



УДК 62-581

А. А. Прокопов, Р. А. Кахоров, В. А. Новиков, Т. Е. Беляев  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Вариативная оптимизация электроприводных систем насосных агрегатов

*Представлены результаты вариативной оптимизации электроприводных систем насосных агрегатов при их автономной и параллельной работе. Сформулированы частные и обобщенные критерии оптимизации. Предложена методика принятия решения об оптимальном варианте системы, в которой использована вариативная база разнообразных моделей компонентов систем, представленных в виде математических модулей и блоков, охватывающих разные решения, адаптированные к насосным агрегатам. Дан пример энергодинамической модели электроприводной системы для двух параллельно работающих насосных агрегатов. Выполнено технико-экономическое исследование трех вариантов систем, представленное в виде итоговой таблицы сравнения относительных показателей их эффективности. Показана перспективность применения систем с использованием преобразователей частоты для каждого электропривода насосных агрегатов при их параллельной работе.*

**Электроприводные системы насосных агрегатов при автономной и параллельной работе, варианты построения и режимы работы систем, математические описания динамических и энергетических процессов, принятие решения об оптимальном варианте системы по совокупности альтернатив**

**Варианты построения и режимы работы электроприводных систем насосных агрегатов.** Эффективность насосных агрегатов (НА) и насосных станций (НС) при их оснащении современными системами электропривода и автоматизации проявляется в трех главных составляющих: обеспечение заданных статических и динамических значений давления при произвольном изменении расхода жидкости в магистрали, сведение к минимуму аномальных явлений в виде кавитаций и гидравлических ударов; обеспечение оптимальных решений по минимизации энергозатрат; оптимизация решений по созданию комплексов управления НС и оптимизация процессов при их эксплуатации с использованием оценки показателей эффективности выполнения заданной технологии.

При использовании одного НА, оснащенного частотно-регулируемым электроприводом, минимизацию энергозатрат в электротехнической части агрегата выполняют с помощью реализации U-f-характеристики преобразователя частоты

(ПЧ), соответствующей вентиляторной характеристике нагрузки двигателя. Такая характеристика присутствует в меню программного обеспечения ПЧ, и часто вариант электропривода с таким ПЧ называется энергосберегающим. Эффективность этого способа проявляется при широком диапазоне регулирования подачи насоса и, соответственно, частоты вращения электропривода относительно номинального значения. Однако при этих условиях существенно увеличиваются гидравлические потери в насосе и суммарные потери в НА в целом, в связи с чем одноагрегатные системы применяются при небольшой гидравлической мощности и ограниченном диапазоне изменения подачи. При средней и большой мощности применяются многоагрегатные НС при параллельном включении НА. Конкретная гидравлическая схема устанавливается исходя из выполняемой НС технологии, технических требований и условий реализации этой технологии. Независимо от принятой схемы на НС применя-

ется групповое управление взаимосвязанными НА с использованием электроприводных средств, при котором стремятся обеспечить максимальную эффективность станции по трем перечисленным ранее составляющим.

Для многоагрегатных НС с параллельным включением НА применяются следующие варианты построения электроприводной системы (ЭПС):

ЭПС1. С использованием одного ПЧ на группу электроприводов НА и коммутационных устройств подключения электроприводов на ПЧ и питающую сеть.

ЭПС2. То же, но с применением ПЧ и устройств плавного пуска (УПП). Применяют варианты с групповыми УПП и коммутационными устройствами подключения электроприводов и с индивидуальными УПП для каждого электропривода.

ЭПС3. С использованием ПЧ для каждого электропривода НА и логических модулей подключения и отключения НА в соответствии с требуемой подачей жидкости в магистраль.

Используются также комбинированные варианты ЭПС, в которых предусматривается применение двух (трех) ПЧ, каждый из которых обеспечивает управление двумя (тремя) группами НА, работающих на общую магистраль. Внутри группы электропривода подключаются по варианту 1 или 2. В каждом варианте имеются подварианты выполнения силовой части системы, использования различных алгоритмов управления процессами. Например, в варианте 3 возможно применение как индивидуальных ПЧ, так и индивидуальных инверторов с групповым выпрямителем, обеспечивающим использование энергии торможения, выключаемого НА для работы других НА; регулирование давления выполняется как с использованием контуров регулирования скорости, так и без них; применяется скалярное или векторное управление, и др. Схемы вариантов силовой части ЭПС рассмотрены в [1].

По оценкам начальных капитальных затрат, первый вариант – наименее затратный в сравнении с третьим, наиболее затратным вариантом, но при его применении достигаются наиболее высокие показатели эффективности выполняемой технологии.

При организации параллельной работы на общую магистраль любых НА решаются три основные задачи управления:

1. Подключение дополнительных НА к работающему основному НА и отключение их от него.

2. Распределение нагрузок между параллельно работающими НА.

3. Очередность работы НА в виде основных и дополнительных для равномерной их загрузки по ходу продолжительной эксплуатации и выравнивания ресурсных возможностей.

Дополнительный НА может включаться и отключаться с учетом различных способов:

1) по отклонению регулируемой технологической переменной (например, давления на выходе НА или на выходном коллекторе НС, разности давлений НА, частоты вращения рабочего колеса и др.);

2) по нагрузке (току, моменту, мощности) электродвигателя основного НА;

3) исходя из условия минимизации текущего энергопотребления двигателями НА;

4. По способу 1 или 2 с одновременным манипулированием работой управляемых задвижек на выходе НА.

