасли энергетического производства, как солнечные, ветровые, геотермальные и приливные электростанции. Известны электростанции, использующие энергию волн и подводных течений и др. Кроме того, сталкиваясь с проблемой поиска альтернативы источникам энергии, запасы которых ограничены, нельзя не отметить, что весьма важную роль в ее решении играет атомная энергетика. Однако наряду с увеличением количества станций и объемов выработки ими тепло- и электроэнергии существенному снижению дефицита энергоресурсов должно способствовать их разумное, экономически обоснованное потребление, при котором сводятся к минимуму часто и неизбежно возникающие потери энергии. Таким образом, первостепенную важность применительно к перспективным инновационным разработкам в области техники приобретает требование высокой энергетической эффективности, как са-

мого оборудования, так и соответствующих технологических процессов. При этом, конечно, энергосбережение должно достигаться при сохранении всех технических характеристик.

Известно, что в системах водоснабжения экономии электроэнергии, затрачиваемой на транспорт воды по трубопроводам, можно получить, применив регулируемый электропривод насосной установки. При этом в литературных источниках отмечено [5], что заметная экономия электроэнергии возможна в случае, когда в характеристике гидравлической сети, на которую работает насос, динамическая составляющая потерь напора преобладает над статической составляющей, определяемой высотой подачи воды.

Цель работы – провести сравнительный анализ переходных режимов насосной установки, предназначенной для подачи воды в водонапорную башню, если применяется нерегулируемый и частотно-регулируемый электропривод.

Материалы исследований. Прежде всего, обратимся к упрощенной функциональной схеме насосной установки водонапорной башни, которая представлена на рис. 1.

Забор воды осуществляется из источника открытого (различные водоемы) или закрытого (скважины, колодцы) типа через впускной трубопровод, оснащенный фильтром и обратным клапаном. В общем случае уровень между зеркалом воды и осью рабочего колеса насоса h_{p0} , называемый также высотой всасывания, может быть различным, однако эта величина

всегда ограничена некоторым предельным значением по условию безкавитационного режима работы [1, 2, 3]. Для простоты будем полагать, что забор воды осуществляется из открытого водоема (озеро, река), а насос установлен в непосредственной близости от него, тогда величиной высоты всасывания можно пренебречь ввиду ее малости.

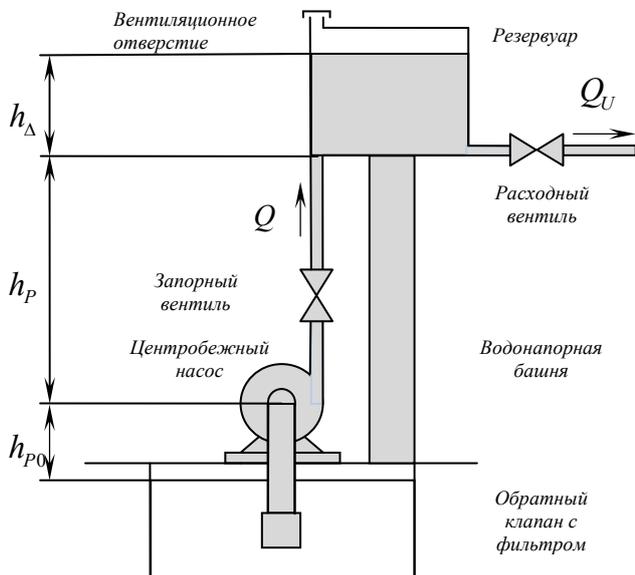


Рис. 1. Упрощенная функциональная схема насосной установки водонапорной башни

Далее вода поступает в центробежный насос, а из него – в нагнетательный или напорный трубопровод, высота которого h_p . По трубопроводу, оснащенному запорным вентилем и нередко также обратным клапаном, вода попадает в накопительную емкость – резервуар.

