

Вариативная оптимизация электроприводных систем насосных станций

Р. А. Кахоров¹, В. А. Новиков², А. А. Прокопов³, А. М. Белов⁴

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹rustam-kahorov-2226@mail.ru, ²vlnov@list.ru, ³icartp@mail.ru, ⁴sana199706@mail.ru

Аннотация. В докладе дан метод решение задачи структурного синтеза электроприводных систем насосных станций. Сформулированы частные и обобщенные критерии оптимизации. Предложена методика принятия решения об оптимальном варианте. Представлены результаты вариативной оптимизации электроприводных систем.

Ключевые слова: электроприводные системы насосных станций; структурный синтез; принятие решения об оптимальном варианте системы по совокупности альтернатив

I. ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ ОБ ОПТИМАЛЬНОМ ВАРИАНТЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДНОЙ СИСТЕМЫ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ

Комплексным решением задачи об оптимальном варианте электроприводных систем (ЭПС) насосных станций (НС) является решение с использованием микро- и макромоделей систем в виде математических описаний и энергодинамических структурных схем вариантов выполнения ЭПС, типовых режимов работы насосных агрегатов (НА) и НС и типовых временных графиков расхода жидкости в магистрали. В зависимости от горизонта исследования используются минутные, часовые, суточные, месячные и др. 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.

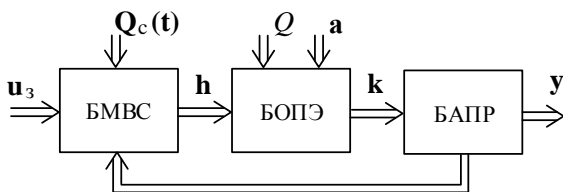


Рис. 1.

Эффективность НА и НС при их оснащении современными системами электропривода и автоматизации проявляется в трех главных составляющих: 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; обеспечение оптимальных решений по минимизации

энергозатрат; оптимизация решений по созданию комплексов управления НС и оптимизация процессов при их эксплуатации, используя оценки показателей эффективности выполнения заданной технологии.

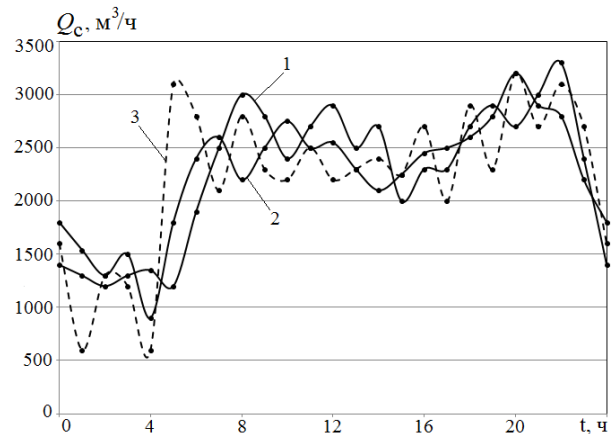


Рис. 2.

Сформулированные выше 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 технологии водоснабжения, соответствия подачи расходу жидкости в магистрали, определяющего производительность НС, электропотребление, стоимости. Другие частные критерии, оценивающие надежность, сложность, массу и габаритные размеры учитываются в виде ограничений. 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 важной оценкой является цена 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 первая и третья виды оценок. Оба вида этих оценок вносятся в оценки трех ранее названных частных критериев. Таким образом, обобщенным критерием на стадии проектирования определяется 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 выше оценки, записывается 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 $q_i(\mathbf{a}_i)$, $q_j(\mathbf{a}_j)$, $q_f(\mathbf{a}_f)$ – оценки соответственно производительности, качества технологии водоснабжения, энергопотребление при большом числе вариантов выполнения ЭПС по каждому виду оценок; B_i , B_j , B_f – весовые коэффициенты оценок; \mathbf{a} – вектор варьируемых переменных, $\mathbf{a} = [\mathbf{a}_i, \mathbf{a}_j, \mathbf{a}_f]$; $i = \overline{1, k}$; $j = \overline{1, n}$; $f = \overline{1, h}$.

Подобный критерий используется не только при оптимизации на этапе проектирования, но и при автоматической оптимизации на этапе эксплуатации систем. В автоматическом режиме осуществляется минимизация обобщенного критерия оптимизации с учетом энергетических и технологических ограничений.

Принимая во внимание большое влияние производительности на цену 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 магистральной (среднеквадратичные значения отклонений давлений 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. В таком случае 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, кроме q_f .