Например, в варианте ЭПС1 возможно применение следующего алгоритма:

1) ЭПС основного НА стабилизирует технологическую переменную в диапазоне нагрузок, допустимых для одиночного агрегата. При увеличении расхода жидкости в магистрали частота вращения рабочего колеса НА и, соответственно, двигателя увеличивается до номинального значения;

2) при дальнейшем росте расхода жидкости электродвигатель основного НА синхронизируется с питающей сетью и переключается с нее, а ПЧ переключается на дополнительный НА, который становится основным;

3) при дальнейшем росте расхода жидкости таким же образом подключается следующий дополнительный агрегат;

4) при снижении расхода жидкости операции выполняются в обратной последовательности.

При отключении дополнительного насосного агрегата принимаются меры против его повторного включения вследствие, например, кратковременного повышения расхода. Такое отключение целесообразно выполнять при одновременном выполнении трех условий:

1) частота напряжения, подаваемого на электродвигатель основного агрегата, меньше номинальной;

2) ток нагрузки основного агрегата значительно меньше номинального; при отключении дополнительного агрегата ток основного агрегата не должен превысить номинального значения;

3) мощность, потребляемая электродвигателями параллельно работающими агрегатов, больше, чем та, которую будет потреблять основной

НА при автономной работе с некоторым запасом на гистерезис управления для предотвращения частных пусков/остановок.

В варианте ЭПСЗ, при котором все двигатели снабжены индивидуальными ПЧ, можно обеспечить наивысшую точность регулирования технологической переменной при широком диапазоне изменения расхода жидкости. Функциональные возможности ограничиваются лишь энергетическими параметрами. Можно использовать различные по характеристикам НА. Система сохраняет работоспособность при отказе ПЧ, при этом двигатель подключается при помощи обводного контактора на сеть электропитания. Имеется возможность сведения к минимуму аномальных явлений в виде кавитаций и гидравлических ударов.

Во всех вариантах наиболее энергозатратны установки с двумя параллельно работающими НА, один из которых работает с максимальной подачей, а другой – с регулируемой минимальной подачей [2], [3]. При этом начиная с малых значений подач гидравлические потери резко возрастают с уменьшением частоты вращения рабочего колеса регулируемого насоса. По экспериментальным данным [2] гидравлические потери могут достигать 18 % общей мощности установки. Потери электроэнергии могут превышать 25 % суммарной электрической мощности работающих насосов с учетом снижения КПД регулируемого насоса при его минимальной подаче. Снижение энергозатрат обеспечивают, увеличивая количество насосов до трех или четырех и применяя дополнительный ПЧ. При одновременной работе двух НА управление всегда идет от двух ПЧ. При необходимости подключения третьего (четвертого) НА один из регулируемых агрегатов выводится в нерегулируемый режим максимальной производительности, т. е. в системе из трех (четырех) НА один – регулируемый, остальные работают с максимальной подачей. При отключении третьего и четвертого НА второй регулируемый агрегат, ранее выведенный в режим максимальной подачи, вновь переводится в режим регулирования от своего ПЧ.

В варианте ЭПСЗ снижение энергозатрат обеспечивают, выравнивая подачи НА или моментов нагрузок двигателей НА. Применяется следующий алгоритм управления:

1) как и в варианте 1, ЭПС основного НА стабилизирует технологическую переменную в диапазоне нагрузок, допустимых для одиночного

агрегата. При увеличении расхода жидкости в магистрали частота вращения рабочего колеса НА и, соответственно, двигателя увеличивается до номинального значения;

2) при дальнейшем росте расхода жидкости включается в работу дополнительный НА и происходит выравнивание нагрузок двух работающих приводов. При увеличении расхода жидкости в магистрали частоты вращения рабочих колес двух НА и, соответственно, двигателей увеличиваются до номинальных значений;

3) при дальнейшем росте расхода таким же образом подключается второй дополнительный НА и происходит выравнивание нагрузок трех работающих приводов;

4) при снижении расхода жидкости операции выполняются в обратной последовательности.

Процесс включения и отключения НА можно выполнять как в функции частот вращения двигателей, так и в функции токов нагрузки (активных составляющих токов статора). Отключение дополнительного НА выполняется при таком токе, при котором оставшиеся в работе двигатели получают одинаковую номинальную нагрузку с некоторым запасом на гистерезис управления для предотвращения частных пусков/остановок.

**Принятие решения об оптимальном варианте ЭПС параллельно работающих НА.** Комплексным решением задачи об оптимальном варианте ЭПС параллельно работающих НА становится решение с использованием микро- и макромоделей систем в виде математических описаний и энергодинамических структурных схем вариантов выполнения ЭПС типовых режимов работы НА и НС и типовых временных графиков расхода жидкости в магистрали. В зависимости от горизонта исследования используются минутные, часовые, суточные, месячные и другие графики. Общая схема принятия решения (рис. 1) включает в себя три блока: моделей вариантов систем (БМВС), оценки показателей эффективности (БОПЭ), анализа и принятия решения (БАПР). Примеры суточных графиков расхода  $Q_c(t)$  (за трое суток 1–3) показаны на рис. 2.

