

УДК 681.5:519.6:621.64

Ю. М. ГУСЕВ, Р. Р. ГАФАРОВ, О. Е. ДАНИЛИН

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ УЧАСТКА МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Предлагается подход к решению задачи оптимизации работы нефтеперекачивающих станций в составе магистральных нефтепроводов. Решение задачи основывается на построении двухуровневой системы управления процессом перекачки нефти. Нижний уровень обеспечивает оптимизацию работы отдельных магистральных насосных агрегатов с использованием их математических моделей. Верхний уровень оптимизирует работу всех нефтеперекачивающих станций в составе магистрального нефтепровода. Генетический алгоритм обеспечивает эффективное решение поставленной задачи при работе с большим количеством управляемых параметров. *Генетический алгоритм; двухуровневая система управления; математическая модель; алгоритм управления*

Современные объекты транспортировки нефти представляют собой сложный комплекс, состоящий из нефтеперекачивающих станций (НПС), линейно-производственных диспетчерских станций (ЛПДС), магистральных нефтепроводов (МНП) и совокупности дополнительных, обслуживающих элементов этой системы (подстанции, гаражи, системы обеспечения связи и т. д.). Весь этот комплекс работает как единое целое, выполняя свою главную функцию — транспортировку нефти от нефтедобывающих компаний до потребителей нефти. От того, насколько качественно будет выполнена эта функция, зависит стабильность поставок нефти и экологическая безопасность ее перекачки. Перекачка нефти является технически сложным процессом. Основные задачи — доставка нефти от мест ее добычи к потребителям согласно плану поставок по объемам и установленным срокам.

Управление процессом перекачки состоит из выбора и выполнения автоматизированной системой управления (АСУ) определенных режимов работы системы нефтепроводов. Критерием оптимальности управления процессом перекачки нефти может служить стоимость электроэнергии, израсходованной на перекачку. Задача оптимального управления процессом перекачки состоит в определении режимов работы системы, минимизирующих стоимость израсходованной электроэнергии при обязательном выполнении плана

приема и сдачи нефти на некоторый плановый период.

В настоящее время выбор режима перекачки нефти осуществляется следующим образом. Сначала определяются объемы нефти, которые следует доставить из пункта приема в пункт сдачи. Затем, исходя из реальной пропускной способности магистрального нефтепровода, рассчитываются сроки ее доставки. Зная объемы и сроки доставки, а также технические характеристики оборудования, осуществляющего перекачку, можно рассчитать технологические параметры процесса перекачки нефти по МНП.

Из вышеперечисленного виден главный недостаток существующего метода расчета — он ведется по паспортным значениям характеристик магистральных насосных агрегатов (МНА), которые не равны точным значениям технических характеристик МНА (напор насоса, его производительность, КПД насоса при номинальной производительности, номинальная частота вращения вала насоса и т. д.). Это означает, что режим работы магистральных насосных агрегатов будет неоптимальным (частота вращения вала насоса больше или меньше требуемого значения), что, в свою очередь, приведет к перерасходу электроэнергии, питающей МНА (в худшем случае возникает падение производительности насоса), что увеличивает себестоимость перекачки. Кроме того, наибольший КПД насоса (входящего в состав МНА) достигается лишь

при номинальном значении частоты вращения вала, что не всегда реализуемо. Поэтому расчет и поддержание оптимального режима работы нефтеперекачивающей станции является важнейшей задачей, которую должна решать АСУ [1].

1. СТРУКТУРА АСУ

В работе рассматривается подход к решению задачи оптимизации процесса перекачки нефти по магистральному нефтепроводу с целью снижения себестоимости ее перекачки. Обозначенная проблема на сегодняшний день актуальна, так как стоимость электроэнергии становится основной статьёй расхода нефтеперекачивающих станций. Кроме того, оптимизация режима работы оборудования позволит увеличить интервалы между профилактическими работами на магистральных насосных агрегатах, каждый из которых состоит из насоса, электрического двигателя и механической передачи. Это снизит себестоимость их обслуживания.