В этом случае 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:

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

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

1. формирование h вариантов решений (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 [2], составленной в соответствии с классификацией компонент 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 значений принимаются значения, указанные в техническом задании, и значения, указанные 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 ценой является усредненная цена электрооборудования, сложившаяся на рынке в настоящий момент времени, а варьируемыми переменными, по которым выполняется оптимизация систем – обобщенные нормированные оценки параметров типовых приводов;
7. по итогам оптимизации всех k вариантов систем принятие решения о базовом варианте ЭПС для дальнейшего проектирования. 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 выполнять математическое описание гидравлической подсистемы, включающей в себя параллельно работающие НА, объединенные входными и выходными коллекторами и общими трубопроводами (магистральями).

II. СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ЭПС НС

При переходе от h вариантов выполнения ЭПС к k вариантам целесообразно использовать метод морфологического синтеза структуры ЭПС НС, который позволяет найти и систематизировать возможные варианты построения системы. Средством, описывающим обобщенную структуру систем, служит морфологическая таблица.

Если рассмотреть возможные альтернативы выполнения ЭПС НС по структуре силовой электротехнической части, структуре системы управления, расположению датчика давления (ДД), наличию регуляторов давления (РД), скорости (РС) и соотношения моментов (PCM), то получим морфологическую модель в виде таблицы. Эту модель можно представить в виде морфологической матрицы через цифровые обозначения, где первая цифра обозначает признак, а вторая и остальные цифры – вариант его реализации (альтернативу).

ТАБЛИЦА 1

Структура системы управления			Структура силовой части			
1. Скалярное управление	1. ДД на выходе насоса	1. РД	ЭПС1	ЭПС2	ЭПС3	ЭПС4
		2. РД и РС	1.1.1.1	2.1.1.1	3.1.1.1	4.1.1.1
	2. ДД на выходе коллектора	1. РД	1.1.1.2	2.1.1.2	3.1.1.2	4.1.1.2
		2. РД и РС	1.1.2.1	2.1.2.1	3.1.2.1	4.1.2.1
2. Векторное управление	1. ДД на выходе насоса	2. РД и РС	1.1.2.2	2.1.2.2	3.1.2.2	4.1.2.2
		1. РД	1.2.1.1	2.2.1.1	3.2.1.1	4.2.1.1
		2. РД и РС	1.2.1.2	2.2.1.2	3.2.1.2	4.2.1.2
	2. ДД на выходе коллектора	3.РД, РС и PCM	0	0	3.2.1.3	4.2.1.3
		1. РД	1.2.2.1	2.2.2.1	3.2.2.1	4.2.2.1
		2. РД и РС	1.2.2.2	2.2.2.2	3.2.2.2	4.2.2.2
		3.РД, РС и PCM	0	0	3.2.3.3	4.2.2.3

Матрица состоит в свернутом виде из четырех матриц:

$$\mathbf{M}_2 = \mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2 + \mathbf{M}_3 + \mathbf{M}_4, \quad (4)$$

где $\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \mathbf{M}_3, \mathbf{M}_4$ – соответственно морфологические матрицы, отображающие альтернативы:

- ЭПС1. С использованием одного преобразователя частоты (ПЧ) на группу электроприводов НА и коммутационных устройств подключения электроприводов на ПЧ и питающую сеть.

- ЭПС2. Тоже, но с применением ПЧ и устройств плавного пуска (УПП).
- ЭПС3. С использованием ПЧ для каждого электропривода НА и логических модулей подключения и отключения НА.
- ЭПС4. Применение двух, трех ПЧ, каждый из которых обеспечивает управление двумя, тремя группами НА.

В развернутом виде матрица (4) с учетом конфиденциальности, заложенной в нее информации будет выглядеть следующим образом:

$$M_{\Sigma} = \begin{bmatrix} |1.1.1.1| & |2.1.1.1| & |3.1.1.1| & |4.1.1.1| \\ |1.1.1.2| & |2.1.1.2| & |3.1.1.2| & |4.1.1.2| \\ |1.1.2.1| & |2.1.2.1| & |3.1.2.1| & |4.1.2.1| \\ |1.1.2.2| & |2.1.2.2| & |3.1.2.2| & |4.1.2.2| \\ |1.2.1.1| & |2.2.1.1| & |3.2.1.1| & |4.2.1.1| \\ |1.2.1.2| & |2.2.1.2| & |3.2.1.2| & |4.2.1.2| \\ |0| & |0| & |3.2.1.3| & |4.2.1.3| \\ |1.2.2.1| & |2.2.2.1| & |3.2.2.1| & |4.2.2.1| \\ |1.2.2.2| & |2.2.2.2| & |3.2.2.2| & |4.2.2.2| \\ |0| & |0| & |3.2.3.3| & |4.2.2.3| \end{bmatrix}$$