Определенные в начале статьи виды оценок показателей эффективности НА и НС при их оснащении современными ЭПС и системами автоматизации дают возможность определить наиболее значимые частные критерии, имеющие взаимосвязанные оценки динамической точности регулирования давления и качества выполнения

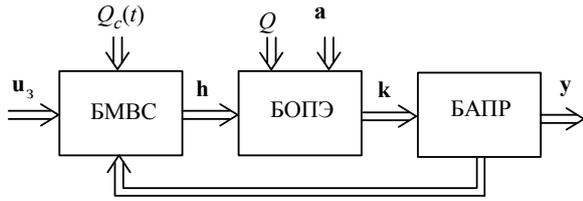


Рис. 1

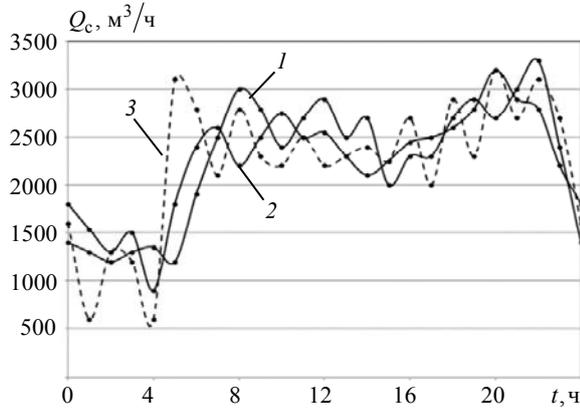


Рис. 2

технологии водоснабжения, соответствия подачи расходу жидкости в магистрали, определяющего производительность НА, электропотребление, стоимости (цены разработки и ввода в эксплуатацию и цены эксплуатации ЭПС). Другие частные критерии, оценивающие надежность, сложность, массу и габаритные размеры, учитываются в виде ограничений. При этом важно нормирование оценок, т. е. их представление в виде относительных величин. Необходимо также иметь обоснование значений коэффициентов  $b_i$ , устанавливающих веса частных критериев в обобщенном критерии. При ограниченном числе вариантов выполнения ЭПС и с расширением вида оценок частных критериев  $q_i$  по каждому варианту ЭПС обобщенный критерий можно представить в виде суммы

$$Q = \sum_{i=1}^n b_i q_i, \quad (1)$$

где  $b_1, b_2, \dots, b_n$  – весовые коэффициенты оценок частных критериев.

При формировании обобщенного критерия важно определить цену этапа жизненного цикла ЭПС: на стадии проектирования – цена проекта; на стадии монтажа, наладки и ввода в эксплуатацию – цена создания; на эксплуатационной стадии – составляющие эксплуатационных затрат. Ключевыми являются оценки первого и третьего видов. Оба эти вида оценок вносятся в оценки

трех ранее названных частных критериев. Таким образом, обобщенным критерием на стадии проектирования считается цена решения, а на стадии эксплуатации – цена эксплуатационных затрат при заданном качестве технологии и заданном графике расхода. При таком подходе коммерческие оценки эффективности смыкаются с экономическими оценками и возможно их получение в любых принятых в экономике формах.

Для многоагрегатных НС обобщенный критерий  $Q(\mathbf{a})$ , содержащий указанные оценки, может быть записан в следующем виде:

$$Q(\mathbf{a}) = \left[ \sum_{i=1}^k B_i q_i(\mathbf{a}_i) + \sum_{j=1}^n B_j q_j(\mathbf{a}_j) + \sum_{f=1}^h B_f q_f(\mathbf{a}_f) \right], \quad (2)$$

где  $\mathbf{a} = [\mathbf{a}_i, \mathbf{a}_j, \mathbf{a}_f]$  ( $i = \overline{1, k}, j = \overline{1, n}, f = \overline{1, h}$ ) – вектор варьируемых переменных;  $q_i(\mathbf{a}_i), q_j(\mathbf{a}_j), q_f(\mathbf{a}_f)$  – оценки производительности, качества технологии водоснабжения, энергопотребление при большом числе вариантов выполнения ЭПС соответственно;  $B_i, B_j, B_f$  – весовые коэффициенты оценок.

Подобный критерий используется не только при оптимизации на этапе проектирования, но и при автоматической оптимизации на этапе эксплуатации систем. В автоматическом режиме минимизируется обобщенный критерий качества с учетом энергетических и технологических ограничений.

Принимая во внимание большое влияние производительности на стоимость варианта, можно выполнять оптимизацию по двум частным критериям – качеству технологии и электропотреблению при заданном значении производительности (определяемой максимальной подачей), а следовательно, и цене этой производительности. Качество технологии определяется обеспечением заданных статических и динамических значений давлений при произвольном изменении расхода жидкости в магистрали (среднеквадратические значения отклонения давления 0.3–1 %), сведением к минимуму аномальных явлений в виде кавитаций и гидравлических ударов. Такое качество достигается средствами и алгоритмами систем микропроцессорного управления, стоимость которых может

составлять небольшую долю стоимости ЭПС комплекса НА – тогда обобщенный критерий может включать в себя только оценки электропотребления. В этом случае имеем наиболее простой метод формирования обобщенного критерия, заключающийся в том, что критерий электропотребления  $q_f$  принимается в качестве обобщенного, а все остальные учитываются в виде ограничений, определяющих область допустимых альтернатив:

$$Q = q_f \begin{cases} q_i \geq q_i^{(0)} & (i = \overline{1, l}); \\ q_i < q_i^{(0)} & (i = \overline{l+1, n}, i \neq f), \end{cases} \quad (3)$$

где  $q_i^{(0)}$  – величины, определяющие допустимые значения по всем критериям (производительность, качество технологии, надежность, сложность, массы и габаритные размеры), кроме  $q_f$ .

Тогда задача сравнения альтернатив сводится к задаче принятия решений со скалярным критерием. Оценки альтернатив, не соответствующих заданным значениям  $q_i^{(0)}$  показывают, что альтернатива может дальше не рассматриваться.