Для решения поставленной задачи предлагается разделить АСУ на два уровня — верхний и нижний [2]. Нижний уровень находится непосредственно на нефтеперекачивающей станции. Решаемые задачи — расчет коэффициентов аппроксимации полиномов математической модели одного МНА; расчет значений числа оборотов двигателя магистральных насосных агрегатов насосного зала (обычно 4 насоса); хранение полученных значений (полученные начальные значения система управления должна не использовать, а передавать на верхний уровень). На верхнем уровне управления собираются все значения, вычисленные на нижних уровнях, распределенных по всему участку нефтепровода. Далее рассчитываются значения числа оборотов каждого МНА с учетом того, что на протяжении всего участка производительность Q должна быть одинакова и напор на выходе НПС должен быть не ниже определенного уровня. После всех вычислений верхний уровень обеспечивает передачу данных на нижние уровни, где эти данные запоминаются и используются как рабочие. На рис. 1 изображена схема, демонстрирующая разделение АСУ на два уровня, оптимизируемые параметры и их информационные потоки. Верхний уровень сосредоточен в одном месте — центральном диспетчерском пункте, в котором задаются параметры оптимизации (требуемые значения). Нижний уровень распределен по всем НПС магистрального нефте-

провода. Коэффициенты a_{ijk} , k_{ijk} , r_{ijk} , представленные на рис. 1, являются оптимизируемыми параметрами процесса перекачки.

Алгоритм работы АСУ:

1) в верхний уровень вводятся требуемые входные параметры: количество перекачиваемой нефти, ее физико-химические параметры, норматив потребления электроэнергии каждой НПС и/или ЛПДС, производительность участков магистрального нефтепровода, верхняя и нижняя границы давлений магистрального нефтепровода, давления входа и выхода НПС и/или ЛПДС, требуемый напор на каждом участке МНП;

2) верхний уровень, используя усредненные или паспортные значения технических параметров установленного нефтеперекачивающего оборудования, обеспечивает расчет значений числа оборотов, значений давлений входа и выхода станции каждого МНА каждого насосного зала каждой станции и отсылку этих данных на второй уровень;

3) нижний уровень принимает эти данные, обеспечивает запуск оборудования и ввод его в рабочий режим согласно полученным данным;

4) при низкой эффективности работы оборудования нижний уровень системы оптимизации станции запускает в работу алгоритм тонкой подстройки параметров перекачки, находит оптимальные значения числа оборотов всех станционных МНА и применяет их. Уточненные значения отсылаются на верхний уровень, который сохраняет их у себя для дальнейшего использования.

2. ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ

В данной работе для решения поставленной задачи предлагается использовать генетический алгоритм для оптимизации работы нефтеперекачивающих станций и всего МНП на обоих уровнях АСУ.

Генетический алгоритм представляет собой метод, отражающий естественную эволюцию методов решения проблем и, в первую очередь, задач оптимизации. Генетические алгоритмы — это процедуры поиска, основанные на механизмах естественного отбора и наследования. В них используется эволюционный принцип выживания наиболее приспособленных особей. Они отличаются от традиционных методов оптимизации несколькими базовыми элементами. В частности, генетические алгоритмы:

1) обрабатывают не значения параметров самой задачи, а их закодированную форму;

