

Анализ электроприводных систем насосных станций и способов повышения их эффективности в технологиях

Р. А. Кахоров¹, М. П. Белов²

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
¹tustam-kahorov-2226@mail.ru, ²milesa58@mail.ru

Аннотация. В докладе дан анализ тенденций развития электроприводных систем многоагрегатных насосных станций, методов повышения эффективности систем в технологиях путем регулирования электромагнитных, механических и технологических переменных; оптимизации процессов управления для достижения оптимальных показателей эффективности систем при произвольном изменении расхода жидкости в напорной магистрали.

Ключевые слова: насосные станции; электроприводные системы; системы управления насосными агрегатами; методы повышения эффективности систем

I. ВВЕДЕНИЕ

Целью доклада является анализ: тенденций развития электроприводных систем (ЭПС) многоагрегатных насосных станций (НС) и типовых средств приводной техники насосного оборудования; показателей и методов повышения эффективности ЭПС НС в технологиях путем регулирования электромагнитных, механических и технологических переменных; оптимизации процессов управления для достижения заданных показателей эффективности систем при произвольном изменении расхода жидкости в магистрали.

II. ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ И ТИПОВЫЕ СРЕДСТВА ЭПС МНОГОАГРЕГАТНЫХ НС

В многоагрегатных насосных станциях применяется параллельное, последовательное и комбинированное включение насосных агрегатов (НА). Конкретная гидравлическая схема устанавливается исходя из выполняемой станцией технологии, технических требований и условий реализации этой технологии. Независимо от принятой схемы на НС применяется групповое управление взаимосвязанными НА с использованием средств ЭПС, при котором стремятся обеспечить максимальную эффективность станции и решать задачи:

- Оценки энергозатрат и обеспечение оптимальных решений по их минимизации.

- Обеспечение заданных статических и динамических значений давлений при произвольном изменении расхода жидкости в напорной магистрали.
- Исключение при выполнении заданной технологии аномальных явлений в виде кавитаций и гидравлических ударов и повышение надежности гидравлического оборудования.
- Автоматической оптимизации комплекса управления при текущих оценках в НА и НС показателей эффективности выполнения заданной технологии.

В настоящий момент происходит существенное расширение на НС применения средств ЭПС и систем автоматизации, а также методов самонастройки и автоматической оптимизации систем и комплексов управления. Во вновь создаваемых НС сокращается число НА, но увеличивается их мощность. Как в объектах первой категории в них предусматривается резервирование НА и электропитание от двух источников электроэнергии для применения систем автоматического включения резерва.

На рис. 1(а,б,в,г) представлены варианты построения ЭПС для многоагрегатных НС с параллельным включением. В тех случаях, когда необходимо обеспечить большие уровни давлений в магистрали при крутой нагрузочной характеристике внешней сети применяют последовательное включение двух или нескольких НА, одновременно перекачивающих жидкость в один и тот же напорный трубопровод (рис. 1,д). Насосы при таком включении могут располагаться как рядом друг с другом, так и на значительном удалении. В этом случае возможны аномальные явления, связанные с кавитацией и турбоэффектами, при которых предыдущий насос раскручивает рабочее колесо следующего насоса, в результате чего возможен выход из строя насосов. При последовательном включении НА применяют схему ЭПС с индивидуальными ПЧ, а если один из насосов выводится из работы включается байпас.