Задача принятия оптимального решения при выборе альтернативы формулируется как задача математического программирования:

$$\min_{a \in A} [q_f(\mathbf{a}_j)], \quad q_i(\mathbf{a}_j) \geq q_i^{(0)} \quad (i = \overline{1, l}, j = \overline{1, m}), \\ q_i(\mathbf{a}_i) \leq q_i^{(0)} \quad (i = \overline{l+1, n}; i \neq f).$$

Рационально использовать следующую методику принятия решения об оптимальном варианте ЭПС НА по совокупности нескольких альтернатив ее создания:

1) формирование  $h$  вариантов решения (выполнения системы), включающих в себя сочетания разных компонентов электротехнической, механической и гидравлической подсистем; предварительный выбор структур системы и электрооборудования. Выполнить этот этап удобно, если использовать содержание ячеек таблицы модулей [4], составленной в соответствии с классификацией компонентов систем управления НА и НС;

2) формулирование частных и обобщенных критериев оптимизации системы. Из большого числа частных критериев выделяют три главных критерия, отражающих нормированные оценки

производительности, качества технологии, электропотребление для каждого варианта, остальные частные решения представляются в виде ограничений. Обобщенный критерий записывается в виде стоимостной суммы (1), (2) или (3) с положительными весовыми коэффициентами, отражающими стоимостной вклад каждого частного критерия в суммарную оценку;

3) составление упрощенных линеаризованных математических моделей (макромоделей), описывающих каждый из разных вариантов решений. Эти модели представляют собой модели-блоки, так как они составлены из моделей-модулей, присутствующих вместе с моделями связей в ячейках таблицы модулей. В этих моделях кроме традиционных переменных, используемых для описания движений, имеются переменные, используемые для оценки качества технологии, электропотребления, установленной мощности оборудования, потерь энергии и др., необходимые для частных критериев. Используются относительные значения переменных. В качестве базовых принимаются значения, указанные в техническом задании и в характеристиках продвинутых рыночных изделий;

4) компьютерное моделирование  $h$  систем с задающими и возмущающими воздействиями, соответствующими конкретной технологии водоснабжения; исследование режимов работы НА для типовых графиков расхода жидкости;

5) получение из итогов моделирования нормированных оценок производительности, качества технологии, электропотребления для каждого варианта. Выбор из  $h$  вариантов системы  $k$  вариантов, отвечающих заданным нормированным значениям оценок. Такой выбор выполняется по итогам ранжирования  $h$  систем в соответствии с ячейками матрицы блоков, размер которой зависит от числа и пределов ранжирования оценок производительности, качества технологии, электропотребления. В простейшем случае эта матрица имеет размер  $3 \times 3 \times 3$  и может быть сформирована, например, с пределами оценок: «меньше» (0.7...0.9), «норма» (0.9...1.1), «больше» (1.1...1.3);

6) обоснование и выбор значений весовых коэффициентов нормированных частных критериев в нормированном обобщенном критерии. Оптимизация  $k$  вариантов систем в соответствии с нормированным обобщенным критерием, оценка

которого выполняется в виде относительной цены варианта. Базовой является усредненная цена электрооборудования, сложившаяся на рынке в настоящее время, а варьируемыми переменными, по которым выполняется оптимизация систем – обобщенные нормированные оценки параметров типовых приводов;

7) принятие решения о базовом варианте ЭПС для дальнейшего проектирования по итогам оптимизации всех  $k$  вариантов систем; уточненный выбор электрооборудования системы;

8) моделирование базового варианта системы по полным моделям (микромоделям) подсистем, получение уточненных оценок обобщенного и частных критериев.

Выбор формы математического описания ЭПС связан с выбором программной среды, в которой выполняется компьютерное моделирование вариантов системы. Если такой средой является Matlab-Simulink, то описание выполняется также с использованием энергодинамических структурных схем, полностью соответствующих нелинейным дифференциальным уравнениям системы. Важно при этом качественно выпол-

нять математическое описание гидравлической подсистемы, включающей в себя параллельно работающие НА, объединенные входными и выходными коллекторами и общими трубопроводами (магистральями).

**Расчетно-модельные исследования вариантов ЭПС.** Для всех рассматриваемых вариантов ЭПС выполнены математические описания, расчеты и модельные исследования в среде Matlab-Simulink с оценками их динамической и энергетической эффективности. Вариант энергодинамической структурной схемы ЭПСЗ для двух параллельно работающих НА показан на рис. 3. При большем числе параллельно работающих НА данный вариант схемы наращивался аналогичными сепаратными блоками, имеющими гидравлические взаимосвязи с имеющимися блоками через выходной коллектор. Система включает в себя регуляторы скорости РС, давления РД, соотношения моментов нагрузки приводов РСМ, замкнутые контуры регулирования токов, задачки интенсивности ЗИ для разгона и торможения электроприводов. Процесс включения и отключения дополнительного НА выполняется блоком переключения структур БПС. Математическое описание модулей и блоков структурной схемы

