$$\Delta X_r^{(k)} = \min_{\Delta X_r^{(k)}>0} [X_r^{++} - X_r^{(k)};\quad \Delta X_r^{(k)}\Big|_{\frac{\delta F}{\delta X_r}=0};\quad \min_{\left(\frac{\delta U_i}{\delta X_r}\right)^{(k)}<0} \frac{U_i^{+} - U_i^{(k)}}{\left(\frac{\delta U_i}{\delta X_r}\right)^{(k)}};\quad \min_{\left(\frac{\delta U_i}{\delta X_r}\right)^{(k)}>0} \frac{U_i^{++} - U_i^{(k)}}{\left(\frac{\delta U_i}{\delta X_r}\right)^{(k)}}].$$

Заключение

Алгоритм оптимизации режима ЭЭС тестируется реальной распределительной электросетью Нижневартовского предприятия электрических сетей. Результаты расчетов показали, что этот метод оптимизации режима функционирования ЭЭС:

– позволяет уменьшить суммарные потери мощности;

– можно применять в условиях реального времени; время вычислений 20 с.;

– обеспечивает решение, соответствующее всем техническим нормам режима ЭЭС;

– позволяет определять оптимальные регулируемые параметры системы (коэффициенты трансформации) для любой топологии и при различных параметрах системы, заданных оператором.

1. Евдокимов А.Г. Минимизация функций. Харьков. 1985. 2. Веников В.А., Журавлев В.Г., Филиппова Т.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем. М. 1981. 3. Идельчик В.И., Новиков А.С., Паламарчук С.И. //Влияние погрешностей информации на расчеты оптимальных режимов// Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1982. № 2. С. 22-30.

УДК 681.5.015

П. Шулик

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

ЭФФЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

Пропонується ефективний алгоритм оцінювання параметрів елементів насосних станцій систем водопостачання і водовідведення. Наведена математична модель насосної станції в режимі натурного експерименту. Сформульована задача оцінювання параметрів енергетичних характеристик насосних агрегатів, гідравлічних опорів затворів та коефіцієнтів ефективності ділянок трубопроводу. Розглянуто приклад розв'язання цієї задачі на реальних даних.

The effective parameter estimation algorithm of pump stations members of water-supply and drainage systems is offered. The mathematical model of a pump station in a condition of a natural experiment is presented. The formulation of parameter estimation problem of performances of motor pumps, hydraulic resistances of shutters and effectiveness ratio of leases of the pipe line is given. The example of a solution of this problem on actual dates is reviewed.

Введение. Практическое внедрение новых информационных ресурсосберегающих и экологически безопасных технологий в системах водоснабжения и водоотведения привело к необходимости оперативного оценивания параметров характеристик элементов насосных станций (НС): насосных агрегатов (НА), затворов, участков трубопровода. Знание фактических оценок этих параметров позволяет наиболее точно оптимизировать режимы работы насосной станции, выбрать оптимальный способ регулирования подачи воды. Таким образом, существенно снижается энергопотребление насосных станций и другие эксплуатационные затраты. В работе рассматривается задача оценивания фактических параметров рабочих характеристик НА, затворов и участков трубопровода. Используется полный набор значений, полученных в результате натурного эксперимента, параметров, что позволяет обеспечить для определенного промежутка времени построение наиболее адекватных моделей характеристик НА, затворов и участков трубопровода.

1. Математические модели элементов НС

Насосный агрегат. НА НС характеризуется взаимосвязанной системой зависимостей между основными режимными и энергетическими параметрами, называемыми рабочими характеристиками НА. Рабочими характеристиками НА считаются зависимости напора – h, мощности–N и КПД – h от расхода Q при постоянной частоте вращения привода электродвигателя НА. Зависимость напор - расход (h - Q) называют напорной характеристикой насосного агрегата. Зависимости мощность - расход (N - Q) и КПД - расход (h - Q) называют энергетическими характеристиками НА. При вводе в эксплуатацию каждый НА проходит испытания, во время которых снимаются вышеуказанные зависимости. Эти характеристики именуются паспортными. Однако в процессе эксплуатации НА изнашиваются их узлы и механизмы, поэтому реальные характеристики отличаются от паспортных.

Характеристики НА описываются полиномами второй степени (формулы Е.А.Прагера):

$$h_{НА}=a0+a1\cdot Q+a2\cdot Q^2, \tag{1}$$

$$N=c0+c1\cdot Q+c2\cdot Q^2, \tag{2}$$

$$\eta=d0+d1\cdot Q+d2\cdot Q^2, \tag{3}$$

где $h_{НА}$ – напор, создаваемый НА м.

Таким образом, параметрическая идентификация НА заключается в определении векторов коэффициентов аппроксимации $\bar{a}^T = [a0, a1, a2]$, $\bar{c}^T = [c0, c1, c3]$ $\bar{d}^T = [d0, d1, d3]$ его рабочих характеристик.