Количество воды, пребывающей в резервуаре в некоторый момент времени, характеризуется разностью уровней между зеркалом и дном h_Δ или просто уровнем зеркала воды, равным $h = h_\Delta + h_p$. В общем случае он зависит от подачи насосной установки Q и потребительского расхода Q_U , но в данной работе с целью упрощения принято, что $Q_U = 0$.

В верхней части резервуара, как правило, имеется вентиляционное отверстие, поэтому можно считать, что давление воздуха над зеркалом воды равно атмосферному и не оказывает влияния на изменение уровня воды в резервуаре [1,2,3].

В отношении электромеханической части насосной установки примем несколько допущений. Так, будем считать, что в случае нерегулируемого электропривода статический момент на валу двигателя, равный тормозному моменту, развиваемому рабочим колесом насоса, изменяется в пределах рабочего участка механической характеристики АД, где КПД близок к номинальной величине [7]. Статическим падением скорости пренебрежем ввиду его малости [7,8]. Будем также полагать, что в случае частотно-регулируемого электропривода во всем диапазоне регулирования ско-

рости ротора АД, а значит, – и рабочего колеса насоса, КПД двигателя и преобразователя тоже остается близким к номинальной величине [7, 8, 10]. Это предположение зачастую выполняется в случае применения известного закона скалярного управления напряжением и частотой для вентиляторного характера нагрузки [9]. Кроме этого считаем, что механические и, тем более, электромагнитные переходные процессы в обоих случаях не играют существенной роли по сравнению с достаточно медленными переходными процессами наполнения резервуара [7].

Отметим, что при таких допущениях экономия электроэнергии, потребляемой двигателем из сети – в первом случае, или частотным преобразователем – во втором случае может достигаться лишь за счет оптимизации рабочих режимов гидромеханической части насосной установки, то есть центробежного насоса, работающего на гидравлическую сеть.

Для получения общих выражений напора и потребляемой мощности центробежного насоса при произвольной частоте вращения и подаче целесообразно было воспользоваться известными следствиями из законов подобия для лопастных гидравлических машин, называемыми законами пропорциональности [1]. При этом мощность, потребляемая насосом от двигателя, принята равной его внутренней мощности в предположении малости механических потерь в сальниках и подшипниках насоса. Это позволило описать установившийся режим работы центробежного насоса двумя уравнениями, в которые входят коэффициенты полиномиальной аппроксимации кривых напора и потребляемой мощности, построенных в функции подачи при номинальной частоте вращения рабочего колеса [4]. Совместное описание насосной установки вместе с гидравлической сетью [2,3] привело к следующей системе уравнений гидромеханической части объекта управления:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dh^*}{dt} &= \frac{Q}{m_H} \\ h^* &= a_s^* Q^2 + b_H^* n^* Q + n^{*2} \\ N^* &= a_N^* Q^3 + b_N^* n^* Q^2 + c_N^* n^{*2} Q + n^{*3} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $h^* = h / c_H$ – уровень зеркала воды в резервуаре, выраженный в относительных единицах; Q – подача; $N^* = N / d_N$, N – потребляемая мощность насоса, выраженная в относительных и абсолютных единицах; $n^* = n / n_{nom}$, n , n_{nom} – произвольная относительная, абсолютная, а также номинальная частота вращения рабочего колеса; t – время; $m_H = \rho S c_H$ – постоянный коэффициент, имеющий размерность массы, причем ρ – плотность воды; S – площадь поперечного сечения резервуара; $a_s^* = a_H^* - k_p^*$ – коэффициент; $k_p^* = k_p / c_H$, $k_p = A_p h_p$ – коэффициент гидравлического сопротивления трубопровода, выраженный в относительных и абсолютных единицах; A_p – это

удельные потери напора из расчета на единицу длины стального трубопровода с определенным внутренним диаметром и толщиной стенки [6]; h_p – это длина трубопровода; $a_H^* = a_H / c_H$, $b_H^* = b_H / c_H$ – коэффициенты полиномиальной аппроксимации кривой напора, выраженные в относительных единицах при номинальной частоте вращения рабочего колеса; a_H , b_H , c_H – то же, но в абсолютных единицах; $a_N^* = a_N / d_N$, $b_N^* = b_N / d_N$, $c_N^* = c_N / d_N$ – коэффициенты полиномиальной аппроксимации кривой потребляемой мощности при номинальной частоте вращения рабочего колеса, выраженные в относительных единицах; a_N , b_N , c_N , d_N – то же, но в абсолютных единицах.