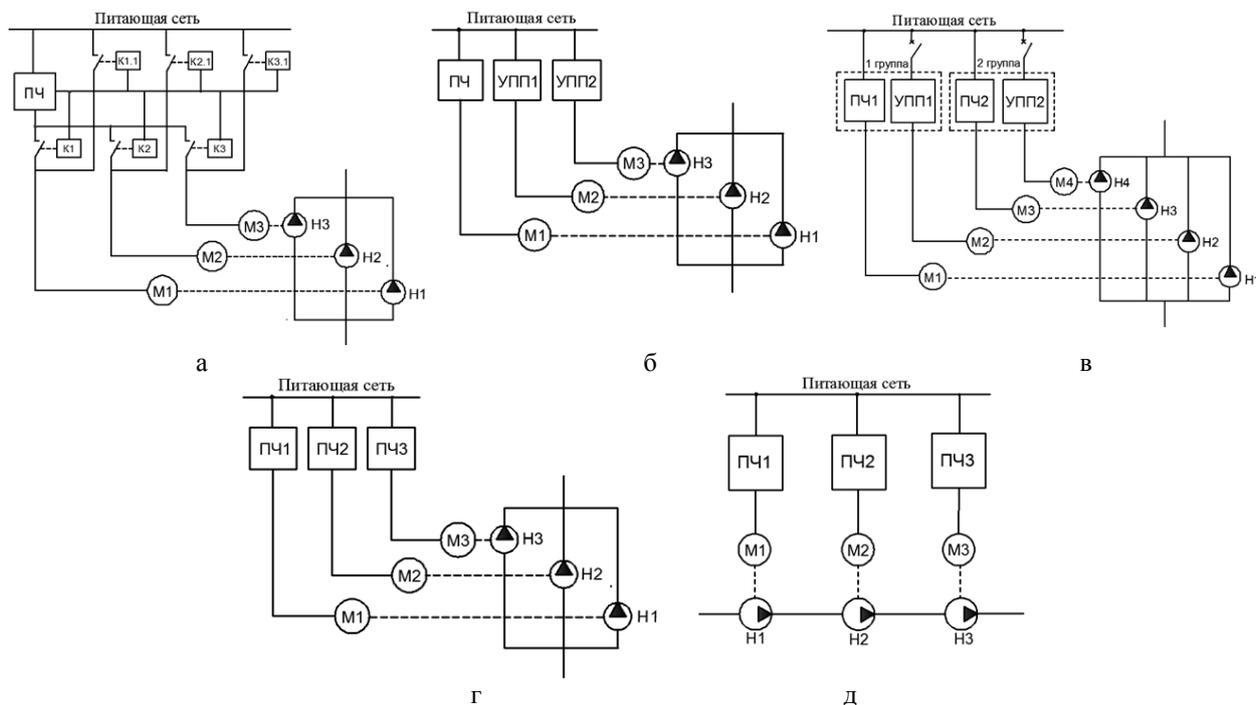


Рис. 1.

Принимая во внимание большое распространение насосного оборудования в различных технологиях и высокое суммарное потребление этим оборудованием электроэнергии, составляющей в развитых странах 10 – 12 % от всей вырабатываемой электроэнергии, ведущие электротехнические корпорации мира выполняют разработку и продажу специализированных серий приводной техники для насосов, вентиляторов, компрессоров в которой предусматривается реализация специальных технологических функций. Предусматривается также широкий выбор соединений и интерфейсов, обеспечивающих решение разных прикладных задач автоматизации НА.

III. ПОКАЗАТЕЛИ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭПС НС

Общие свойства НС, определяющие их эффективность при оснащении современными системами электропривода и автоматизации изложены в работах [1], [2]. Вместе с этим стали возможными и новые свойства, связанные с качественным управлением технологией и оптимизацией процессов при эксплуатации НС, а также сведением к минимуму аномальных гидравлических явлений.

Остановимся на трех составляющих эффективности НС: энергозатраты и обеспечение оптимальных решений по их минимизации; обеспечение заданных статических и динамических значений давлений при произвольном изменении расхода жидкости в магистрали, сведение к минимуму аномальных явлений в виде кавитаций и гидравлических ударов; оптимизация решений по созданию комплексов управления НС и оптимизация процессов при их эксплуатации, используя оценки

показателей эффективности выполнения заданной технологии.

A. Оценки энергозатрат и обеспечение оптимальных решений по их минимизации

Энергопотребления достигает минимальных значений при максимальных значениях КПД каждого НА, которое имеется в одной точке характеристики насоса $H(Q)$ и определяется подачей Q , напором H , и частотой вращения n рабочего колеса.

Из анализа потерь мощности в компонентах НА (в ПЧ, АД, насосе) с учетом типовых режимов работы НА видно, что большая доля потерь приходится на насосы. Потери мощности и энергии в системах ПЧ-АД, а также характеристики КПД этих систем с учетом нагрузки «вентиляторного» вида подробно раскрыты в литературе, например, [3], [4]. Насосы имеют наименьшие значения КПД из-за больших гидравлических потерь энергии, которые при параллельной работе НА с разными подачами существенно возрастают. При регулировании частот вращения валов рабочих колес насосов можно обеспечить максимальные значения КПД в рабочем диапазоне изменений подачи Q . На рис. 2, а, б показаны характеристики $\eta(Q)$ трех параллельно-включенных НА, ЭПС которых выполнены по схемам, соответствующим рис. 1, а или б и рис. 1, г.