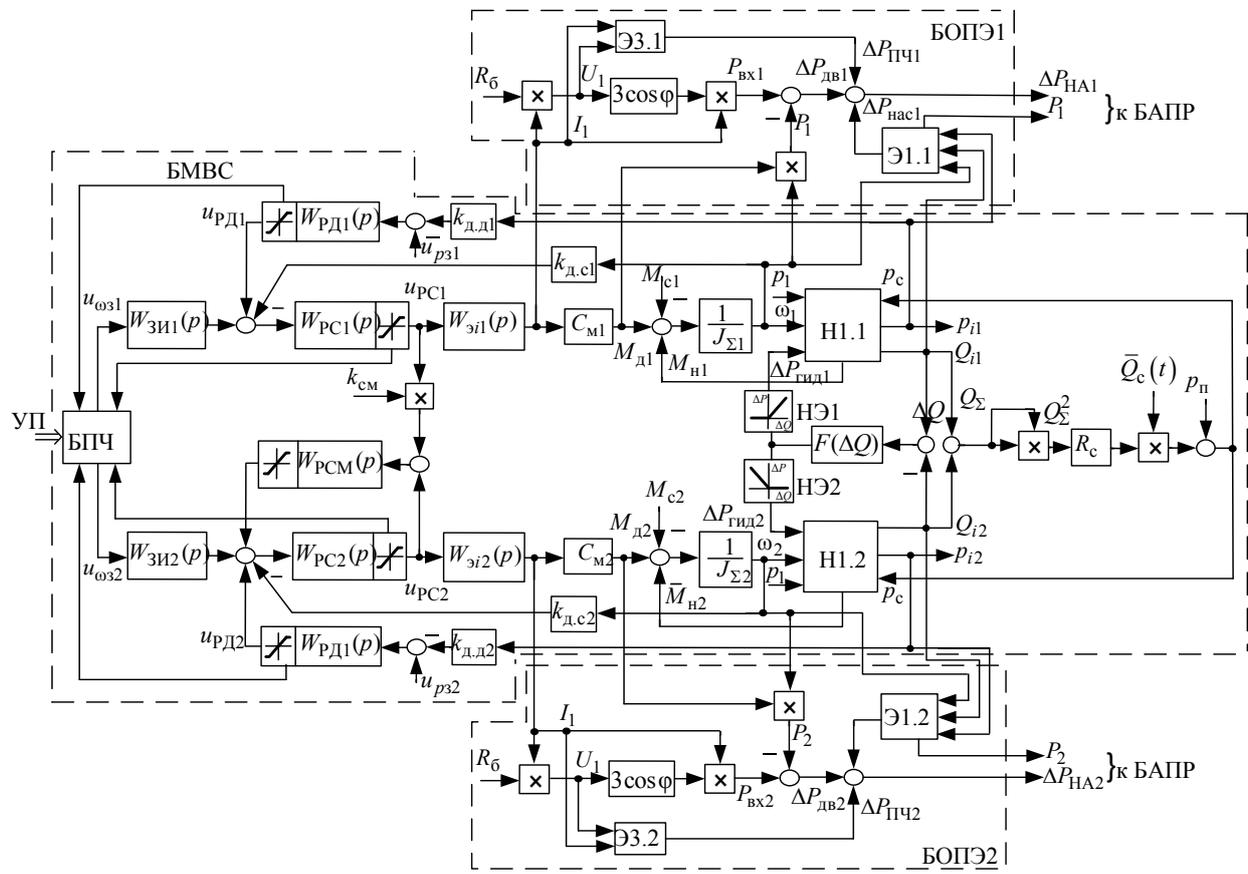


Рис. 3

дано в [4]. Для исследований на микроуровне структурная схема расширялась до уровня векторного регулирования активных токов и потоков сцеплений приводов, для исследований на макроуровне схема сжималась (упрощалась) до уровня регулирования гидравлических переменных и оценки энергетических переменных с масштабированием динамических процессов вплоть до перехода к режимам работы, близким к статическим.

Динамические и энергетические процессы в системе управления давлениями двух НА описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} p\omega_i &= J_{\Sigma i}^{-1} (M_{ди} - M_{ни} - M_{ci}); \\ M_{ди} &= (3/2) p_{п} k_2 \Psi_2 i_q; \\ T_{эi} p i_i + i_i &= R_{эi}^{-1} (u_{qi} - c'_{ei} \omega_i); \\ u_{qi} &= [W_{PTi}(p) k_{пi} u_{PTi}(t - \tau_i)] (u_{PCi} - k_{д,ти} i_i); \\ u_{PCi} &= W_{PCi}(p) (u_{3Иi} - u_{oci} + u_{PDi}); \\ u_{PCi} &\leq u_{PCoi}; \\ u_{PDi} &= W_{PDi}(p) (k_{д,ди} p_i - u_{pzi}); \\ u_{3Иi} &= W_{3Иi}(p) u_{\omega zi}; \quad i = \overline{1,2}; \quad j = \overline{1,2}; \\ p &= \frac{d(\cdot)}{dt}; \quad p^{-1} = \int(\cdot) dt; \\ u_{PCmj} &= W_{PCmj}(p) (k_{CMj} u_{PCi} - u_{PC(i+1)}); \\ u_{PCmj} &\leq u_{PCoj}, \end{aligned}$$

где  $\omega_i$  – частоты вращения двигателя;  $M_{ди}$ ,  $M_{ни}$ ,  $M_{ci}$  – моменты двигателя, нагрузки и сил сопротивления двигателя;  $i_i$ ,  $u_{qi}$  – составляющие токов и напряжений статора по оси  $q$  в системе векторного управления;  $u_{PTi}$ ,  $u_{PCi}$ ,  $u_{3Иi}$  – выходные переменные регуляторов тока, скорости, давления, задатчика интенсивности;  $u_{\omega zi}$  – задание частоты вращения механизма;  $T_{эi}$  – постоянная времени двигателя.

На структурной схеме контур тока представлен эквивалентным апериодическим звеном с постоянной времени  $T_{эi}$ . Уравнение, отражающее гидравлические процессы в насосах (модули Н1.1 и Н1.2), имеет вид

$$pQ_i = \frac{s}{pL} [p_1 + p_0 - p_c - (R_{\Sigma} Q_i^2)],$$

где  $p_{0i} = k_{p0} \omega_i^2$ ;  $p_c = p_{п} + R_c Q_c^2$ ;  $p_i = p_0 \times \left( \frac{\omega_i}{\omega_{ном}} \right)^2 - R_{нас} Q_i^2$ .

Обратный клапан определяет течение жидкости только в одном направлении, т. е. расход может быть только положительным числом.