Если из первого уравнения (1) исключить переменную h^* , то можно записать

$$(2a_s^*Q + b_H^*n^*) \frac{dQ}{dt} + (b_H^*Q + 2n^*) \frac{dn^*}{dt} = \frac{Q}{m_H}. \quad (2)$$

Уравнение (2) позволяет рассчитать переходные процессы наполнения резервуара с заданными граничными условиями (начальный и конечный уровень зеркала воды) как в случае работы с постоянной частотой вращения (нерегулируемый электропривод), так и в случае работы с постоянной подачей (частотно-регулируемый электропривод). При этом целесообразно сначала определить длительность наполнения и среднюю подачу за время процесса с постоянной и номинальной частотой при заданных граничных условиях, а затем, приняв расчетную среднюю подачу постоянной, рассчитать процесс, когда используется электропривод ПЧ-АД. Итак, время процесса наполнения с постоянной частотой вращения рабочего колеса

$$T = m_H \left\{ 2a_s^*(Q_1 - Q_0) + b_H^* \ln \frac{Q_1}{Q_0} \right\}, \quad (3)$$

где граничные значения подачи, если выполняются условия $h_1 < c_H$ и $h_2 < c_H$, определяются

$$Q_0 = -0,5 \left[b_H^* + \sqrt{b_H^{*2} - 4a_s^*(1-h_0^*)} \right] / a_s^*, \quad (4)$$

$$Q_1 = -0,5 \left[b_H^* + \sqrt{b_H^{*2} - 4a_s^*(1-h_1^*)} \right] / a_s^*. \quad (5)$$

Начальную частоту вращения рабочего колеса в случае применения частотно-регулируемого привода можно вычислить по формуле

$$n_0^* = 0,5 \left\{ \sqrt{(b_H^*Q_0)^2 - 4(a_s^*Q_0^2 - h_0^*)} - b_H^*Q_0 \right\}. \quad (6)$$

Для примера оптимизации работы насосной установки взят консольный центробежный насос 1K50-32, номинальные данные и характеристики которого приведены в [4].

Начальный уровень воды в резервуаре принят равным 2,5 м, конечный уровень 7,5 м, высота стального трубопровода и башни 7,065 м, диаметр стального трубопровода 32 мм, диаметр резервуара 5 м.

При таких исходных данных разности уровней между зеркалом и дном резервуара в 5 м соответствует номинальный рабочий режим насосной установки.

На рис. 2 и рис. 3 показаны графики переходных процессов при наполнении резервуара для переменных – разности уровней h_A , а также средней мощности N_{cp} , потребляемой насосом от асинхронного двигателя за время T и рассчитываемой по формуле

$$N_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T N dt. \quad (7)$$

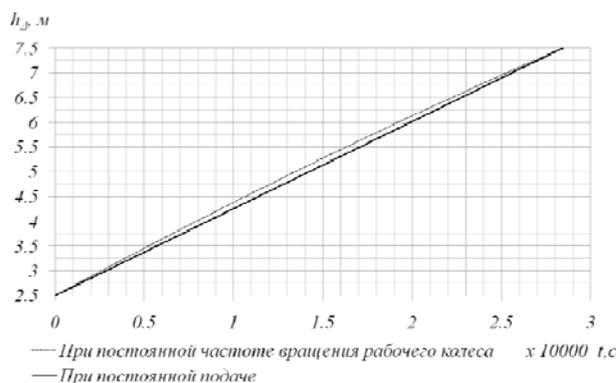


Рис. 2. Зависимость разности уровней между зеркалом воды и дном резервуара от времени наполнения

