

ГЕОЭКОЛОГИЯ

GEOECOLOGY

УДК 628.3(0.75.8)

И. В. Войтов, В. Л. Еловик

Белорусский государственный технологический университет

КРИТЕРИИ СТАБИЛЬНОЙ И ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ

Представлены результаты разработки критериев, обеспечивающих стабильную работу насосного оборудования с РЭП во всем требуемом диапазоне подач. Анализ результатов теоретических исследований режимов работы насосных станций, оборудованных РЭП, показывает, что внедрение регулируемого привода усложняет процесс расчета и подбора насосного оборудования, поскольку с изменением частоты вращения рабочего колеса диапазон возможных режимов работы насоса расширяется. При этом не исключается работа насоса в недопустимых режимах вне рабочей зоны, даже если при номинальном режиме все условия соблюдались. Кроме того, при подборе частотно-регулируемого насосного оборудования достаточно сложно рассчитать объем энергопотребления за расчетный период эксплуатации.

Ключевые слова: энергоэффективность, частотно-регулируемый привод, водопроводно-канализационное хозяйство, насосный агрегат, скважина, погружной насос, регулирующая емкость, комбинированная система водоснабжения.

Для цитирования: Войтов И. В., Еловик В. Л. Критерии стабильной и эффективной работы насосного оборудования с частотно-регулируемым приводом // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2021. № 1 (241). С. 197–204.

I. V. Voitau, V. L. Yalovik

Belarusian State Technological University

CRITERIA FOR STABLE AND EFFICIENT OPERATION OF PUMPING EQUIPMENT WITH A FREQUENCY CONTROL DRIVE

The results of the development of criteria are presented to ensure the stable operation of pumping equipment with a REB in the entire required range of flows. The analysis of the results of theoretical studies of the operating modes of pumping stations equipped with electronic devices shows that the introduction of a variable drive complicates the process of calculating and selecting pumping equipment, since with a change in the impeller speed, the range of possible pump operating modes expands. This does not exclude the operation of the pump in unacceptable modes outside the working area, even if all conditions were met at the nominal mode. In addition, when selecting variable frequency pumping equipment, it is quite difficult to calculate the amount of energy consumption for the estimated period of operation.

Key words: energy efficiency, variable frequency drive, water and sewage utilities, pumping unit, well, submersible pump, regulating storage, combined water supply system.

For citation: Voitau I. V., Yalovik V. L. Criteria for stable and efficient operation of pumping equipment with a frequency control drive. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2021, no. 1 (241), pp. 197–204 (In Russian).

Введение. Насосное оборудование является, по сути, центром системы подачи и распределения воды (СПРВ) и основным потребителем электроэнергии, обеспечивая подачу воды

потребителю в требуемом объеме и с требуемым напором. Ввиду этого обоснованный подбор насосного оборудования (с РЭП или без него) является важнейшей задачей при проек-

тировании СПРВ. Как показывает практика, используя стандартные методы подбора насосов для одной и той же системы, возможно подобрать множество равноценных, на первый взгляд, вариантов насосных станций. Лишь немногие опытные проектировщики способны выделить из этого множества действительно подходящие варианты для дальнейшего рассмотрения, но и они не застрахованы от ошибок. При этом, несмотря на то что сегодня существует большое количество программного обеспечения, позволяющего автоматизировано подбирать насосное оборудование, каждый предложенный программой вариант проектировщик должен анализировать «вручную», опираясь на свой опыт и квалификацию. Это усложняет задачу вариантного проектирования, вынуждая специалиста рассматривать минимальное количество случайно выбранных вариантов.

Поэтому существует острая необходимость в разработке критериев и условий, позволяющих обоснованно подбирать варианты насосного оборудования, заведомо удовлетворяющие технико-экономическим показателям. Это даст возможность осуществлять вариантное проектирование с детальным анализом нескольких конкурентоспособных вариантов насосного оборудования. Кроме того, выраженные в аналитическом виде критерии подбора насосного оборудования по заданным технико-экономическим показателям позволят задействовать в обработке исходных данных вычислительную технику, разработав соответствующее программное обеспечение

Основная часть. Производители насосного оборудования гарантируют стабильную работу насосов только в пределах рабочей зоны, указанной в технических паспортах. Придерживаться данных рекомендаций несложно при работе насоса в номинальных режимах с постоянной частотой вращения рабочего колеса. С изменением частоты вращения рабочего колеса насоса изменяются не только его технические характеристики, но и границы рабочей зоны. А если насос работает в группе параллельно с другими насосами, то данные изменения еще более значительны. Если не учитывать данный факт при подборе насосного оборудования, то в результате возможного возникновения нестабильных режимов работы снизится надежность и эффективность всей СПРВ.