Модули (Э1.1, Э1.2) и (Э3.1, Э3.2), относящиеся к БОПЭ, оценивают потери мощности в насосе и ПЧ [5]:

$$\Delta P_{нас} = P_{пот} - P_{гид};$$

$$\Delta P_{ПЧ} = \Delta P_{в} + \Delta P_{AI},$$

где  $P_{гид} = p_i Q_i$ ;  $P_{пот} = \frac{p_i Q_i}{\eta_{ин}}$ ;  $\Delta P_{в} = \Delta P_{р.вх} + \Delta P_{в}$ ;  $\Delta P_{AI} = \Delta P_{кл} + \Delta P_{р.вых}$ .

Сумма потерь в отдельных компонентах формирует общие потери в НА:

$$\Delta P_{НА} = \Delta P_{нас} + \Delta P_{дв} + \Delta P_{ПЧ};$$

$$\Delta P_{дв} = P_{вх} - P_{мех}; \quad P_{вх} = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi;$$

$$P_{мех} = \omega_{ном} M_{ном},$$

где  $R_{эi}$  – эквивалентное сопротивление;  $C_{mi}$  – постоянная двигателя;  $J_{\Sigma i}$  – моменты инерции двигателей;  $k_{д,ти}$ ,  $k_{д,ci}$ ,  $k_{д,ди}$  – коэффициенты датчиков тока, скорости и давления;  $k_{пi}$ ,  $\tau_i$  – передаточный коэффициент и время запаздывания ПЧ;  $\Delta P_{НА}$  – потери мощности НА;  $p_i$ ,  $Q_i$ ,  $P_{гидi}$ ,  $P_{вх}$ ,  $P_{мех}$  – текущие значения давления, подачи, момента насоса, гидравлической мощности, мощности, потребляемой двигателями, мощности на валу двигателя;  $p_1$  – давление во входном трубопроводе насоса,  $R_{\Sigma}$  – суммарное гидравлическое сопротивление насоса с частью напорного трубопровода.

Синтез параметров регуляторов в контурах каскадного регулирования электромагнитных, механических и гидравлических переменных выполняется с использованием традиционных методов и методов оптимизации из библиотеки Matlab-Simulink. Динамические и энергетические процессы в НА при быстрых изменениях управляющих и возмущающих воздействий показаны на рис. 4 и 5. Расчет ЭПС выполнен в СИ (рад/с, Па, м<sup>3</sup>/с), но для удобства отображения переменных на графиках используются единицы измерения переменных: об/мин, кПа, м<sup>3</sup>/ч. Для изменения расхода от минимального значения до максимального (примерно в 10 раз) сопротивление  $R_{маг+потр}$  должно измениться примерно в 100 раз (от 84 100 000 Н · с<sup>2</sup>/м<sup>8</sup> до 841 000 Н · с<sup>2</sup>/м<sup>8</sup>), в связи

с чем на графиках значение сопротивления масштабировано  $R_{\text{маг+потр}} \cdot 25 \cdot 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{М}^8$ .

На рис. 4 показаны графики электрических, механических и гидравлических переменных при работе двух НА с одним ПЧ и коммутацией (рис. 4, а, б), а также с индивидуальными ПЧ (рис. 4, в, г). Обозначено:  $p_{\text{кол}}$  – давление выходного коллектора;  $Q_1, Q_2, P_1, P_2, I_1, I_2$  – подачи, мощности, токи двигателей первого и второго НА соответственно;  $Q_{\Sigma}$  – сумма подач НА.

Как видно из графиков (рис. 4, а) в варианте ЭПС1, при увеличении расхода жидкости в магистрали уменьшается сопротивление у потребителя за магистральным трубопроводом и электропривод, увеличивая частоту вращения основного НА, стабилизирует давление в выходном коллекторе в диапазоне нагрузок, допустимых для одного агрегата. При дальнейшем росте расхода и выхода на максимальную производительность электродвигатель основного НА переключается на питающую сеть, а ПЧ переключается на дополнительный НА, который становится основным.

В варианте ЭПС3 при включении в работу дополнительного НА система выравнивает нагрузки

двух работающих приводов (рис. 4, в). Отключение дополнительного НА будет происходить при снижении расхода в магистрали, когда его частота вращения снизится и нагрузка основного агрегата станет меньше номинальной.

В ЭПС1 при переключении ПЧ на дополнительный НА могут происходить броски токов и давления. Это влияет на динамику привода и насоса, возможен гидродинамический удар в коллекторе и магистральном трубопроводе. В ЭПС3 это явление отсутствует, что позволяет достигать наиболее высоких показателей в динамических и энергетических процессах.

При параллельной работе НА возникают гидравлические потери из-за различий сопротивления в трубопроводах и запорной арматуре между входным и выходным коллекторами, характеристик агрегатов, вследствие чего эти потери могут привести к неравномерному распределению нагрузок, а соответственно, и подач между НА. При исследовании выяснялось, что привод НА, включенного в трубопровод с меньшим сопротивлением, принимает на себя большую нагрузку. На рис. 5 показаны графики подач, токов и частот вращения двигателей НА без выравнивания (рис. 5, а) и с выравниванием (рис. 5, б) нагрузок.