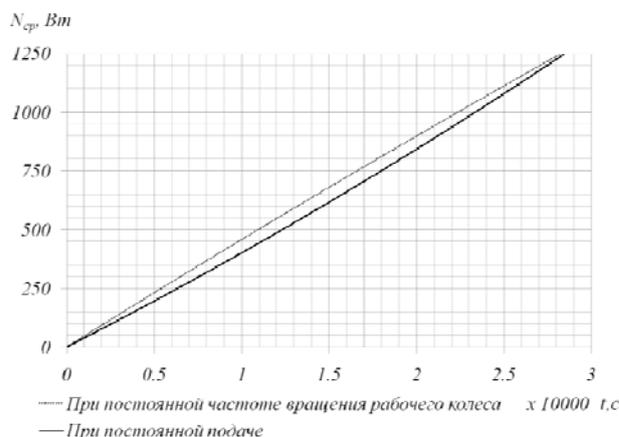


Рис. 3. Зависимость средней потребляемой мощности центробежного насоса от времени наполнения

Выводы. Сравнительный анализ показал, что в рамках принятых технических данных экономия электроэнергии в случае работы насосной установки, оснащенной частотно-регулируемым приводом, незначительна, так как для времени, когда уровни между зеркалом воды и дном резервуара выравниваются (на рис.2 и рис. 3 это отметка 2,8) составляет порядка 1 % и меньше. А это значение соизмеримо с погрешностями расчёта. Поскольку произведение средней мощности на время, за которое она подсчитана, определяет расход электроэнергии, то можно заключить, что по энергопотреблению два рассмотренных способа управления практически равноценны.

Такую «эквивалентность» режимов наполнения резервуара с постоянной частотой вращения и регулируемым электроприводом насосной установки можно объяснить тем, что водонапорные башни в большинстве случаев характеризуются относительно небольшим изменением уровня воды в резервуаре, так что напор, развиваемый насосом при правильном его подборе, как правило, попадает в пределы рабочего участка $H-Q$ характеристики, где КПД насоса мало отличается от номинальной величины [5]. Именно поэтому в данном конкретном случае нецелесообразно применять регулируемый электропривод (в том числе ПЧ-АД).