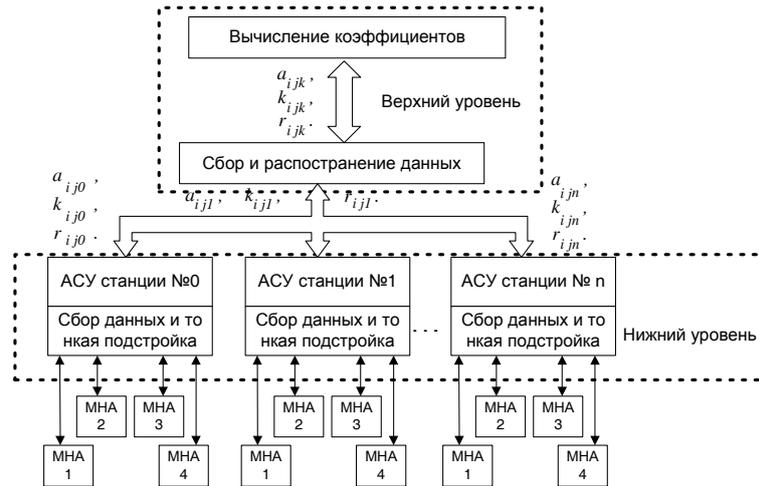


Рис. 1. Разделение АСУ на уровни

2) осуществляют поиск решения исходя не из единственной точки, а из их некоторой популяции;

3) используют только целевую функцию, а не ее производные либо иную дополнительную информацию;

4) применяют вероятностные, а не детерминированные правила выбора.

Перечисленные четыре свойства можно сформулировать также как кодирование параметров. Операции на популяциях, использование минимума информации о задаче и рандомизация операций приводят в результате к устойчивости генетических алгоритмов и к их превосходству над другими широко применяемыми технологиями [3].

При описании генетических алгоритмов используются определения, заимствованные из генетики. Например, речь идет о *популяции особей*, а в качестве базовых понятий применяются *ген*, *хромосома*, *генотип*, *фенотип*. Также используются соответствующие этим терминам определения из технического лексикона, в частности, *цель*, *двоичная последовательность*, *структура*.

Очень важным понятием в генетических алгоритмах считается *функция приспособленности (fitness function)*, иначе называемая *функцией оценки*. Она представляет меру приспособленности данной особи в популяции. Эта функция играет важнейшую роль, поскольку позволяет оценить степень приспособленности конкретных особей в популяции и выбрать из них наиболее приспособленные (т.е. имеющие наибольшие значения функции приспособленности) в соответствии с эволюционным принципом выживания «сильнейших» (лучше всего приспособившихся). Функция приспособленно-

сти также получила свое название непосредственно из генетики. Она оказывает сильное влияние на функционирование генетических алгоритмов и должна иметь точное и корректное определение. В задачах оптимизации функция приспособленности, как правило, оптимизируется (точнее говоря, максимизируется) и называется *целевой функцией*. В задачах минимизации целевая функция преобразуется, и проблема сводится к максимизации. На каждой итерации генетического алгоритма приспособленность каждой особи данной популяции оценивается при помощи функции приспособленности. На этой основе создается следующая популяция особей, составляющих множество потенциальных решений проблемы, например, задачи оптимизации. Основным достоинством генетического алгоритма является его способность проверки всего пространства поиска без риска «застревания» в локальных экстремумах [4].

3. РАБОТА ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА В СОСТАВЕ АСУ МНП

Критерием оптимальности рассчитанных значений параметров процесса перекачки нефти в решаемой задаче берется значение КПД магистрального насосного агрегата:

$$\sigma = \max(\eta_{\text{МНА}}), \quad (1)$$

где $\eta_{\text{МНА}}$ — коэффициент полезного действия МНА, состоящий из суммы КПД насоса, механической передачи и электродвигателя.

Для того, чтобы нефтеперекачивающая станция перешла на оптимальный режим работы, необходимо задать каждому МНА оптимальное значение числа оборотов электродвигателя МНА n , при котором обеспечивается требуемое значение производительности

насоса Q . Для того, чтобы определить требуемое значение производительности насоса Q , используется выражение:

$$Q = Q_{\text{ном}} \frac{n}{n_{\text{ном}}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{ном}}$ — номинальное (паспортное) значение производительности насоса МНА;

$n_{\text{ном}}$ — номинальное (паспортное) значение числа оборотов двигателя МНА;

n — заданное значение числа оборотов двигателя МНА.