В работе [2] показано, что с точки зрения гидравлических потерь наиболее энергозатратными являются установки с двумя параллельно работающими насосами, один из которых работает с максимальной производительностью от сети электропитания, а другой является регулируемым. При этом гидравлические потери резко возрастают с уменьшением частоты вращения

рабочего колеса регулируемого насоса. Потери могут достигать 18% общей мощности установки. При этом потери электроэнергии могут превышать 25% суммарной электрической мощности работающих насосов с учетом снижения КПД регулируемого насоса при его минимальной производительности. При увеличении количества насосов до трех или четырех (один из которых – регулируемый) гидравлические потери в НС существенно снижаются. Рациональное соотношение регулируемых и нерегулируемых насосов составляет 1/2–1/3. В работе [2] определены структура НС (рис. 1, в) и алгоритм коммутации НА, при которых исключается энергетически затратный режим работы двух НА, при котором достигается «приемлемая стоимостью

оборудования и минимальные энергетические затраты». Такое решение соответствует условию минимизации финансовых ресурсов, затрачиваемых на создание ЭПС НС и не учитывает издержки, возникающие при её эксплуатации.

Авторами разработана база энергодинамических моделей компонентов и блоков ЭПС НА и НС [6], на основании которой возможно исследование различных вариантов выполнения систем с экстраполяцией результатов на семь лет эксплуатации НС с использованием прогнозируемых часовых, суточных и месячных графиков изменения расхода жидкости в магистрали с оценкой основных показателей эффективности ЭПС НА и НС.

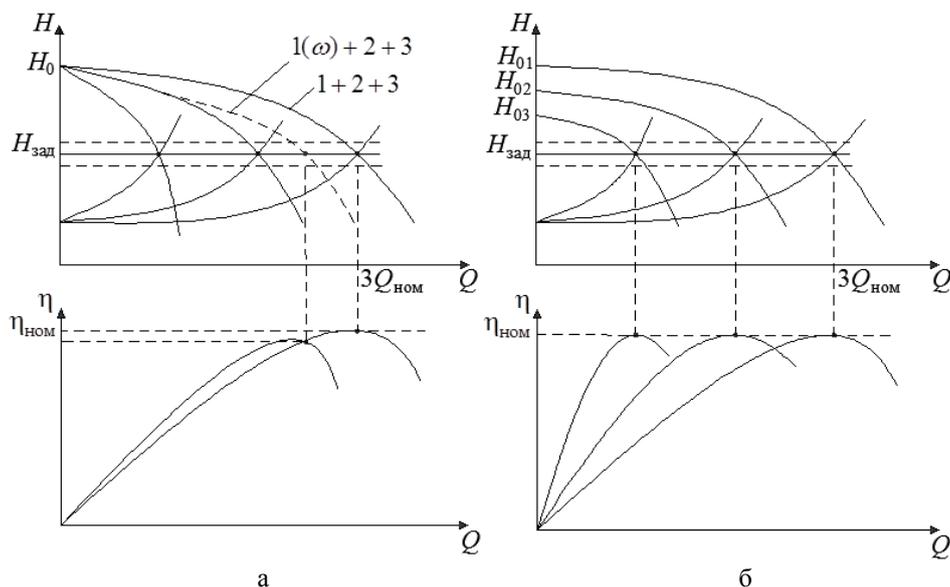


Рис. 2.