Ниже приведены результаты исследования условий, при которых соблюдаются границы рабочей зоны (области) во всем диапазоне регулирования. Использование приведенных ниже результатов позволит обеспечивать стабильную работу насосного оборудования во

всем диапазоне водопотребления рассматриваемой СПРВ.

При рассмотрении режимов работы частотно-регулируемых насосов принято считать, что режимная точка перемещается по характеристике системы распределения воды. Это абсолютно верно при рассмотрении режимов работы одного насоса или режимов суммарной работы двух нерегулируемых насосов на СПРВ. Но при анализе работы одного регулируемого насоса параллельно с несколькими нерегулируемыми насосами этого недостаточного для полного отображения режимов работы.

Проанализируем параллельную работу трех насосов (рис. 1): частотно-регулируемого I и двух нерегулируемых другого типа II. Диапазон подач от Q_{\min} до Q_B обеспечивается за счет работы одного регулируемого насоса I в диапазоне частот от n_A до n_n . При этом режимные точки будут перемещаться по характеристике системы в пределах от A до B.

При повышении водопотребления больше значения Q_B в работу включается первый нерегулируемый насос II. При этом частота регулируемого насоса снизится до n_E , а режимная точка займет положение E. С увеличением водопотребления частота регулируемого насоса будет увеличиваться, пока не достигнет номинального значения n_n , при этом режимная точка регулируемого насоса займет положение F, а суммарная подача двух насосов составит Q_C . Таким образом, перемещение режимной точки регулируемого насоса I будет происходить по траектории E–F. При работе трех насосов I+II+III режимная точка регулируемого насоса будет перемещаться по траектории G–K соответственно.

Линии перемещения режимных точек частотно-регулируемого насоса представляют собой *режимные характеристики*. Они характеризуют изменение режимов работы регулируемого насосного оборудования во всем диапазоне рабочих частот вращения рабочего колеса при любом количестве параллельно работающих насосных агрегатов.

Режимная характеристика работы одного частотно-регулируемого насоса A–B (рис. 1) описывается уравнением характеристики системы на участке от A до B.

Уравнения характеристик E–F и G–K в общем виде можно выразить так:

$$Q^i = f_{\text{тр}}(H_{\text{тр}}) - \sum f_n^i(H_{\text{тр}}), \quad (1)$$

где $f_{\text{тр}}(H_{\text{тр}})$ – характеристика системы водоводов, выраженная через $H_{\text{тр}}$; $f_n^i(H_{\text{тр}})$ – характеристика i -го насоса, работающего параллельно с регулируемым, выраженная через $H_{\text{тр}}$.