Обладая значениями n и Q , необходимо вычислить значения напора H насоса МНА, КПД насоса $\eta_{\text{нас}}$ и электродвигателя $\eta_{\text{Э}}$ МНА (КПД механической передачи можно пренебречь ввиду того, что оно близко к единице и слабо меняется при изменении числа оборотов). Для этого необходимо знать зависимости $H = f(Q)$, $\eta_{\text{нас}} = f(Q)$ и $\eta_{\text{Э}} = f(Q)$, то есть необходима математическая модель МНА.

Для магистрального насосного агрегата математическая модель представлена выражениями [5]:

$$H_{jk} = a_{0jk} + a_{1jk}Q + a_{2jk}Q^2, \quad (3)$$

$$\eta_{\text{нас } jk} = k_{0jk} + k_{1jk}Q + k_{2jk}Q^2 + k_{3jk}Q^3, \quad (4)$$

$$\eta_{\text{Э } jk} = r_{0jk} + r_{1jk}K_3 + r_{2jk}K_3^2, \quad (5)$$

где a_{ijk} , k_{ijk} , r_{ijk} — коэффициенты аппроксимации полиномов математической модели одного МНА одной насосной станции, требующие оптимизации и используемые для определения технологических параметров перекачки НПС и ЛПДС;

K_3 — коэффициент загрузки электродвигателя, равный отношению мощности на валу электродвигателя $N_{\text{Э}}$ к его номинальной мощности $N_{\text{ЭН}}$:

$$K_3 = \frac{N_{\text{Э}}}{N_{\text{ЭН}}} = \frac{Q\rho gh}{N_{\text{ЭН}}\eta_{\text{н}}}, \quad (6)$$

где i — номер параметра МНА (до 10);

j — номер МНА в насосной на территории НПС или ЛПДС (до 4);

k — номер НПС или ЛПДС на участке магистрального нефтепровода (до 15 ... 20);

ρ — номер параметра МНА (до 10);

g — номер МНА в насосной на территории НПС или ЛПДС (до 4);

h — напор, развиваемый насосом при подаче (производительности) Q ;

$N_{\text{ЭН}}$ — номинальная (паспортная) мощность электродвигателя МНА.

Полином (5) определяет напорную характеристику центробежного насоса (ЦБН). Полином (6) — КПД насоса в составе МНА в зависимости от значения производительности Q . Полином (7) — КПД электродвигателя в составе МНА в зависимости от значения производительности Q . Входными данными системы управления являются напор МНА H , КПД насоса $\eta_{\text{нас}}$ и электродвигателя $\eta_{\text{Э}}$ МНА, а выходными — значение числа оборотов электродвигателя МНА n , которое вычисляется следующим способом.

Подставив выражение (2) в полиномы (3), (4) и (5), получаем следующие выражения:

$$H_{jk} = a_{0jk} + a_{1jk} \left(Q_{\text{ном}} \frac{n}{n_{\text{ном}}} \right) + a_{2jk} \left(Q_{\text{ном}} \frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^2, \quad (7)$$

$$\eta_{\text{нас } jk} = k_{0jk} + k_{1jk} \left(Q_{\text{ном}} \frac{n}{n_{\text{ном}}} \right) + k_{2jk} \left(Q_{\text{ном}} \frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^2 + k_{3jk} \left(Q_{\text{ном}} \frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^3, \quad (8)$$

$$\eta_{\text{Э } jk} = r_{0jk} + r_{1jk} \left(\frac{Q\rho gh}{N_{\text{ЭН}}\eta_{\text{н}}} \right) + r_{2jk} \left(\frac{Q\rho gh}{N_{\text{ЭН}}\eta_{\text{н}}} \right)^2. \quad (9)$$

Коэффициенты аппроксимации a_{ijk} , k_{ijk} , r_{ijk} полиномов (7)–(9) ищутся генетическим алгоритмом, используя паспортные значения как начальную точку отсчета и графики зависимостей, предоставляемых заводом-изготовителем.

Предлагается использовать канонический ГА. Во-первых, он «просматривает» все пространство поиска, не застревая в локальных экстремумах функций. Во-вторых, с увеличением n -мерности пространства поиска эффективность и, следовательно, целесообразность его применения возрастает.