В. Обеспечение заданных статических и динамических значений давлений при произвольном изменении расхода жидкости в напорной магистрали. Сведение к минимуму при выполнении технологии аномальных явлений в виде кavitаций и гидравлических ударов

Применение индивидуальных частотно-регулируемых электроприводов НА, повышение уровня информатизации и автоматизации НС дают возможность обеспечить качественное регулирование технологических переменных через регулирование механических и электромагнитных переменных ЭПС и обеспечить оптимальные режимы управления НА и НС. На рис. 3 показана структурная схема одного из вариантов системы управления тремя взаимосвязанными НА, включающая в себя: блоки управления моментами (БУМ); регуляторы скорости (РС), давления (РД), соотношения моментов нагрузки приводов (РСМ); задатчики интенсивности (ЗИ) разгона и торможения электроприводов. По информации поступающей в ПЛК о расходе, давлении в напорной магистрали, а также о потребляемой НА электроэнергии и мощности происходит автоматическая оптимизация процесса с коррекцией заданий на регулируемые

переменные. Применение РСМ возможно в нескольких вариантах, рассмотренных в [5].

Для регулирования переменных, в том числе и давлений в НА возможно применение различных алгоритмов и видов регуляторов: традиционных ПИД-, ПИ-, И-регуляторов; модальных; нечетких; нейронных; комбинаций названных регуляторов. В большинстве практических случаях применяются традиционные регуляторы: ПИ в электромагнитных контурах, П или ПИ в контурах управления скоростью, И или ПИ в контурах управления давлением. Нечеткую логику и нейронные сети рационально применять не для построения таких регуляторов, а для построения блоков автоматической настройки регуляторов. Такие блоки фактически являются регуляторами в контурах самонастройки параметров. Используя методы синтеза нечетких алгоритмов управления, можно выполнить условную оптимизацию сложных контуров регулирования без должного знания их математических моделей. Нейронная сеть обладает способностью "обучаться" в изменяющихся условиях, что позволяет, используя опыт экспертов, обучать нейронную сеть для выполнения настроек параметров регуляторов.

Применяются специальные методы обучения, разработанные для нейронных сетей с использованием методов интерполяции данных.

То, что при использовании части из этих алгоритмов отсутствует необходимость полного знания математического описания механогидравлических процессов во взаимосвязанных НА не является их большим достоинством, так как эти знания всё равно приходят в процессе обучения и эксплуатации систем.

Следует подчеркнуть, что качественное управление процессами во взаимосвязанных НА, при котором исключаются или сводятся к минимуму проявления кавитаций и гидравлических ударов, невозможно без знания математических моделей системы «параллельно работающие НА – выходной коллектор – напорная магистраль». К этим моделям добавляются модели частотно-регулируемых ЭПС, использующих векторное управление без датчиков скорости и модели возмущений систем, действующих со стороны нагрузки.

