

Автоматизация насосной станции

с применением частотно-регулируемого электропривода

В статье рассмотрены аспекты построения автоматизированных насосных станций с частотно-регулируемым электроприводом.

Владимир Копырин,
к. т. н.

kamen@r66.ru

Евгений Бородацкий,
к. т. н.

info@roselco.ru

Назначение и виды насосных станций

Насосные станции (НС) представляют собой сложный электрогидравлический технический комплекс сооружений и оборудования, в котором осуществляется преобразование электрической энергии в механическую энергию потока жидкости и управление этим процессом преобразования. Основным назначением НС является обеспечение [1–3]:

- требуемого графика подачи жидкости для нормальных и аварийных условий;
- наименьших затрат на сооружение, оснащение и эксплуатацию;
- требуемой степени надежности и, следовательно, определенной степени бесперебойности работы;
- долговечности, соответствующей технологической значимости объектов, в состав которых они входят;
- удобства эксплуатации (широкое применение автоматизации и телемеханики);
- эксплуатации при непрерывно изменяющихся объемах, режимах потребления жидкости и изменяющемся составе потребителей.

Насосные станции находят широкое применение в промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве. Они характеризуются большим разнообразием функций, схем соединения насосов при совместной работе, регулируемых параметров, категории надежности и другими показателями.

В зависимости от назначения можно выделить следующие виды НС: хозяйственно-питьевого водоснабжения населенных пунктов и промышленных предприятий; оборотного водоснабжения промышленных предприятий; канализационные; систем теплоснабжения; дренажные; противопожарного водоснабжения; мелиоративные; нефтеперекачивающие и др.

По способу объединения насосов можно выделить НС с индивидуальной работой насосов и НС с совместной работой насосов. Первый случай характерен для НС с невысокими единичными мощностями насосов и низкими требованиями к надежности работы. Это характерно, например, для дренажных насосов. Совместно работающие насосы находят широкое применение на всех видах НС. При этом для обеспечения требуемых технологических показателей используется параллельное, последовательное и комбинированное соединение установок. Наиболее характерным является параллельное соединение

насосов, применяемое на большинстве типов НС. Последовательное соединение применяется в тех случаях, когда необходимо создать достаточно высокое давление в системе, например, при транспортировке вязких растворов (нефть, ил и др.).

По главному регулируемому параметру НС можно разделить на станции с регулированием давления и станции с регулированием подачи.

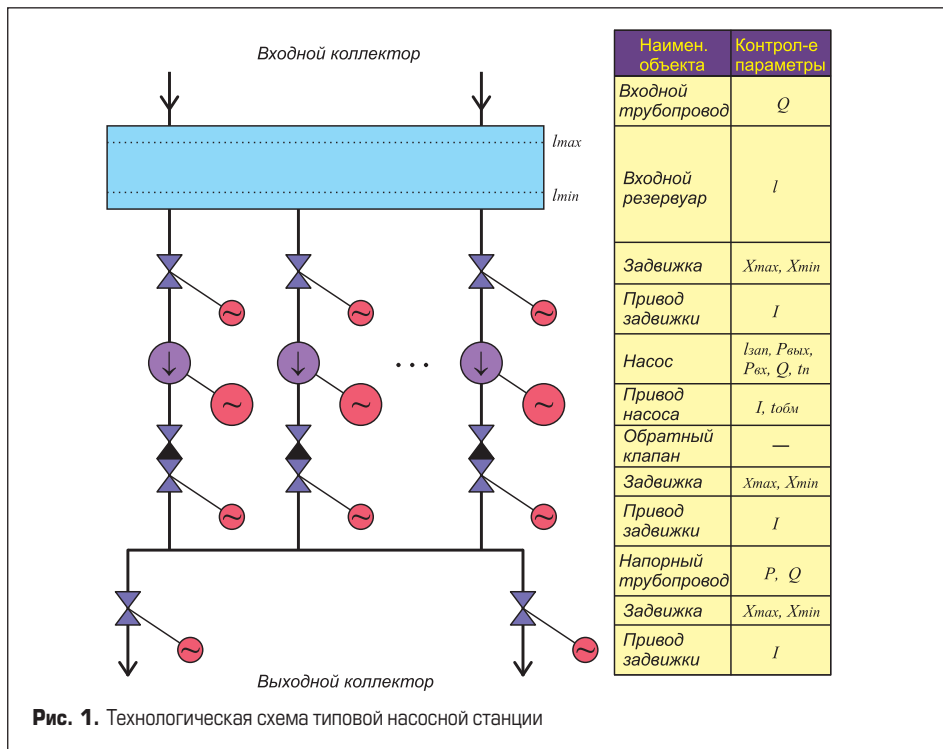
Согласно требованиям к надежности обеспечения подачи транспортируемой жидкости к технологическому объекту НС могут быть отнесены к 1-й, 2-й или 3-й категории.