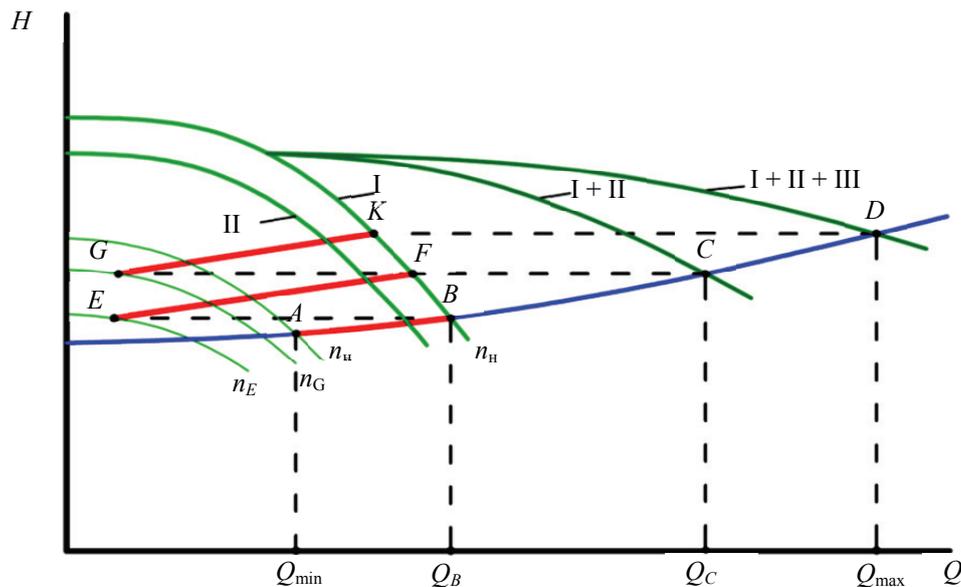


Рис. 1. Определение режимных характеристик режимного насоса при параллельной работе трех насосов

При параллельной работе двух частотно-регулируемых насосов и i -го количества нерегулируемых насосов режимную характеристику можно описать выражением (2):

$$Q^i = \frac{1}{2} \left[f_{\text{тр}}(H_{\text{тр}}) - \sum f_{\text{н}}^i(H_{\text{тр}}) \right] \quad (2)$$

при условии, что регулируемые насосы будут работать с синхронной частотой. Как видно, режимная характеристика напрямую зависит от способа регулирования, количества регулируемых и нерегулируемых насосов, работающих параллельно.

При помощи режимных характеристик просто и удобно определить все возможные режимы работы частотно-регулируемого насоса во всей области регулирования и при любом количестве параллельно работающих насосов и установить соответствие рабочих режимов допустимым.

Нахождение режимной характеристики в пределах рабочей зоны рассматриваемого насоса гарантирует работу оборудования в допустимых режимах.

Как уже говорилось выше, не во всех режимах возможна совместная работа насосного оборудования с РЭП, отвечающая всем требованиям надежности и эффективности транспортирования воды. В первую очередь это касается режимов работы параллельно работающих однотипных насосов.

Совместная работа однотипных насосов, один из которых оборудован РЭП, не может обеспечить эффективной и стабильной работы во всем диапазоне водопотребления при стан-

дартном алгоритме включения/выключения насосов. Применение однотипных насосов совместно с РЭП требует разработки специальных мероприятий и алгоритмов автоматизации работы насосной станции.

Одним из выходов является установка РЭП на двух насосах. Это упростит алгоритм управления, обеспечит работу насосов в пределах рабочей области, но значительно повысит капитальные затраты на установку второго РЭП. Также возможно организовать управление двумя насосными агрегатами одним преобразователем частоты тока (ПЧТ) через функцию «подхвата». Данное мероприятие хоть и несколько снижает капитальные затраты, но усложняет алгоритм управления насосным оборудованием. Отсюда можно сделать вывод, что одним из факторов достижения оптимальных технико-экономических показателей работы насосного оборудования является использование разнотипных насосов. Особенно это актуально при использовании РЭП на одном из насосных агрегатов, поскольку позволяет избежать работы насосного оборудования в недопустимых режимах, о чем уже говорилось выше. Но для обеспечения стабильной работы насосного оборудования необходимо, чтобы насосы, работающие параллельно, были достаточно разнотипными и обеспечивали стабильные режимы работы оборудования во всем диапазоне подачи. Введем понятие *степени разнотипности* τ , характеризующее, насколько рассматриваемые насосы отличны друг от друга по производительности при работе в составе рассматриваемой СПРВ.