Затворы. Затворы или регулируемые задвижки позволяют регулировать соотношение между напором и расходом и применяются в основном для регулирования режимов работы насосных агрегатов с постоянной частотой вращения.

Зависимость между падением напора на затворе $h_з$, расходом Q и положением штока (или углом поворота оси) $E_з$ имеет вид:

$$h_3 = C\cdot \mathrm{sqn}(Q)\cdot |Q|/E_3{}^2, \tag{8}$$

где C – гидравлическое сопротивление затвора в положении «открыто»; $E_з[0,1]$ – положение штока затвора, причем $E_з = 1$ в положении «открыто», $E_з = 0$ в положении «закрыто».

Гидравлическое сопротивление в выражении (8) в общем случае зависит от геометрических размеров затвора, режима движения жидкости. Однако в связи со сложной геометрической структурой внутренней поверхности затвора и его длительной эксплуатацией численное значение C неизвестно и должно быть оценено по результатам натурного эксперимента.

Таким образом, параметрическая идентификация затвора сводится к определению численного значения гидравлическое сопротивления C.

Участки трубопровода. Математическая модель участка трубопровода определяется зависимостью потери напора h от расхода Q. Эмпирические зависимости h=h(Q) для различных типов труб представлены в [1] и в большинстве случаев могут быть аппроксимированы такой формулой [2]:

$$h = \operatorname{sqn}(Q) \cdot r \cdot |Q|^{\chi}, \tag{9}$$

где sgn(Q) – знак Q, r – гидравлическое сопротивление участка трубопровода, χ – коэффициент нелинейности участка трубопровода.

Гидравлическое сопротивление в выражении (9) в общем случае зависит от геометрических размеров участка – длины L , диаметра d и режима движения жидкости.

Однако вследствие старения участков, коррозии и образования отложений на трубах зависимость (9) зачастую не выполняется, и поэтому целесообразно в (9) ввести поправочный коэффициент эффективности E, идентичный степени открытия в затворе и характеризующий степень старения участка:

$$h = \operatorname{sqn}(Q) \cdot r \cdot |Q|^{\chi} / E^2 . \tag{10}$$

Таким образом, параметрическая идентификация участков трубопровода сводится к определению численного значения коэффициентов эффективности E.

2. Математическая постановка задачи параметрической идентификации элементов насосных станций

На содержательном уровне рассматриваемая задача заключается в том, чтобы по результатам K_r векторов измерений переменных состояния [3]:

$$\tilde{X}_m^T = \left[\tilde{h}_{ВХ}^{(m)}; \tilde{h}_{ВЫХ}^{(m)}; \tilde{h}_{НАвх}^{(m)}; \tilde{h}_{НАвых}^{(m)}; \tilde{h}_{Звх}^{(m)}; \tilde{h}_{Звых}^{(m)}; \tilde{Q}^{(m)}; \tilde{N}^{(m)}\right],\ m=1, ..., K_r, \tag{11}$$

где K_r – количество режимов работы i-го НА, оценить коэффициенты аппроксимации $\bar{a}_i^T = [a0_i, a1_i, a2_i]$, $\bar{c}_i^T = [c0_i, c1_i, c3_i]$, $\bar{d}_i^T = [d0_i, d1_i, d3_i]$ характеристик i-го НА НС, гидравлическое сопротивление C соответствующего i-му НА затвора и коэффициенты эффективности E_j j-го количества участков трубопровода, соединяющих i-й НА и затвор с входом и выходом НС.

Вектор (11) содержит такие измеренные значения на m-м режиме: напора на входе НС, напора на выходе НС, напора на входе i-го НА, напора на входе i-го НА, напора на выходе i-го НА, напора на входе затвора, напора на выходе затвора, расхода, мощности на валу электродвигателя привода НА.

Таким образом, все измеряемые ретроспективные данные (11), используемые в задаче, должны быть получены в результате натурного эксперимента на K_r режимах работы i-го НА. На НС должны выполняться такие условия:

- все другие НА НС, кроме i-го, должны быть отключены;
- сеть НС должна быть сконфигурирована так: а)должен работать один вход и один выход НС; б) вход и выход НС должен соединять один путь;

• измерения $\tilde{X}_m^T$ должны охватывать максимально возможный диапазон изменения расхода Q и степени открытия затвора.

Следует отметить, что в реальных условиях нет особой необходимости оценивать коэффициенты эффективности каждого участка трубопровода, целесообразнее цепочку из нескольких отрезков трубопровода заменить одним эквивалентным участком с эквивалентным диаметром и суммарной длиной. Например, эквивалентный участок от входа НС до входа НА, эквивалентный участок от выхода НА до входа затвора и т. д. Такой подход позволяет значительно сократить размерность рассматриваемой задачи.