Каждый вариант решения соответствует своему сочетанию альтернатив и записан в виде морфологической формулы, отражающей определенные требования к структуре компонок. Подобного вида морфологические формулы являются обобщенными, поскольку каждая из них представляет собой некоторое множество компонок, удовлетворяющих условию (признаку) отбора:

$$\begin{aligned} X_1 &= |1.1.1.1| \wedge |1.1.2.1| \wedge |1.2.1.1| \wedge |1.2.2.1| \\ X_2 &= |2.1.1.1| \wedge |2.1.2.1| \wedge |2.2.1.1| \wedge |2.2.2.1| \\ X_3 &= |3.1.1.2| \wedge |3.1.2.2| \wedge |3.2.1.3| \wedge |3.2.2.3| \\ X_4 &= |4.1.2.1| \wedge |4.1.2.2| \wedge |4.2.2.1| \wedge |4.2.2.2| \end{aligned}$$

Результатом окончания морфологического синтеза является сформированный набор факторов, подобранных таким образом, чтобы обеспечить заданные статические и динамические значения давлений при произвольном изменении расхода НС и минимального электропотребления.

III. РАСЧЕТНО-МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВАРИАНТОВ ЭПС

Для рассматриваемых вариантов ЭПС выполнены математические описания, расчеты и модельные исследования в среде MATLAB-Simulink с оценками их динамической и энергетической эффективности.

Синтез параметров регуляторов в контурах каскадного регулирования электромагнитных, механических и гидравлических переменных выполняется с использованием традиционных методов и методов

оптимизации из библиотеки MATLAB-Simulink. Использовались макро- и микромоделли систем. Динамические процессы в НС при быстрых изменениях управляющих и возмущающих воздействий показаны на рис. 3.

На рис. 3 показаны графики подач, токов и частот вращения двигателей НА без выравнивания нагрузок (рис. 3 а) и с выравниванием нагрузок (рис. 3 б).

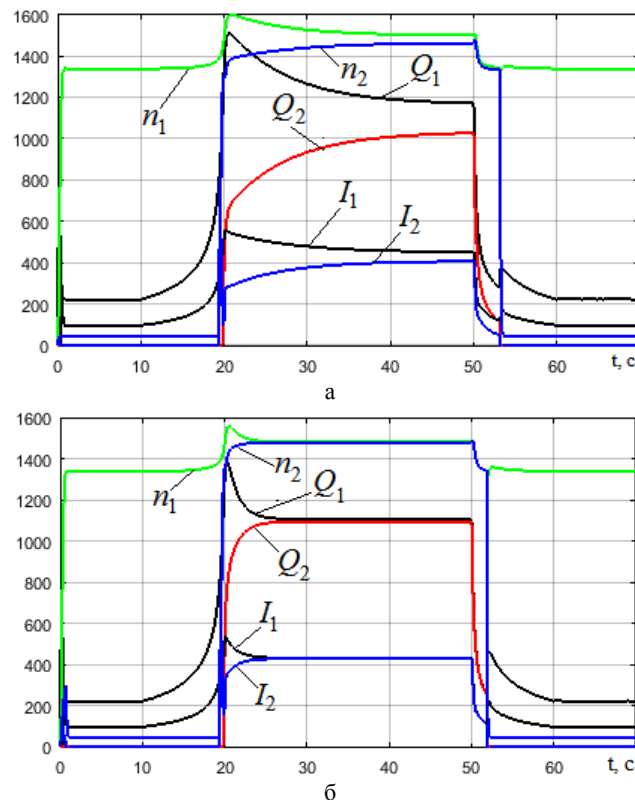


Рис. 3.

На основании изложенной выше методики морфологического синтеза и выполненных расчетно-модельных исследований вариантов ЭПС НС получены оценки относительных показателей их эффективности на основных этапах жизненного цикла. Оптимальным вариантом является вариант ЭПС3 с векторным управлением и регуляторами РД, РС, РСМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Белов М.П., Новиков В.А. Оптимизация интегрированных электроприводных систем механизмов, агрегатов, машин и комплексов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 300 с.
- [2] Прокопов А.А., Кахоров Р.А., Новиков В.А., Белов М.П. Математические модели электроприводных систем насосных агрегатов и станций // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017., вып. 10. С. 44-54.