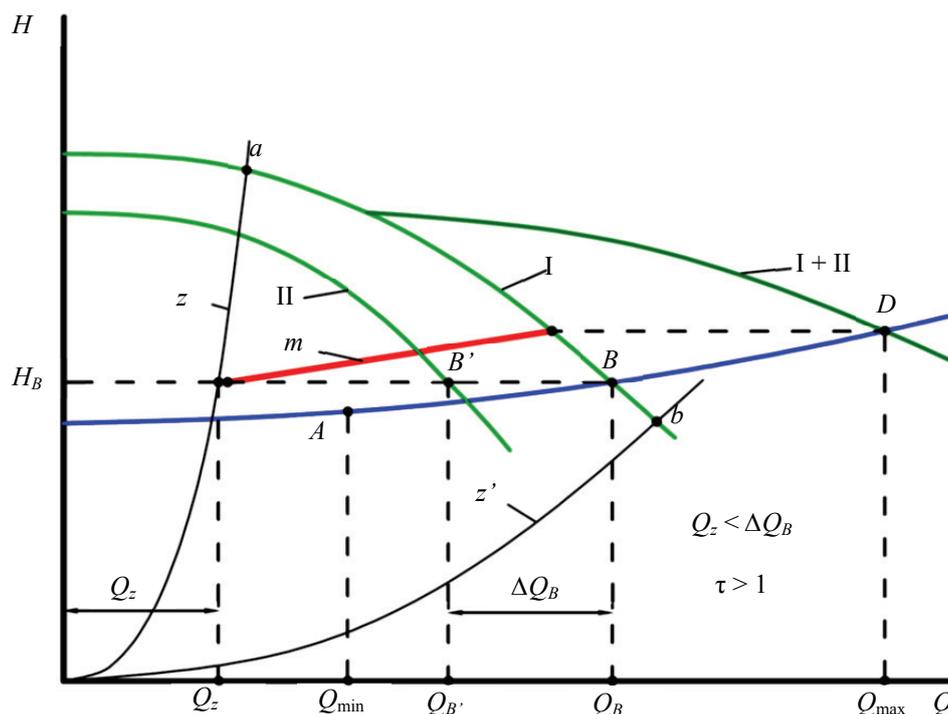


Рис. 2. Определение степени разнотипности насосов:
 I – частотно-регулируемый насос; II – нерегулируемый насос;
 m – режимная характеристика

Степень разнотипности можно определить отношением

$$\tau = \frac{Q_B - Q'_B}{Q_z}, \quad (3)$$

где Q_B – номинальная подача регулируемого насоса, работающего на рассматриваемую систему распределения воды; Q'_B – подача нерегулируемого насоса при напоре H_B ; Q_z – подача насоса на границе рабочей области при напоре H_B (рис. 2). При этом можно отметить следующее:

- если $\tau \geq 1$, то работа регулируемого насоса гарантирована в пределах рабочей области;
- если $\tau < 1$, то после включения в работу нерегулируемого насоса регулируемый некоторое время будет работать за пределами рабочей зоны.

Соблюдение условия $\tau \geq 1$ гарантирует нахождение режимной характеристики в пределах рабочей зоны насоса и соответственно работу оборудования в допустимых режимах.

Степень разнотипности – величина относительная и зависит не только от типа напорных характеристик рассматриваемых насосов, но и от эквивалентной характеристики системы распределения воды.

Используя понятие степени разнотипности и режимной характеристики насосов, становится возможным еще на стадии подбора оборудо-

вания обеспечить стабильные режимы работы во всем диапазоне подач.

Рассмотрим условия энергоэффективной работы насосного оборудования во всем диапазоне водопотребления. Невозможно так подобрать насос, чтобы он одинаково эффективно подавал воду во всем диапазоне водопотребления. Диапазон водопотребления колеблется в широких пределах и, как уже отмечалось выше, соотношения минимальных и максимальных расходов в сети могут достигать значений 1 : 5 – 1 : 7, а точка максимального КПД насоса (оптимальная режимная точка) только одна. Ввиду этого необходимо решить вопрос: какому значению водопотребления должна соответствовать оптимальная режимная точка насоса и при каких режимах работы?

Как уже было отмечено некоторыми исследователями [1, 2], вполне логично было бы обеспечить работу насоса в зоне максимальных КПД наиболее продолжительное время. Однако способов определения наиболее продолжительных режимов работы насоса и соотношения их с оптимальными режимами не предлагалось.

По мнению авторов статьи, самый продолжительный диапазон водопотребления можно наиболее просто определить исходя из анализа обеспеченности водопотребления. В работе Старинского В. П. [3] рассмотрены методы

расчета обеспеченности и вероятности возникновения водопотребления. Используя последний параметр, при подборе насосного оборудования можно оценить то, насколько оптимальная режимная точка насоса соответствует наиболее вероятному, а следовательно, и наиболее продолжительному режиму водопотребления.