В качестве генов хромосом ГА следует использовать представленные выше коэффициенты аппроксимации и значения числа оборотов привода насосов. В качестве функции

пригодности хромосом использовать выражение:

$$F_{jk} = \left(\frac{H_{jk} - H_{jk \max}}{H_{jk \max}} \right)^2 + \left(\frac{\eta_{\text{нас } jk} - \eta_{\text{нас } jk \min}}{\eta_{\text{нас } jk \min}} \right)^2 + \left(\frac{\eta_{\text{Э } jk} - \eta_{\text{Э } jk \min}}{\eta_{\text{Э } jk \min}} \right)^2, \quad (10)$$

где H_{jk} , $\eta_{\text{нас } jk}$ и $\eta_{\text{Э } jk}$ — соответственно напор, КПД насоса и электродвигателя МНА (значения i и j даны выше), измеряемые с помощью датчиков, установленных на станции (датчики давления, расходомеры и т. д.);

$H_{jk \max}$, $\eta_{\text{нас } jk \min}$ и $\eta_{\text{Э } jk \min}$ — соответственно граничные значения напора, КПД насоса и электродвигателя конкретного МНА, которые задаются человеком (оператором или диспетчером).

Хромосома с меньшим значением функции пригодности будет считаться более приспособленной.

На рис. 1 показано, что нижний уровень распределен на n АСУ станций (для существующих МНП их число равно 10 ... 12). На каждой станции четыре МНА, а для каждого МНА требуется найти до 11 коэффициентов аппроксимации. В итоге ГА должен оптимизировать не менее 440 параметров. Время, требующееся для расчета режима другими методами (градиентный метод, метод прямого перебора и др.), в этом случае возрастет до неприемлемых значений. Главное достоинство ГА в том, как было сказано выше, что он ищет оптимальное решение во всем пространстве поиска не одной переменной, как это делают большинство методов, а нескольких (которые называются популяциями). Это не только сокращает время расчета, но и позволяет обходить локальные экстремумы (в данном случае локальные минимумы, так как функция пригодности минимизируется).

На рис. 2 изображена работа ГА в составе SCADA-системы [6] НПС как нижнего уровня системы управления и оптимизации технологических параметров режима перекачки, а также работа ГА в составе верхнего уровня системы управления. Работа верхнего и нижнего уровней системы управления была рассмотрена выше. Однако техническая реализация процесса была не столь очевидна, так как не было показано, каким образом (какими техническими средствами) осуществляется управление. На рис. 2 показано, что локальный генетический алгоритм является частью

SCADA-системы. Таким образом, у ГА появляется возможность собирать входные данные с объектов управления — МНА. Сбор входных данных осуществляется следующим способом. Сначала SCADA-система дает запрос на считывание показаний с комплекса датчиков каждого МНА. Аппаратная часть ПЭВМ через систему КИПиА опрашивает все датчики МНА насосного зала. После этого ГА через SCADA-систему получает входные данные датчиков, чтобы использовать для подстройки параметров (на заключительном этапе).

Генетический алгоритм верхнего уровня в качестве входных данных использует паспортные значения МНА, установленных на станциях, для расчета режима их работы (частоту вращения вала каждого МНА). Обмен данными, как входными, так и расчетными, происходит по локальной вычислительной сети (ЛВС).

Алгоритм работы верхнего уровня, приведенный на рис. 3, представляет собой классический, или канонический вариант генетического алгоритма. Сначала вводятся требуемые значения параметров технологического процесса перекачки. Затем вводятся граничные значения, за которые ГА выходить не должен, чтобы не вывести из строя оборудование и нефтепровод.