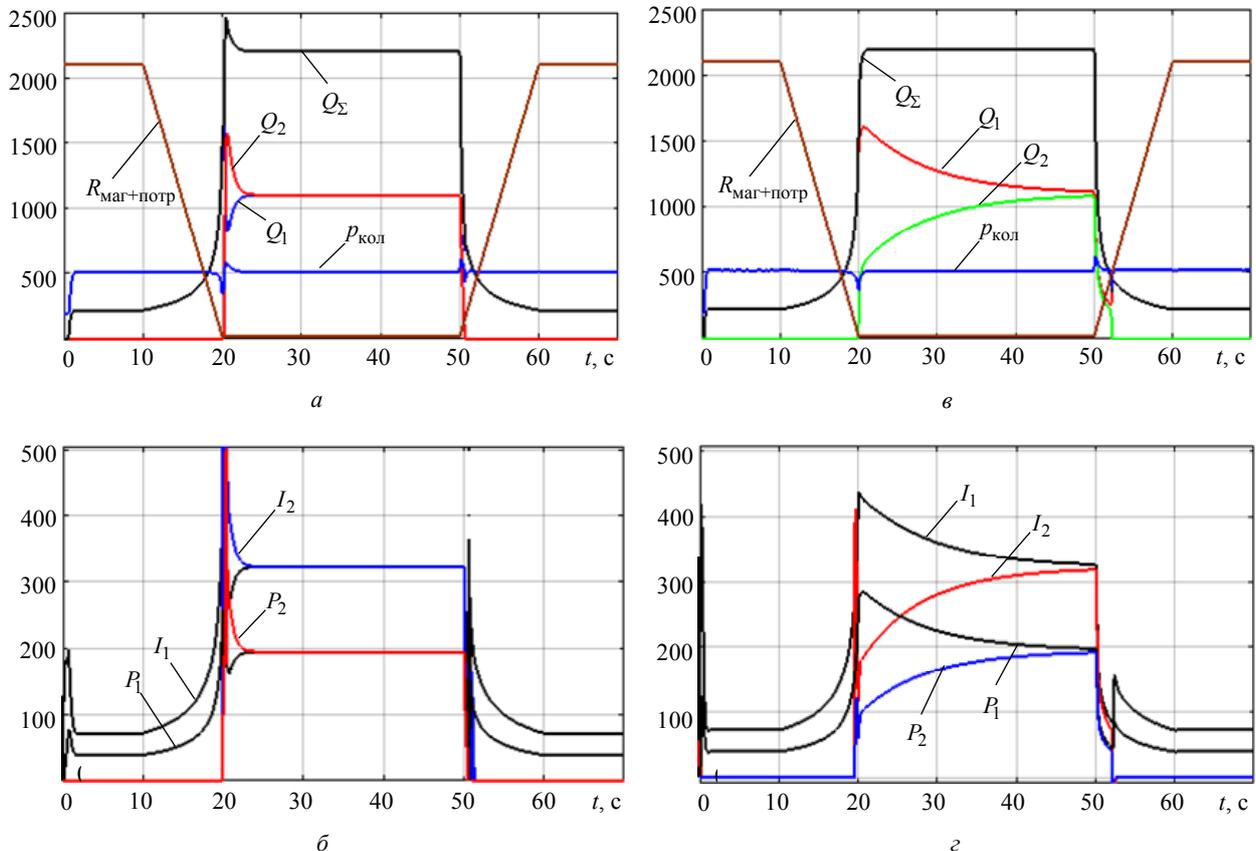


Рис. 4

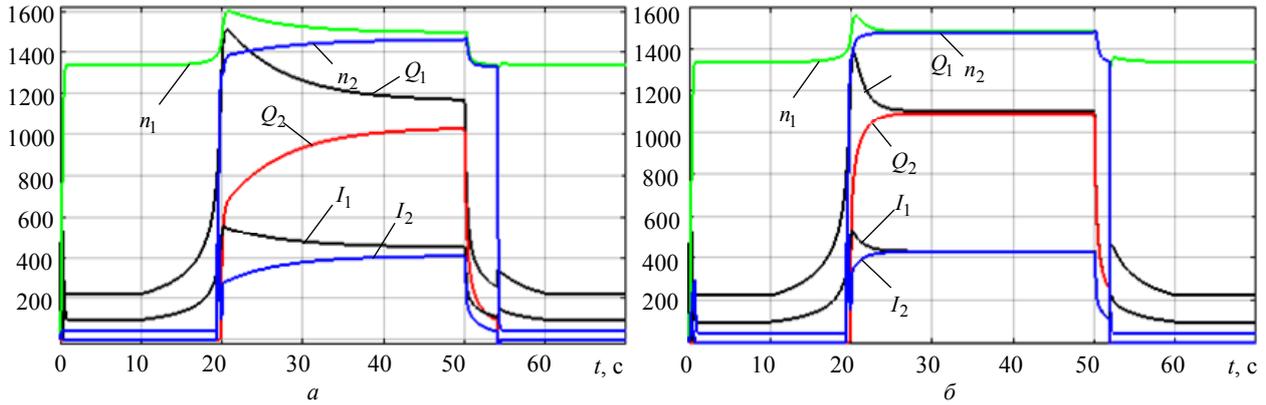


Рис. 5

Относительные показатели эффективности ЭПС		ЭПС1	ЭПС2	ЭПС3
При разработке и вводе в эксплуатацию	Цена проекта	1	1.1	1.4
	Цена электрооборудования	1	1.07	1.46
	Цена монтажных и пусконаладочных работ	1	1.05	1.1
	Общая цена разработки и ввода в эксплуатацию	1	1.15	1.9
При эксплуатации систем	Срок окупаемости	1	1.12	1.73
	Удельный расход электроэнергии, кВт · ч/м <sup>3</sup>	1	0.97	0.84
	Средневзвешенный КПД	1	1.02	1.1
	Средневзвешенный годовой расход электроэнергии при сроке эксплуатации 7 лет	1	0.98	0.83
	То же при сроке эксплуатации 10 лет	1	0.96	0.81
Итого	Чистый доход	1	1.03	1.12

Выравнивание моментов нагрузок достигается при введении регулятора РСМ (рис. 3) в систему управления параллельно работающими НА. С помощью РСМ корректируются значения частот вращения двигателей или частот индивидуальных ПЧ с целью получения нужных соотношений, в том числе и равных значений моментов. Эти соотношения устанавливаются коэффициентами  $k_{смj}$  по значению момента ведущего привода.