Таким образом, для обеспечения работы насоса с максимальными КПД наиболее продолжительное время:

$$Q_{\text{опт}} \rightarrow Q_{pm}; \tag{4}$$

$$Q_p < Q_B, \tag{5}$$

где $Q_{\text{опт}}$ – подача насоса в точке максимального КПД η_{max} ; Q_{pm} – наиболее вероятное значение водопотребления; Q_p – расчетная подача насоса, соответствующая максимальному водопотреблению Q_{max} ; Q_B – подача на правой границе рабочей зоны (рис. 3).

При использовании частотного регулирования, принимая во внимание принципы подобия режимов работы насосов, при изменении частоты вращения рабочего колеса условие (4) примет вид (рис. 4):

$$Q_{\text{опт}}(n_{pm}/n_n) \rightarrow Q_{pm}; \tag{6}$$

$$Q_p < Q_b, \tag{7}$$

где n_{pm} – частота вращения рабочего колеса при подаче Q_{pm} ; n_n – номинальная частота вращения рабочего колеса; Q_b – подача на правой границе рабочей зоны (рис. 4).

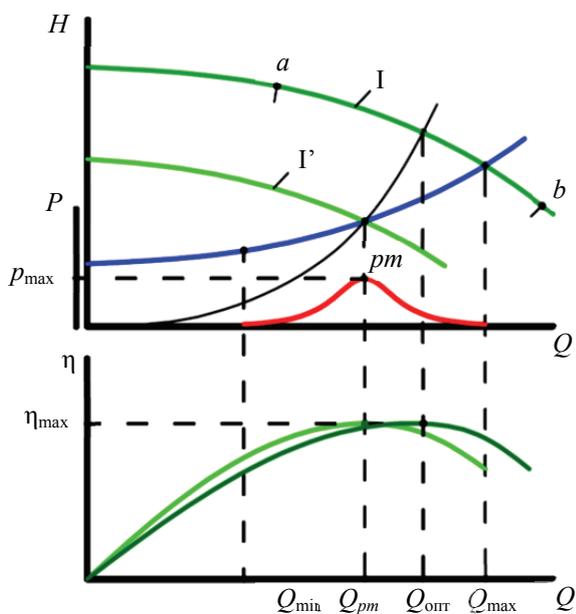


Рис. 4. Критерий эффективной работы регулируемого насоса:

I – характеристика насоса при номинальной частоте;
 Г' – характеристика насоса при частоте n' , соответствующей наиболее вероятной подаче Q_{pm}

Соблюдая вышеперечисленные условия, можно при выборе насосного оборудования выбрать такой насос, который максимально возможное время будет работать в режимах, близких к оптимальному.

Но при этом не стоит забывать, что условия (4) и (5) носят приблизительный характер и предназначены скорее не для выбора самого подходящего варианта, а для отсеивания заведомо неподходящих. Поэтому конкурирующие по условиям (4), (5) или (6), (7) варианты должны подвергаться более подробному анализу и технико-экономическому расчету.

Следует отметить, что вероятность возникновения водопотребления p определяется путем дифференцирования уравнения кривой обеспеченности [3]. Исходя из анализа кривых обеспеченности, можно увидеть, что наиболее вероятное водопотребление (для всех значений C_v) наблюдается в районе среднего водопотребления (при $M \approx 1$). Поскольку рассматриваемые в данном разделе критерии носят оценочный характер, то в первом приближении справедлива будет принять, что $Q_{pm} = Q_{\text{ср}}$. Тогда условия (4) и (6) можно выразить в виде:

$$Q_{\text{опт}} \rightarrow Q_{\text{ср}}; \tag{8}$$

$$Q_{\text{опт}}(n_{pm}/n_n) \rightarrow Q_{\text{ср}}. \tag{9}$$

Рассмотрим влияние режимов работы центробежного насоса с восходящей характеристикой на систему распределения воды при частотном регулировании (рис. 5).