Среди рассмотренных выше видов НС преимущественное использование получили НС с параллельным соединением насосов, которые применяются в системах водоснабжения и водоотведения населенных пунктов, промышленных предприятий, системах оборотного водоснабжения технологических комплексов производственных объектов, в том числе на предприятиях цветной металлургии и нефтеперерабатывающих заводах [4–11].

На рис. 1 изображена технологическая схема типовой НС. Жидкость поступает во входной коллектор НС и аккумулируется в резервуаре. Из входного резервуара она откачивается насосами, подается в выходной коллектор НС и далее в магистральный трубопровод, откуда и распределяется по потребителям или поступает ко входу следующей НС. Для отделения насоса от трубопровода служат задвижки, размещенные на входном и напорном патрубках насоса. Кроме того, на выходном патрубке насоса установлен обратный клапан, предотвращающий обратный ток жидкости через насос. В качестве приводов насосов и задвижек применяются электрические двигатели. В правой части рис. 1 размещена таблица, в которой для каждого из объектов НС приведен перечень контролируемых параметров. Данный перечень может изменяться в зависимости от назначения НС и мощности насосных установок.

Насосные установки

Основным энергетическим элементом НС является насосная установка, содержащая один или несколько насосов, всасывающую и нагнетательную систему трубопроводов, запорную арматуру, приводной двигатель, а также датчики технологических параметров установки.



В качестве основного силового оборудования на НС применяют объемные или динамические насосы.

Объемные насосы работают по принципу вытеснения, когда давление перемещаемой жидкости повышается в результате сжатия. К ним относятся возвратно-поступательные (диафрагменные, поршневые) и роторные (аксиально-поршневые и радиально-поршневые, шиберные, зубчатые, винтовые и т. п.) насосы.

Динамические насосы работают по принципу силового воздействия на перемещаемую среду. К ним относятся лопастные (центробежные, осевые) нагнетатели и нагнетатели трения (вихревые, дисковые, струйные и т. п.).

Преимущественное использование получили насосы центробежного типа.

Характеристики НС

Основными характеристиками НС являются зависимости выходных подачи и давления жидкости от времени и входной подачи, а также от ряда возмущающих воздействий. Эти зависимости отражают изменение режима работы НС.

Анализ характеристик НС осуществляется на основе ее математической модели [9]. В общем случае для m насосов, соединенных параллельно, уравнения системы имеют вид:

- динамика изменения уровня жидкости в резервуаре

$$S \times dl/dt = Q_{ВХ\Sigma} - Q_{ВЫХ\Sigma} - Q_y(P_{ВЫХ}), \quad (1)$$

где l и S — уровень и площадь поверхности жидкости в резервуаре соответственно; $Q_{ВХ\Sigma}$ и $Q_{ВЫХ\Sigma}$ — результирующие подачи жидкости на входе и выходе НС соответственно; $Q_y(P_{ВЫХ})$ — подача утечек, задаваемая в функции от выходного давления $P_{ВЫХ}$;

- баланс подач жидкости на выходе НС:

$$A \times Q = 0, \quad (2)$$

где $A = [1 \ 1 \ \dots \ 1 \ -1 \ -1]$ — узловая вектор-строка размерностью $m+2$; $Q = [Q_{ЦН1} \ Q_{ЦН2} \ \dots \ Q_{ЦНm} \ Q_{ВЫХ\Sigma} \ Q_y]^T$ — вектор-столбец подач всех элементов, соединяющихся на выходе НС;