Учитывая все вышеотмеченные условия, а так же то, что рассматриваемый участок НС представляет собой инженерную сеть [2] и процесс потокораспределения на каждом K_r режиме является установившимся [2], математическую модель установившегося потокораспределения НС при натурном эксперименте можно представить в виде:

$$h_{вх}^{(m)} - h_{вых}^{(m)} - \sum_{k\in M} \left(\frac{sgn(Q^{(m)}) r_k \left|Q^{(m)}\right|^{\chi_k}}{E_k^2}\right) - \left(C \cdot sgn(Q) \frac{\left|Q^{(m)}\right|}{E_{3m}{}^2}\right) +$$

$$+ (a0 + a1 \cdot Q^{(m)} + a2 \cdot (Q^{(m)})^2) = 0, \qquad (12)$$

где M – множество пассивных участков НС, участвующих в натурном эксперименте.

Зависимость (12) составлена по II-му закону Кирхгофа и содержит уравнения h=h(Q) для НА, затвора и участков трубопровода: (1), (9) и (10). Уравнение (12) совместно с зависимостями (2), (3) представляет собой математическую модель НС на m-м режиме работы при осуществлении натурного эксперимента.

Для однозначного определения вектора коэффициентов $\bar{d}^T = [d0, d1, d3]$ необходимо знать значение h на каждом режиме НА, однако КПД на НС не измеряется. Тем не менее h можно выразить через мощность N, используя такое соотношение [4]:

$$\eta = (h_{НАвых} - h_{НАвх}) * Q / N. \qquad (13)$$

Набор измеренных значений (12) позволяет сократить количество неизвестных в системе повторенных K_r раз уравнений (2),(3),(12). Для определения параметров всех участков НС, участвующих в эксперименте, необходимо, чтобы, как минимум, количество неизвестных равнялось количеству уравнений. В этом случае параметры участков определяются в результате решения системы повторенных K_r раз уравнений (2),(3),(12), но тогда не учитываются ошибки измерений (11). Для того, чтобы учесть и минимизировать ошибки измерений, необходимо, чтобы количество неизвестных было меньше от количества уравнений математической модели НС, в этом случае система повторенных K_r раз уравнений (2),(3),(12) будет переопределенной и ее решение можно найти только в статистическом смысле. Тогда, используя метод максимального правдоподобия, учитывая то, что ошибки измерений независимы друг от друга и распределены по нормальному закону с известными дисперсиями и нулевыми математическими ожиданиями, целевую функцию задачи можно представить в виде:

$$f=\sum_{m=1}^{Kr}\frac{\left(\tilde{h}_{3вх}^{(m)}-h_{3вых}^{(m)}-C\cdot\mathrm{sgn}(Q)\left|Q^{(m)}\right|/E_{3m}{}^{2}\right)^{2}}{\sigma_{h_3}^{2}}+\sum_{m=1}^{Kr}\frac{\left(\tilde{N}^{(m)}-N^{(m)}\right)^{2}}{\sigma_N^{2}}+$$

$$+\sum_{m=1}^{Kr}\sum_{k\in M}\frac{\left(\tilde{h}_{k}^{(m)}-\mathrm{sqn}\,(Q^{(m)})\cdot r_k\cdot\left|Q^{(m)}\right|^{\chi}/E_k{}^{2}\right)^{2}}{\sigma_h^{2}}+$$

$$+\sum_{m=1}^{Kr}\frac{\left(\tilde{h}_{вх}^{(m)}-h_{вх}^{(m)}\right)^{2}}{\sigma_{h_{вх}}^{2}}+\sum_{m=1}^{Kr}\frac{\left(\tilde{h}_{вых}^{(m)}-h_{вых}^{(m)}\right)^{2}}{\sigma_{h_{вых}}^{2}}+\sum_{m=1}^{Kr}\frac{\left(\tilde{h}_{НАвых}^{(m)}-\tilde{h}_{НАвх}^{(m)}-h_{НА}^{(m)}\right)^{2}}{\sigma_{h_{на}}^{2}}+$$

$$\sum_{m=1}^{Kr}\frac{\left((\tilde{h}_{НАвых}^{(m)}-h_{НАвх}^{(m)})\cdot q^{(i)}/\tilde{N}^{(m)}-\eta^{(m)}\right)^{2}}{\sigma_\eta^{2}}\longrightarrow\min_{\beta,x\in\Omega,\ m=1,2,..K_r}\qquad(14)$$

В (14) W – ограничения, состоящие из уравнений (2),(3),(12), повторенных K_r раз; b – вектор, содержащий коэффициенты аппроксимации характеристик НА, гидравлическое сопротивление C затвора и коэффициенты аппроксимации участков трубопровода; x – вектор, содержащий все переменные ограничений W; $\sigma^2_{h_{вх}}, \sigma^2_{h_{вых}}, \sigma^2_{h_{на}}, \sigma^2_{h_3}, \sigma^2_N, \sigma^2_\eta$ – дисперсии ошибок измерения соответствующих величин. $\tilde{h}_k^{(m)}$ – падения напоров на участках трубопровода (легко определяются по измерениям (12)).