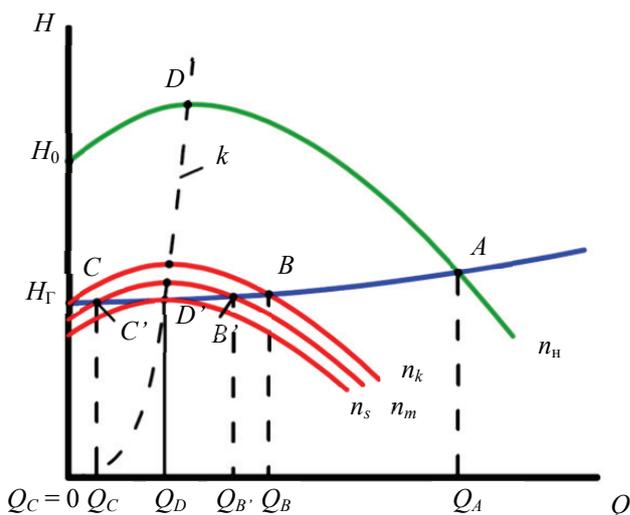


Рис. 5. Границы неустановившихся режимов работы насосного оборудования

Одним из обязательных требований стабильной и эффективной работы насосного оборудования является его работа в пределах ра-

бочих зон / областей во всем диапазоне водопотребления от Q_{\min} до Q_{\max} . Работа насоса вне рабочих областей приводит к снижению надежности работы всей СПРВ в результате:

- работы насоса в неустановившихся режимах;
- кавитации;
- перегрузки электродвигателя насоса.

Кроме того, работа насосов за пределами рабочей зоны ведет за собой нерациональный расход энергии в виду низких КПД.

При подборе нерегулируемых насосов не возникает проблем с определением границ опасных зон – все необходимые для этого характеристики приведены в паспорте насоса. Сложнее задача обстоит при выборе регулируемого насоса, так как паспортные характеристики не позволяют проанализировать работу насосного агрегата с переменной частотой. В этом случае для предотвращения выхода насоса за пределы установленной заводом-изготовителем рабочей зоны необходимо произвести проверку вариантов насосного оборудования, удовлетворяющих условиям настоящей методики, на соответствие нижеприведенным граничным условиям.

Работа насоса в неустановившихся режимах возможна:

а) если он имеет восходящий участок напорной характеристики;

б) если возможны режимы работы насоса на восходящем участке характеристики, что проверяется нижеследующими условиями.

Если рассматривается одиночно работающий насос (рис. 5), то выполняется условие

$$H_r < H_0 \left(\frac{n_p}{n_H} \right)^2; \quad n_p > n_k. \quad (10)$$

Как показывает практика и анализ характеристик различных центробежных насосов, величина Q_B , как правило, меньше минимального водопотребления Q_{\min} . Следовательно, вероятность того, что возникнет необходимость работы с частотой меньше n_k , невелика.

Теперь рассмотрим режимы параллельной работы двух насосов с восходящей характеристикой, один из которых – частотно-регулируемый (рис. 6).

Следуя логике рассуждения как в предыдущем случае, очевидно, что при работе регулируемого насоса с частотой вращения рабочего колеса ниже n' параллельно с нерегулируемым насосом будут иметь место неустановившиеся режимы работы.