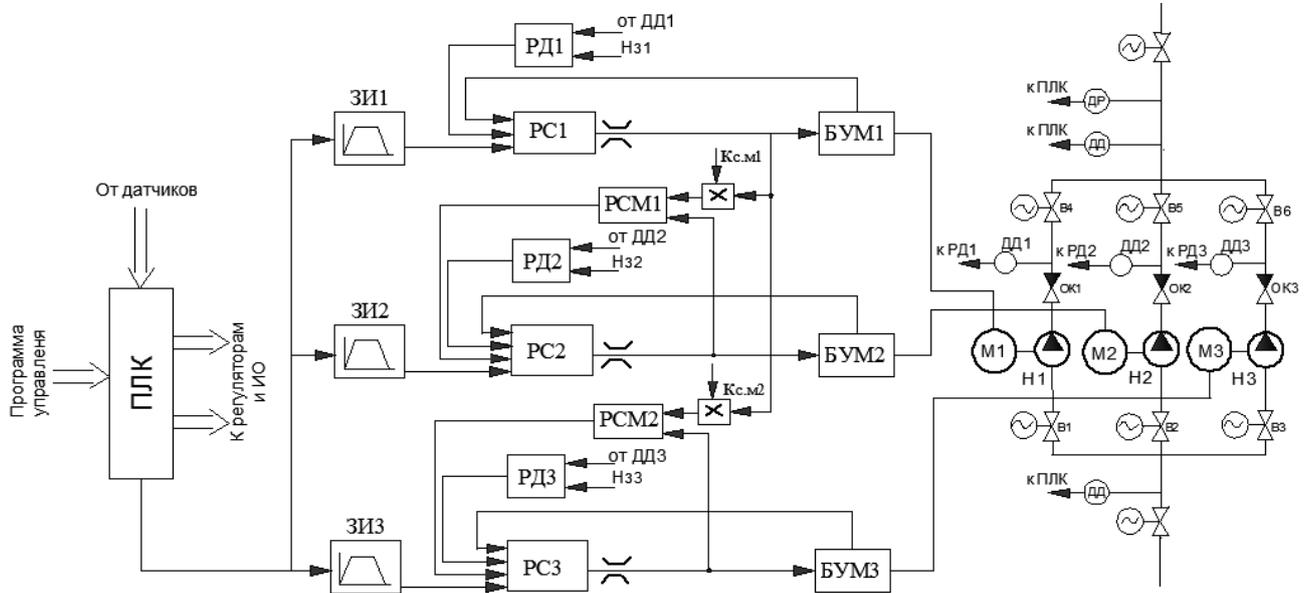


Рис. 3.

Для описания неустановившегося движения жидкости в магистральных трубопроводах применяют систему линеаризованных уравнений [7]:

$$-\frac{d}{dx} P(x,t) = \frac{d}{dt} \rho \cdot v(x,t) + 2a \cdot \rho \cdot v(x,t);$$

$$-\frac{d}{dt} P(x,t) = c^2 \cdot \rho \frac{d}{dx} v(x,t); \quad 2a = \frac{\lambda \cdot v}{2 \cdot d_{вн}}$$

где $P(x,t), v(x,t)$ – давление и осредненная по сечению трубы скорость движения жидкости; ρ – плотность перекачиваемой жидкости; c – скорость звука в данной жидкости; a – приведенный линеаризованный коэффициент гидравлического сопротивления; $\lambda = 0,11 \cdot e^{0,25}$ – коэффициент гидравлического сопротивления при турбулентном течении жидкости, $d_{вн}$ – внутренний диаметр трубы.

Аналогичные описания выполняются для участков гидравлической системы «НА – напорный коллектор». В целом для многоагрегатной НС получается сложное математическое описание, которое при ряде условий и аппроксимаций сводится к передаточной матрице, отражающей взаимодействие давлений в разных частях гидравлической системы. Элементами этой матрицы

являются передаточные функции $w_{ji}^*(p)$, имеющие следующий обобщенный вид

$$W_{ji}^*(p) = \frac{P_{yj-1,j}(p)}{P_i(p)} = \frac{\mu_{\Sigma}}{\mu_{\Sigma}} \frac{\prod_{e=1}^h (T_e''^2 p^2 + 2\xi_e'' T_e'' p + 1) \prod_{r=i}^{j-2} (T_r'' p + 1)}{\prod_{l=1}^{k-1} (T_l^2 p^2 + 2\xi_l T_l p + 1)},$$

Параметры такой передаточной функции определяются по разработанной методике. Постоянные времени и коэффициенты демпфирования определяются из собственных значений матриц, описывающих полную модель системы и ее части. Следует отметить, что в демпфировании колебательных процессов в гидравлической системе большое влияние имеет скорость движения жидкости или так называемое скоростное демпфирование. Наибольшие амплитуды колебаний давления возможны при малых расходах и соответственно малых скоростях. Эффективным средством демпфирования и компенсации низкочастотных магистральных колебаний давлений является ЭПС НС при использовании адаптивных алгоритмов управления в контурах регулирования скорости и давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Лезнов Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. М.: Машиностроение, 2013. 176 с.
- [2] Каргин С.А. Анализ потерь электроэнергии при работе группы насосов, оснащенных регулируемым приводом // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. №3. С.12-18.
- [3] Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. М.: Академия, 2004. 202 с.
- [4] Ильинский Н.Ф. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение / Н.Ф. Ильинский, В.В. Москаленко. М.: Академия, 2008. 208 с.
- [5] Новиков В.А. Электропривод в современных технологиях / В.А. Новиков, С.В. Савва, Н.И. Татаринцев. М.: Академия, 2014. 400 с.
- [6] Прокопов А.А., Кахоров Р.А., Новиков В.А., Белов М.П. Математические модели электроприводных систем насосных агрегатов и станций. Известия СПбГЭТУ 2017. Вып. 10. С. 44–54.
- [7] Вильнер Я.М. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Я.М. Вильнер, Я.Т. Ковалев, Б.Б. Некрасов. М.: Высшая школа, 1976. 416 с.