Для того, чтобы задача (14), (2),(3),(12) была решаемой, необходимо выполнить измерения как минимум для трех режимов K_r.

При подстановке уравнений (2),(3),(12) в (14) задача сводится к задаче безусловной оптимизации.

3. Пример решения задачи

Приведем результаты решения задачи параметрической идентификации для НА типа 16Ф-7 , затвора, трех эквивалентных участков трубопровода, соединяющих НА и затвор с входом и выходом НС для K_r=3. Параметры НА: паспортные значения коэффициентов: a0= 67,30357, a1= -0,01626785 , a2= -8,035714E-6, c0= 120, c1=0,6, c2= 7,837E-13, d0= 9,958, d1= 0,228088, d2= -0,0002276727. Параметры участков трубопровода: зависимость h-Q для всех 3 участков: $1{,}79\cdot10^{-9}\cdot L\cdot|Q|\cdot Q\cdot(1000/d)^{5{,}3}/E^2$ (сталь) [1], где L=400мм и d=5м для 1 и 2 участков, L=600мм и d=5м для 3 участка. Измеренные значения (12): [2; 65; 1,94; 65,4; 65,34; 65; 107,62; 185,8], [1,9; 60; 1,4; 60,96; 60,47; 60,03; 306,63; 311,18], [3,8; 52; 1,88; 54,46; 52,55; 52,13; 107,62; 497,61], при этом E_{3l}=0,2, E_{3l}=0,5, E_{3l}=1. В результате расчетов были получены такие оценки действительных параметров элементов НС: a0=65,251; a1=-0,0159742; a2=-8,12287e-06; c0=118.521; c1=0.625952; c3=5.49233e-06; d0=9.09159; d1=0.227146; d3=-0.00022648; C=1.08695e-06; E_1=0.445168; E_2=0.446598; E_3=0.850312. Из результатов следует, что реальные характеристики НА отличаются от паспортных в худшую сторону, пропускная способность участков уменьшилась по сравнению с первоначальной.

1. Андрияшев М.М. Гидравлические расчеты водоводов и водопроводных сетей-М. 1974 -107 с. 2. Евдокимов А. Г., Дубровский В.В., Тевяшев А. Д. Потоко-распределение в инженерных сетях. –М. 1979. 3. Евдокимов А. Г., Тевяшев А. Д. Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях. – Харьков: 1980. 3. Абрамов Н.Н. Водоснабжение. -М. 1974.

УДК 681.327.12.001.362; 519.7; 519.81

В. Адаменко, А. Адаменко
Харьковский национальный университет радиоэлектроники,
Украинско-словенское предприятие АОЗТ СП "МонИс"

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ СТАЦИОНАРНОГО НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ТРАНСПОРТА ГАЗА В ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ С АКТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Розглянуто проблему ідентифікації моделей стаціонарного неізотермічного режиму транспорту газу в газотранспортних системах (ГТС) з активними елементами. Наведено результати досліджень математичних моделей ГТС, що включають модифікацію усіх основних елементів системи, і розроблених методів ідентифікації, ефективність яких було досліджено на реальних даних.

The problem of model identification of stationary non-isothermal regime of gas transport with active elements is considered. The research results of mathematical models of gas trans-port system is applied. It is modification of basic elements of system and development of effec-tive methods of identification.

Введение. В настоящее время особо актуальными являются проблемы, связанные с учетом фактических расходов газа по каждому потребителю и оцениванием фактических режимов работы ГТС, т.к. определение фактических параметров газовых потоков (расходов, давлений и температур газа на всех элементах ГТС) позволяет принимать эффективные решения по оперативному управлению ГТС. ГТС – это сложная система, состоящая из элементов, соединенных между собой, цель которой – управление транспортом и распределением природного газа. Состояние ГТС описывается математической моделью установившегося потокораспределения (УПР); для стационарного неизотермического режима транспорта газа в ГТС используется такой класс моделей:

$$\mathbf{Model} = (\mathbf{Var}, \mathbf{Eq}, \mathbf{F}),$$

где $\mathbf{Var} = \mathbf{Var}_{gas} \cup \mathbf{Var}_{el}$ – множество переменных модели ГТС (элемента ГТС); $\mathbf{Var}_{gas}$ – множество переменных модели ГТС (элемента ГТС), характеризующих состояние и состав