- условие равенства давлений на выходе параллельно работающих насосов:

$$B \times P = 0, \quad (3)$$

где B — контурная матрица размерностью $m \times m-1$; $P = [\Delta P_{ЦН1} \ \Delta P_{ЦН2} \ \dots \ \Delta P_{ЦНm}]^T$ — вектор-столбец перепадов давления системы насос-здвижка; 0 — нулевой вектор столбец размерностью $m-1$. Матрица B имеет следующий вид:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Перепад давления на соединенных последовательно насосе и задвижке определяется зависимостью, учитывающей регулирование частоты вращения насоса $\omega_{ЦНi}$ и изменение положения задвижки x_{3i} :

$$\Delta P_{ЦНi} = \Delta P_{ЦНi}(Q_{ЦНi}, \omega_{ЦНi}) - P_{3i}(Q_{ЦНi}, x_{3i}), \quad (5)$$

- баланс напоров жидкости на выходе НС:

$$P_{ВХ}(l) + \Delta P_{ЦНi} = P_{ВЫХ} = P_{СТ} + P_{Г}(Q_{ВЫХ\Sigma}), \quad (6)$$

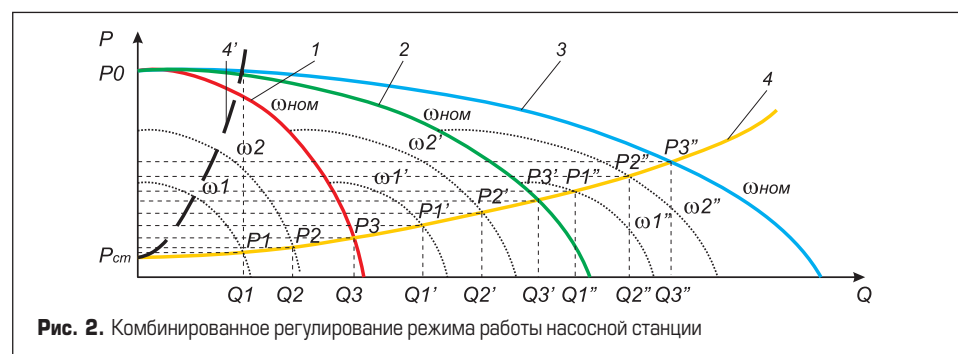
где $P_{ВХ}(l)$ — давление на входе насосов, зависящее от уровня жидкости во входном резервуаре; $P_{СТ}$ и $P_{Г}(Q_{ВЫХ\Sigma})$ — статическое противодавление и динамический перепад давления в гидравлической сети соответственно.

При решении приведенной системы уравнений следует дополнительно выполнять анализ направления подачи через каждый насос. При получении отрицательного значения подачи через насос, уравнения, описывающие гидравлические процессы в нем, исключаются из рассмотрения, и порядок системы m понижается на единицу.

Для получения рационального алгоритма управления НС должен быть выполнен анализ гидравлического режима работы насосного оборудования. Баланс расходов и давлений жидкости для случая трех параллельно работающих насосов описывается математической моделью на основе системы уравнений (1–6). При $m = 3$ после раскрытия матриц получаем следующие уравнения для балансов подач и напоров:

$$\left. \begin{aligned} Q_{ЦН1} + Q_{ЦН2} + Q_{ЦН3} &= Q_{ВЫХ\Sigma} + Q_y(P_{ВЫХ}) \\ \Delta P_{ЦН1} &= \Delta P_{ЦН2} = \Delta P_{ЦН3} = \Delta P_{ЦН} \\ \Delta P_{ЦН1} &= P_{ЦН1}(Q_{ЦН1}, \omega_{ЦН1}) - P_{31}(Q_{ЦН1}, x_{31}) \\ \Delta P_{ЦН2} &= P_{ЦН2}(Q_{ЦН2}, \omega_{ЦН2}) - P_{32}(Q_{ЦН2}, x_{32}) \\ \Delta P_{ЦН3} &= P_{ЦН3}(Q_{ЦН3}, \omega_{ЦН3}) - P_{33}(Q_{ЦН3}, x_{33}) \\ P_{ВХ}(l) + \Delta P_{ЦН} &= P_{ВЫХ} = P_{СТ} + P_{Г}(Q_{ВЫХ\Sigma}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