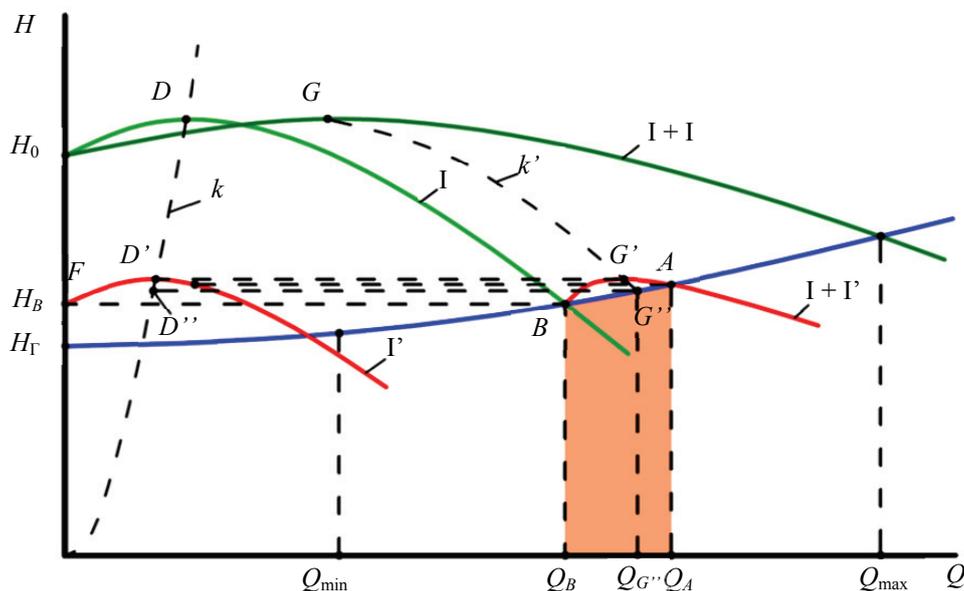


Рис. 6. Границы неустановившихся режимов параллельной работы насосного оборудования:

- I – характеристика насоса при номинальной частоте;
- $I + I$ – суммарная характеристика работы двух насосов при номинальной частоте;
- I' – характеристика насоса при частоте n' ;
- $I + I'$ – суммарная характеристика работы регулируемого с частотой n' и нерегулируемого насоса;
- k – линия перемещения точки максимального напора регулируемого насоса;
- k' – линия перемещения точки максимального напора суммарной характеристики регулируемого и нерегулируемого насосов

При этом диапазон подач $Q_B - Q_A$ рассматриваемое насосное оборудование изменением частоты вращения рабочего колеса обеспечить не сможет без привлечения других методов регулирования (например, дросселирования). Возможность возникновения неуставившихся режимов должна исключаться, если соблюдается условие (11):

$$H_B < H_0 \left(\frac{n_p}{n_H} \right)^2; \quad n_p > n'. \quad (11)$$

где H_B – напор, развиваемый одним нерегулируемым насосом при работе на распределительную сеть.

Очевидно, что выполнение условия (11) невозможно при параллельной работе однотипных насосов, один из которых частотно-регулируемый. Использование других методов регулирования для обеспечения диапазона подач $Q_B - Q_A$ (рис. 6) не является целесообразным, так как значительно усложняет систему автоматики и алгоритм управления. Наиболее целесообразным приемом, позволяющим решить данную проблему, является применение разнотипных насосов.

Рассмотрим принципы подбора насосного оборудования и выбора конкурентоспособных вариантов. Подбор насосного оборудования должен производиться на основании результатов гидравлического расчета распределительной сети, в результате которого должны быть найдены граничные режимы водопотребления: $Q_{\min} - H_{\min}$ и $Q_{\max} - H_{\max}$ – определяющие границы работы насосного оборудования. Кроме того, в результате гидравлического расчета должна быть определена эквивалентная характеристика сети. Это достаточный набор данных для обычного подбора насосного оборудования, но недостаточный для обоснованного выбора конкурентоспособных вариантов для технико-экономических расчетов.

На основании сказанного в начале статьи можно дать следующие рекомендации для подбора насосного оборудования с РЭП:

– должна быть обеспечена работа насосного оборудования в зоне максимальных КПД наиболее продолжительное время. Для достижения этого подбор насосного оборудования должен производиться с учетом условий (6) и (7) или (8) и (9). При этом, помимо выполнения самих условий, необходимо учитывать и абсолютные значения КПД рассматриваемых насосов. Исходя из ограниченности номенклатуры насосов, вполне логично было бы выбирать для дальнейшего рассмотрения варианты, в которых режимной точке наиболее вероятного водопотребления Q_{pm} будут соответствовать ре-

жимы с наибольшим абсолютным значением КПД;

– в случае необходимости подбора нескольких параллельно работающих насосов для обеспечения стабильной и эффективной работы важно соблюдать следующие условия:

а) невозможна стабильная и эффективная параллельная работа группы однотипных насосов, если один из них оборудован РЭП. Поэтому должен осуществляться подбор разнотипных насосов и таким образом, чтобы РЭП был оборудован «большим» насосом. Нерегулируемые «меньшие насосы» при этом могут быть однотипными. Достаточная степень разнотипности определяется исходя из условия (3);

б) при невозможности оборудования насосной станции разнотипными насосными агрегатами РЭП должны быть оборудованы два однотипных насоса;

в) при параллельной работе насосов если значение водопотребления Q_{pm} обеспечивает несколько работающих насосов с фактическим напором H_{pm} , то соответствие данного варианта требованиям энергоэффективности следует определять по суммарному КПД работающих насосов:

$$\eta \Sigma = \frac{Q_{pm}}{\sum \frac{Q_i}{\eta_i}}, \quad (12)$$

где Q_i и η_i – подача и КПД i -го работающего насоса при напоре H_{pm} .

Стоимостью насосного оборудования на данной стадии можно пренебречь, так как доля капитальных затрат в структуре общих затрат на эксплуатацию насоса, как показывает практика [4], не превышает 10% и при этом постоянно снижается с ростом срока эксплуатации.

Руководствуясь вышеизложенными рассуждениями, можно определить конечное количество конкурентоспособных вариантов еще на стадии подбора насосного оборудования. Выбор наиболее подходящего варианта должен производиться на основании детального анализа и ТЭО.

Заключение. Анализ результатов теоретических исследований режимов работы насосных станций, оборудованных РЭП, показывает, что внедрение регулируемого привода усложняет процесс расчета и подбора насосного оборудования, поскольку с изменением частоты вращения рабочего колеса диапазон возможных режимов работы насоса расширяется. При этом не исключается работа насоса в недопустимых режимах вне рабочей зоны, даже если при номинальном режиме все условия соблюдались. Кроме того, при подборе частотно-регулиру-

руемого насосного оборудования достаточно сложно рассчитать объем энергопотребления за расчетный период эксплуатации.

В результате рассмотрения возможных режимов работы частотнорегулируемого насосного оборудования определены критерии, поз-

воляющие учесть основные ограничивающие факторы. Использование сформулированных критериев при проектировании СПРВ позволит оптимизировать процесс подбора насосного оборудования, сделав выбор конкурентноспособных вариантов намного более обоснованным.

Список литературы

1. Карасев Б. В. Насосы и насосные станции: учеб. для вузов. Минск: Выш. шк., 1990. 325 с.
2. Маккей Р. Низкий расход не означает низкой надежности // Вода. 2005. № 10. С. 14–16.
3. Старинский В. П. Технологические гидравлические и технико-экономические расчеты в водоснабжении: учеб. пособие. Минск: Выш. шк., 1985. 200 с.
4. Березин С. Е. Насосные станции с погружными насосами. Расчет и конструирование. М.: Стройиздат, 2008. 160 с.

References

1. Karasev B. V. *Nasosy i nasosnye stantsii* [Pumps and pumping stations]. Minsk, Vysh. shk. Publ., 1990. 325 p.
2. Mackay R. Low consumption does not mean low reliability. *Voda* [Water], 2005, no. 10, pp. 14–16 (In Russian).
3. Starinsky V. P. *Tehnologicheskie gidravlicheskie i tehniko-ekonomicheskie raschety v vodosnabzenii: uchebnoe posobie* [Technological hydraulic and feasibility study in water supply: study guide]. Minsk, Vysh. shk. Publ., 1985. 200 p.
4. Beresin S. E. *Nasosnye stantsii s pogruzhnymi nasosami. Raschet i konstruirovanie* [Pumping stations with submersible pumps. Calculation and design]. Moscow, Stroizdat Publ., 2008. 160 p.

Информация об авторах

Воитов Игорь Витальевич – доктор технических наук, профессор, ректор. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: voitov@belstu.by

Еловик Валерий Леонидович – аспирант кафедры промышленной экологии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: valery.yalovik@outlook.com

Information about the authors

Voitau Ihar Vitalievich – DSc (Engineering), Professor, Rector. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: voitov@belstu.by

Yalovik Valery Leanidavich – PhD student, the Department of Industrial Ecology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: valery.yalovik@outlook.com

Поступила 15.01.2021