После ввода всех параметров создается начальная популяция с помощью генератора псевдослучайных чисел, которая представляет собой массив из пяти тысяч целых 64-битных чисел со знаком. Каждый элемент массива содержит в себе четыре закодированных коэффициента аппроксимации. Три элемента массива составляют одну хромосому, которая содержит все коэффициенты аппроксимации. Длина одной хромосомы должна быть не меньше 11 генов (11 коэффициентов аппроксимации). Таким образом, на коэффициент отводится 16 бит, что вполне достаточно для обеспечения погрешности не более 1%. Поскольку общее число коэффициентов составляет не менее 440, то количество особей популяции составляет примерно 50.

После создания популяции происходит отбор. Если функция пригодности достигла минимума, то это означает, что особи популяции эволюционировали до требуемых значений. Если нет, то процесс переходит на следующую ступень. При выходе генотип особей переводится в фенотип. В результате получают численные значения параметров перекачки вдоль всей ветки МНП.

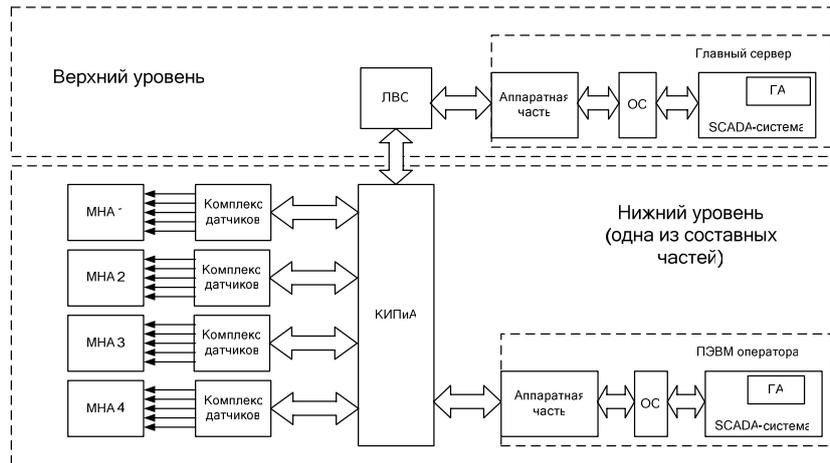


Рис. 2. Схема работы двухуровневой АСУ

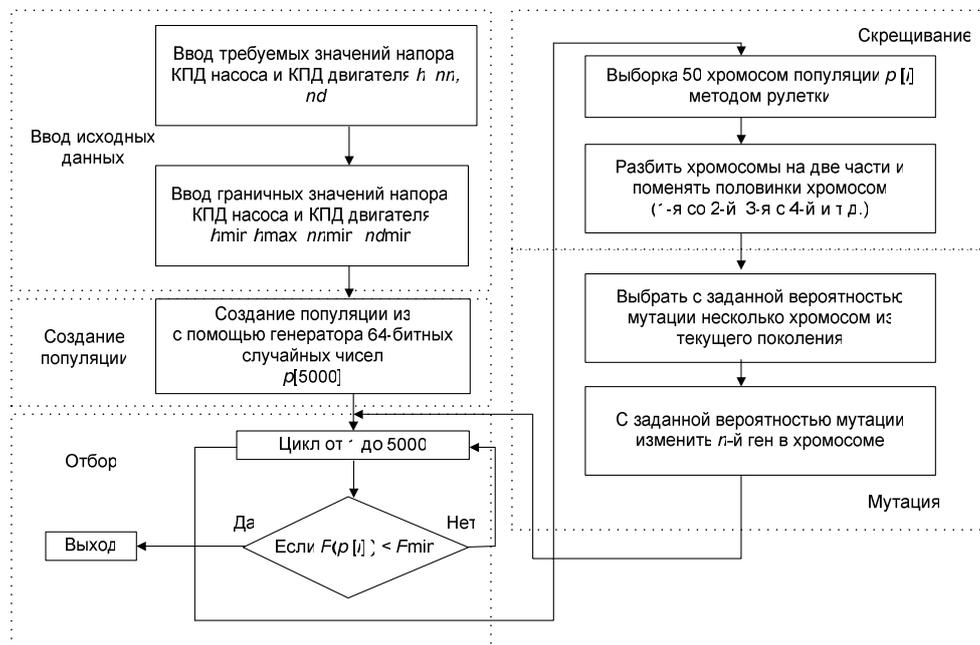


Рис. 3. Блок-схема генетического алгоритма

После отбора особи подвергаются скрещиванию. Причем к скрещиванию допускаются только те хромосомы, которые прошли «методом рулетки». Суть метода в том, что сильные хромосомы получают более широкий сектор на рулетке (более высокую вероятность выбора), а слабые — менее широкий, что хоть и делает вероятность их выбора небольшой, но она не равна нулю. Затем осуществляется скрещивание хромосом, точка кроссовера находится ровно посередине.