На рис. 2 показан качественный характер изменения параметров системы из трех насосов, в которой регулируется частота вращения рабочего колеса одного из насосов. Насосы имеют характеристики вида 1, а магистраль — характеристику вида 4. Увеличение подачи и давления производится в следующем порядке. На начальном этапе в работу включается один насос с частотно-регулируемым электроприводом. Для обеспечения подачи $Q1$ его частота вращения увеличивается до значения $\omega1$. Дальнейший рост подачи и давления возможен до величин $Q3$ и $P3$ соответственно. Если необходимо обеспечить дальнейшее увеличение подачи, то происходит переключение питания электродвигателя первого насоса с выхода преобразователя частоты на сеть, а к выходу преобразователя частоты коммутируется электродвигатель второго насоса и частота вращения увеличивается до требуемого значения. Например, для обеспечения подачи и давления $Q2'$ и $P2'$ соответственно частота вращения второго



насоса должна быть увеличена до значения ω_2^1 . Таким образом обеспечивается регулирование параметров НС в области, заключенной между характеристиками 1 и 2. При необходимости дальнейшего увеличения подачи и давления до значений выше Q_3^1 и P_3^1 питание электродвигателя второго насоса переключается с выхода преобразователя частоты на сеть и в работу вводится третий насос, управляемый частотно-регулируемым электроприводом. В этом случае регулирование происходит в области, заключенной между характеристиками 2 и 3.

При снижении подачи и давления коммутация и регулирование частоты вращения электроприводов насосов происходит в обратном порядке.

Рассмотренный способ регулирования режима работы насосной установки обеспечивает плавное и непрерывное изменение подачи и давления жидкости в широком диапазоне изменения значений регулируемых параметров от Q_1 до Q_3^1 и характеристики сети от 4 до 4'.

Регулирование режимов работы насосных установок

Для обеспечения заданного режима работы НС при изменении условий работы требуется производить регулирование режимов работы насосных установок. Эта задача может быть разделена на два направления: регулирование гидравлических режимов работы насосов и регулирование энергетической эффективности работы оборудования НС.

Для насосных установок центробежного типа применяют следующие способы регулирования подачи жидкости и давления:

- дросселированием трубопровода;
- перепуском части потока жидкости из выходного патрубка насоса во входной;
- отключением или подключением насосов (ступенчатое регулирование);
- изменением частоты вращения рабочего колеса насоса.

Дросселирование трубопровода является весьма распространенным способом регулирования давления и подачи жидкости. Регулирующим элементом в этом случае является механическое устройство в виде шибер, дроссель-клапана, задвижки, диафрагмы и т. п., которое располагается на напорном патрубке насоса и за счет своего перемещения изменяет поперечное сечение трубопровода [1].

Несмотря на простоту реализации данного способа регулирования он имеет ряд недостатков. Одним из них является снижение КПД НС, особенно при глубоком регулировании подачи. Это обусловлено тем, что энергия, затраченная на преодоление дополнительного сопротивления регулирующего устройства, преобразуется в тепловые потери, что и определяет низкую энергетическую эффективность данного подхода. Помимо этого, рост давления на выходе насоса при закрытии задвижки приводит к сокращению срока службы уплотнений и запорных устройств, а также к увеличению утечек жидкости через стыки и щели. Другим недостатком этого способа является возможность однозонного регулирования

в сторону уменьшения подачи или напора насосной установки.

Регулирование напора перепуском основано на отведении части потока жидкости с выхода насоса на его вход через отвод с задвижкой. При этом энергия, затрачиваемая на циркуляцию жидкости по холостому кругу, не создает полезной работы, что снижает КПД установки, особенно сильно при глубоком регулировании. Как и в предыдущем методе, подача НС регулируется только в сторону уменьшения.

Ступенчатое регулирование подачи насосной станции осуществляется за счет подключения или отключения насоса или группы насосов. Данный способ характеризуется простотой управления, так как не требует дополнительных регулирующих устройств. Однако он не позволяет обеспечить непрерывное и качественное поддержание напора при изменении потребления жидкости и вызывает частые пуски двигателей, что уменьшает срок работы оборудования и требует строительства промежуточного аккумулирующего резервуара для сглаживания колебаний подачи НС. Кроме того, электродвигатели работают не в оптимальном режиме, что также снижает КПД всей НС.