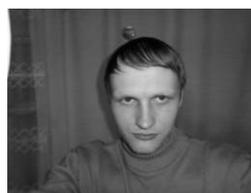
Список использованной литературы

1. Ломакин А. А. Центробежные и осевые насосы. / А. А. Ломакин, Ленинградское отделение изд. Машиностроение, Л. : 1966. – 364 с.
2. Дурнов П. И. Насосы, вентиляторы, компрессоры / П. И. Дурнов. – К.– Одесса : Вища школа, 1985. – 264 с.
3. Абдурашитов С. А. Насосы и компрессоры. / С. А. Абдурашитов, А. А. Тупиченков, М. : Недра, 1974. – 295 с.
4. Насосы центробежные консольные типа 1К и агрегаты электронасосные на их основе. Руководство по эксплуатации N49.899.00.000 РЭ / Открытое Акционерное Общество «ЛИВГИДРОМАШ», г. Ливны, 2002. – 20 с.
5. Погружные скважинные насосы типа ЭЦВ. Каталог продукции. / Открытое акционерное общество «Группа ГМС», 2012. – 109 с.
6. Богословский В. Н. Справочник проектировщика. Внутренние Санитарно-технические устройства / В. Н. Богословский, С. Ф. Копьев; под ред. канд. техн. наук И. Г. Старовойтова. Ч. 1. Отопление, водопровод, канализация. – М. : Стройиздат, 1975. – 429 с.
7. Ключев В. И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. / В. И. Ключев – М. : Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
8. Ковчин С. А. Теория электропривода: Учебник для вузов / С. А. Ковчин, Ю. А. Сабинин. – СПб. : Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отд-ние, 1994. – 496 с.
9. Соколовский Г. Г. Теория и системы электропривода (электроприводы переменного тока) : учеб. пособие / Г. Г. Соколовский. – СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1999. – 80 с.
10. Справочник по автоматизированному электроприводу; под ред. В. А. Елисеева и А. В. Шинянского. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
2. Durnov P.I. Nasosy, ventilyatory, kompressory, [Pumps, Fans, Compressors], (1985), Kiev-Odessa, Ukraine, *Vishcha Shkola*, 264 p. (In Russian)
3. Abdurashitov S.A., and Tupichenkov A.A. Nasosy i kompressory. [Pumps and Compressors], (1974), Moscow, Russian Federation, *Nedra*, 295 p. (In Russian).
4. Nasosy tsentrobezhnye konsol'nye tipa 1K i agregaty elektronasosnye na ikh osnove. Rukovodstvo po ekspluatatsii N49.899.00.000 RE, [The Cantilever Centrifugal Pumps of 1K type and Electric Pump Units on their Basis. Manual N UG], (2002), *Otkrytoe Aktsionernoe Obshchestvo "LIVGIDROMASH"*, Livny, Ukraine, 20 p. (In Russian).
5. Pogruzhnye skvazhinnye nasosy tipa ETsV. Katalog produktsii [Submersible Borehole Pumps ECV. Product Catalogue], (2012), *Otkrytoe Aktsionernoe Obshchestvo "Gruppa GMS"*, 109 p. (In Russian).
6. Bogoslovskii V.N., and Kop'ev S.F. Spravochnik proektirovshchika. Vnutrennie Sanitarno-tekhicheskie ustroistva, [Reference Book of the Designer. Internal Sanitary-engineering Devices], (1975), Pod red. kand. tekhn. nauk I.G. Staroverova. *Ch. 1. Otoplenie, Vodoprovod, Kanalizatsiya*. Moscow, Russian Federation, *Stroiizdat*, 429 p. (In Russian).
7. Klyuchev V.I. Teoriya elektroprivoda: Ucheb. dlya vuzov. – 2-e izd. pererab. i dop. [Theory of Electric Drive: Textbook. for Universities. - 2-e Izd. Rev. and add], (2001), Moscow, Russian Federation, *Energoatomizdat*, 704 p. (In Russian).
8. Kovchin S.A., Sabinin Yu.A. Teoriya elektroprivoda: Uchebnik dlya vuzov, [Theory of Electric Drive: the Textbook for High Schools], (1994), Sanktpeterburg, Russian Federation, *Energoatomizdat. Sankt-Peterburgskoe Otd-nie*, 496 p. (In Russian).
9. Sokolovskii G.G. Teoriya i sistemy elektroprivoda (elektroprivody peremennogo toka) : ucheb. Posobie, [Theory and Systems of the Electric Drive (AC Drives): Textbook. Manual], (1999), Sanktpeterburg, Russian Federation, *Izd-vo SPbGETU "LET"*, 80 p. (In Russian).
10. Spravochnik po avtomatizirovannomu elektroprivodu [Handbook of Automated Electronic-Toprivate] (1983), pod red. V.A. Eliseeva i A.V. Shinyanskogo. Moscow, Russian Federation, *Energoatomizdat*, 616 p. (In Russian).

Получено 17.07.2014

References

1. Lomakin A.A. Tsentrobezhnye i osevye nasosy Tsentrobezhnye i osevye nasosy, [Centrifugal and Axial us], (1966), *Leningradskoe Otdelenie Izd. Mashinostroenie*, Leningrad, Russian Federation, 364 p. (In Russian).



Христо Павел Евгеньевич, ассистент каф. электромеханических систем с компьютерным управлением Одесского нац. политехн. ун-та.
Тел.: 0970090177