В качестве примера расчета, моделирования и исследования трех вариантов выполнения ЭПС рас-

смотрен комплекс, включающий в себе два параллельно работающих НА. Состав комплекса: насосы ( $Q = 1100 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $H = 52.5 \text{ м}$ ,  $\eta_n = 0.86$ ), электродвигатели ( $P_{\text{ном}} = 250 \text{ кВт}$ ,  $n_{\text{ном}} = 1480 \text{ мин}^{-1}$ ), преобразователи частоты ( $P_{\text{ном}} = 250 \text{ кВт}$ ,  $\eta_{\text{ном}} = 0.945$ ,  $I_{\text{ном}} = 443 \text{ А}$ , КПД = 98 %).

В таблице представлены оценки относительных показателей эффективности систем. Расчеты выполнялись в соответствии с методикой [5], оценки стоимости – по данным [6]. При расчете относительных показателей эффективности базовыми оценками принимались оценки показателей ЭПС1.

Таким образом, на основании изложенной методики и выполненных расчетно-модельных исследований вариантов ЭПС НА получены оценки относительных показателей их эффективности на основных этапах жизненного цикла. Большой срок окупаемости варианта ЭПС3, покрывается меньшим удельным расходом электроэнергии и при оценках показателей эффективности на сроке эксплуатации 7 лет все варианты ЭПС дают примерно одинаковые результаты. При большем сроке эксплуатации, например 10 лет, ЭПС3 будет иметь более высокие показатели. Можно уверенно утверждать, что при использовании варианта ЭПС3 аварийные разрывы трубопроводов из-за гидравлических ударов могут быть сведены к минимуму. И это еще один весомый аргумент за применение систем с использованием преобразователей частоты для каждого электропривода насосных агрегатов при их параллельной работе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Развитие энергосберегающих электроприводных систем и способ повышение их эффективности в технологиях / М. П. Белов, Р. А. Кахоров, В. А. Новиков, А. А. Прокопов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 5. С. 78–89.

2. Каргин С. А. Анализ потерь электроэнергии при работе группы насосов, оснащенных регулируемым приводом // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. № 3. С. 12–18.

3. Сербин Ю. В., Прокопов А. А., Бугров В. П. Параллельная работа насосных агрегатов при использовании технологии частотного регулирования // Информ. бюл. инженерного центра «Арт». 2007. № 2. С. 57–65.

4. Математические модели электроприводных систем насосных агрегатов и станций / А. А. Проко-

пов, Р. А. Кахоров, В. А. Новиков, М. П. Белов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 10. С. 44–54.

5. Лезнов Б. С. Методика оценки эффективности применения регулируемого электропривода в водопроводных и канализационных насосных установках. М.: Машиностроение, 2011. 88 с.

6. Сайт компании ООО «Данфосс». URL: <http://www.danfoss.ru> (дата обращения 18.02.18).

A. A. Prokopov, R. A. Kakhorov, V. A. Novikov, T. E. Belyayev  
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

## VARIATIVE OPTIMIZATION OF ELECTRIC DRIVE SYSTEMS PUMPING UNITS

*Presents the results of variative optimization electric drive systems of pumping units at their autonomous and parallel operation. Formulated private and generalized optimization criteria. The method is proposed of decision-making on the optimal variant of the system, which uses a variative base of various models of system components, presented in the form of mathematical modules and blocks covering different solutions adapted to the pumping units. An example of energy-dynamic model of electric drive system for two parallel pumping units is given. The feasibility study of the three variants of the systems was performed, presented in the form of a final table comparing the relative indicators of their efficiency. The prospective of application of systems with use of frequency converters for each electric drive of pumping units at their parallel operation are shown.*

**Electric drive systems of pumping units at autonomous and parallel operation, variants of construction and modes operation of systems, mathematical descriptions of dynamic and energy processes, decision making about the optimal variant of the system on the total alternatives**

УДК 621.313

М. А. Ваганов, И. А. Бабская

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Угловые характеристики синхронного реактивного двигателя и его перегрузочная способность

*Учет активного сопротивления обмотки статора синхронного реактивного двигателя показал, что в действительности электромагнитный момент данного двигателя содержит вопреки сложившемуся мнению не одну, а три составляющих. Одна из новых составляющих не зависит от угла нагрузки двигателя и отрицательна, т. е. является тормозной, а вторая составляющая оказывается гармонической функцией двойного угла нагрузки и положительна. Амплитуды этих новых составляющих, как и амплитуда известной составляющей, зависят от индуктивного сопротивления обмотки статора двигателя по продольной оси и сравнительно быстро затухают при его увеличении, т. е. при повышении мощности двигателя. С другой стороны, учет указанного активного сопротивления имеет своим следствием появление электрических потерь в обмотке статора, что позволяет ввести в рассмотрение электрический КПД обмотки статора. При этом оказывается, что при некотором значении угла нагрузки двигателя этот КПД достигает максимума при вполне приемлемом значении его перегрузочной способности. Все это, в конечном итоге, позволяет спроектировать синхронный реактивный двигатель с оптимальной поперечной геометрией, обеспечивающей высокий уровень использования его активных материалов относительно электромагнитного момента, а также с заданной перегрузочной способностью при максимальном электрическом КПД обмотки статора.*

**Синхронный реактивный двигатель, угловые характеристики, максимальный КПД, коэффициент мощности, потребляемая мощность, электромагнитная мощность, электромагнитный момент, оптимальная поперечная геометрия, перегрузочная способность**

Обычно как при расчете, так и при теоретическом исследовании синхронных явнополюсных двигателей, в том числе и синхронных реактив-

ных (СРД), не учитывается активное сопротивление  $\eta$  обмотки статора, имея в виду, что указанное сопротивление существенно меньше син-