Указанные особенности обуславливают сокращение НС, на которых применяются рассмотренные выше способы регулирования.

Изменение частоты вращения рабочего колеса насосной установки позволяет осуществить непрерывное регулирование производительности НС с меньшими затратами энергии, чем в предыдущих вариантах [4–11]. Однако оно требует больших затрат на регулирующее оборудование, особенно для установок с мощностью выше средней, и приводит к ухудшению электромагнитной совместимости с питающей сетью. Тем не менее снижающаяся стоимость регулируемых электроприводов делает этот способ наиболее перспективным.

Возможно также сочетание нескольких способов регулирования. Одним из широко применяемых вариантов регулирования является сочетание ступенчатого регулирования с изменением частоты вращения рабочего колеса насосной установки, которое достигается с помощью частотно-регулируемого электропривода. Согласно рекомендациям [2], регулируемым электроприводом следует оборудовать один насосный агрегат в группе из 2–3 рабочих агрегатов.

Для регулирования энергетической эффективности оборудования НС должен быть выбран оптимальный по энергопотреблению режим работы насосов при их совместной работе. Один из путей решения этой задачи приведен в литературе [5–7].

Основные функции автоматической системы регулирования НС

Согласно требованиям СНиП насосные станции всех назначений должны проектироваться, как правило, с управлением без постоянного обслуживающего персонала: автоматическим — в зависимости от технологических параметров (уровня воды в емкостях, давления или расхода воды в сети); дистанционным (телемеханическим) — из пункта

управления; местным — периодически приходящим персоналом с передачей необходимых сигналов на пункт управления или на пункт с постоянным присутствием обслуживающего персонала.

Управление регулируемым электроприводом в основном следует осуществлять автоматически в зависимости от давления в dictующих точках сети, расхода воды, подаваемой в сеть, уровня воды в резервуарах.

В НС следует предусматривать измерение давления в напорных водоводах и у каждого насосного агрегата, расхода воды на напорных водоводах, а также контроль уровня воды в дренажных приемках и вакуум-котле, температуры подшипников агрегатов (при необходимости), аварийного уровня затопления (появления воды в машинном зале на уровне фундаментов электроприводов). При мощности насосного агрегата 100 кВт и более необходимо предусматривать периодическое определение КПД с погрешностью не более 3%.

При автоматическом или дистанционном (телемеханическом) управлении должно предусматриваться также местное управление.

В насосных станциях должна предусматриваться автоматизация следующих вспомогательных процессов: промывки вращающихся сеток по заданной программе, регулируемой по времени или перепаду уровней, откачки дренажных вод по уровням воды в приемке, электроотопления по температуре воздуха в помещении, а также вентиляции.

Структура автоматизированной НС

Упрощенная структурная схема автоматизированной НС с частотно-регулируемым электроприводом приведена на рис. 3.

Электроснабжение НС осуществляется от трансформаторной подстанции ТП. Электроэнергия поступает на распределительное устройство РУ, к которому подключено силовое электрооборудование. Здесь же размещены первичные аппараты для средств учета потребляемой электроэнергии.

Силовое электрооборудование размещено в электрощитовой НС. Оно содержит: силовые шкафы управления СШУ, преобразователь частоты ПЧ и, при необходимости, компенсатор реактивной мощности КРМ. Силовым шкафом управления содержит коммутационный аппарат, с помощью которого осуществляется коммутация питания электродвигателя М центробежного насоса Н либо к выходу ПЧ, либо к секции РУ.

В машзале НС размещено основное и вспомогательное оборудование НС. Основное оборудование включает насосы ЦН1–ЦН3, приводные электродвигатели М1–М3. В состав вспомогательного оборудования входят: дренажные, пожарные, вакуум-насосы; задвижки; вентиляторы; обогреватели и другое оборудование. Управление им производится при помощи исполнительных механизмов ИМ1–ИМп.

Для получения информации о значениях регулируемых параметров служат датчики Д1–Дп.

Сигналы управления и измерительные сигналы от оборудования НС собираются в шкафу управления ШУ. Здесь же происходит их

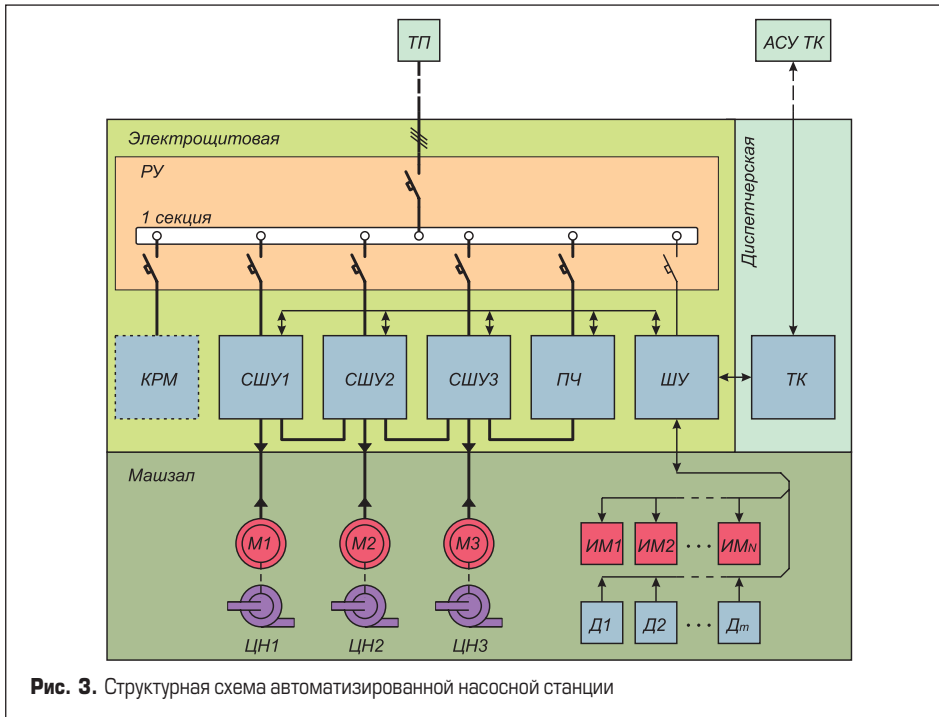


Рис. 3. Структурная схема автоматизированной насосной станции

объединение в одну общую информационную линию связи, которая подключается к технологическому контроллеру ТК.

Технологический контроллер реализует общий алгоритм управления НС и обмен информацией с автоматизированной системой управления технологическим комплексом АСУ ТК. Программное обеспечение ТК содержит ряд функциональных блоков, реализованных на программном уровне:

1. Управление основной насосной установкой.
2. Управление дополнительной насосной установкой, например пожарными насосами.
3. Управление дренажными насосами.
4. Измерение и обработка параметров оборудования НС.
5. Управление отоплением и вентиляцией помещений НС.
6. Осуществление функций охраны от несанкционированного проникновения посторонних лиц на территорию НС.
7. Обслуживание локального терминала.
8. Передача информации о параметрах и режимах работы оборудования НС на АСУ ТК и обработка сигналов управления, получаемых от нее.

Примеры реализации НС с автоматизированным частотно-регулируемым приводом

Рассмотренные в статье принципы построения автоматизированных НС с асинхронным частотно-регулируемым электроприводом могут быть применены на НС различного назначения.

Одним из примеров служит НС системы водооборота глиноземного производства [8–10]. Здесь выполнена работа по модернизации электропривода центробежного насоса мощностью 125 кВт. Преобразователем частоты оснащен один из четырех электроприводов.

Другим примером является автоматизация управления электроприводами насосов мощностью 200 кВт на фекальной насосной стан-

ции нефтеперерабатывающего завода, которая обслуживает непосредственно предприятие и прилегающий к нему жилой микрорайон. На данном объекте предусмотрено оснащение преобразователем частоты двух из четырех электроприводов насосов [11].

В обоих случаях управление электроприводами осуществляется по уровню жидкости в приемном резервуаре. Один из алгоритмов автоматического управления асинхронным частотно-регулируемым электроприводом НС по уровню жидкости в приемном резервуаре приведен на рис. 4. Для установок применен комбинированный способ регулирования подачи за счет изменения частоты вращения и дискретное регулирование расхода путем подключения или отключения насосов.

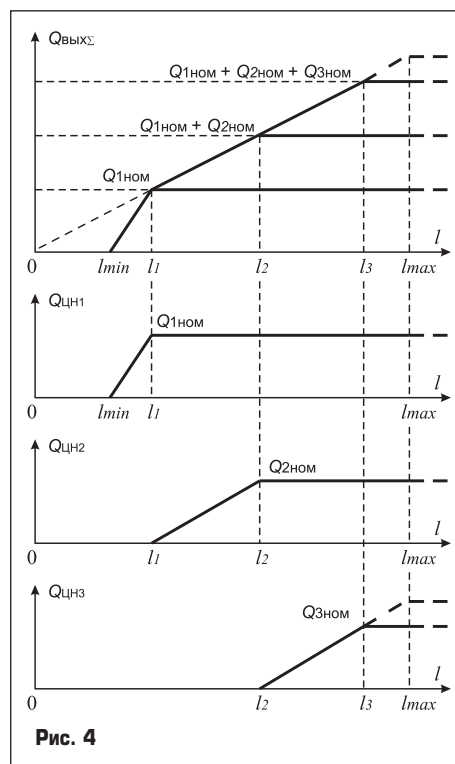


Рис. 4

- Модернизация дала следующие результаты:
- снижено потребление электроэнергии;
 - появилась возможность плавного регулирования частоты вращения насосов в соответствии с требованиями технологического процесса и обеспечения более высокого уровня автоматизации;
 - обеспечен надежный плавный пуск электропривода при токах ниже номинального значения;
 - снижена аварийность питающей сети и механического передаточного оборудования, и, следовательно, увеличен межремонтный период.

Литература

1. Лобачев П. В. Насосы и насосные станции. М.: Стройиздат. 1990.
2. СНиП 2.04.02-84: Насосные станции. Электрооборудование, технологический контроль, автоматизация и системы управления.
3. Попкович Г. С., Гордеев М. А. Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения. М.: Высш. шк. 1986.
4. Справочник электроэнергетики предприятий цветной металлургии / Под ред. М. Я. Басальгина, В. С. Копырина. М.: Металлургия. 1991.
5. Бородацкий Е. Г. Разработка системы управления взаимосвязанным электроприводом центробежных турбомеханизмов станции перекачки жидкости. Автореф. дис... канд. техн. наук. Омск. 1999.
6. Ковалев В. З., Бородацкий Е. Г. Эффективное использование энергии в насосных установках нефтеперекачивающих станций // Промышленная энергетика. 2000. № 1.
7. Ковалев В. З., Мельников В. Ю., Бородацкий Е. Г. Энергосберегающие алгоритмы управления взаимосвязанным электроприводом центробежных турбомеханизмов. Омск: ОмГТУ. 2000.
8. Копырин В. С., Бородацкий Е. Г., Ткачук А. А. Асинхронный частотный электропривод как регулирующий орган насосной станции системы водооборота глиноземного производства. Труды двенадцатой науч.-техн. конф. «Электроприводы переменного тока». Екатеринбург: УГТУ, 2001.
9. Бородацкий Е. Г., Бородацкая В. В., Копырин В. С. Математическая модель насосной станции системы водооборота глиноземного производства. Материалы международной науч.-техн. конф. «Наука и новые технологии в энергетике». Павлодар: ПГУ. 2002.
10. Копырин В. С., Бородацкий Е. Г., Ткачук А. А. Автоматизация насосных установок на алюминиевых заводах. Сб. тез. докл. науч.-техн. конф. «Совершенствование энергетике цветной металлургии». Екатеринбург: АО «Уралэнергоцветмет». 2001.
11. Бакута В. П., Копырин В. С., Бородацкий Е. Г., Ткачук А. А. Модернизация электроприводов технологической фекальной насосной станции Саратовского НПЗ. Материалы научно-практического семинара «Энергосберегающие техника и технологии». Екатеринбург: Уральские Выставки. 2002.