Заключительным шагом является мутация с вероятностью в 1% (типичное значение из практики применения генетических алгоритмов). Мутация меняет бит, местоположение которого было вычислено с помощью генератора случайных чисел. После мутации все

возвращается к отбору и начинается новая итерация поиска оптимального решения.

4. РАБОТА ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА НИЖНЕГО УРОВНЯ

Локальный генетический алгоритм подстраивает работу станции, переводя ее в оптимальный режим, следующим образом. Блок-схема локального ГА, представленная на рис. 4, демонстрирует принцип его работы. Ввод требуемых и граничных значений представляет собой получение локальным ГА рассчитанных верхним уровнем значений параметров режима работы станции. Далее работа локального ГА идет аналогично работе ГА верхнего уровня, с той лишь разницей, что число оптимизируемых параметров рав-

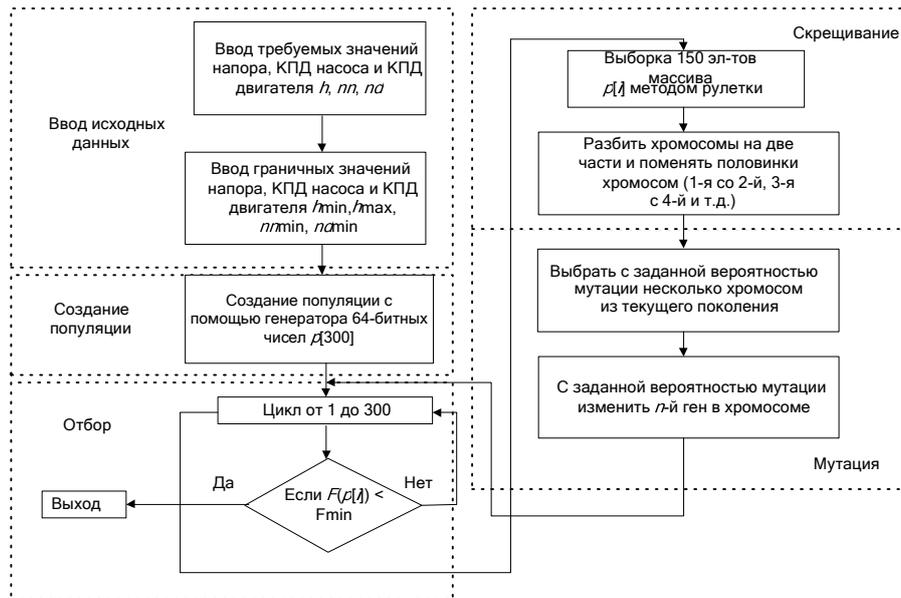


Рис. 4. Блок-схема работы локального алгоритма

но 44, что и отобразилось на размере массива, представляющего популяцию — размер массива уменьшился с пяти тысяч до трехсот элементов. Это означает, что локальный ГА сможет точнее подобрать коэффициенты аппроксимации за счет большего времени и за счет оценки пригодности хромосом, содержащих закодированные значения коэффициентов. Это и означает тонкую подстройку параметров режима перекачки.

5. ПРОВЕРКА РАБОТЫ СИСТЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ И ПОЛУЧЕНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для проверки и подтверждения описанных выше теоретических выкладок были разработаны компьютерные программы, реализующие функционирование системы оптимизации работы НПС.

Первая программа реализует работу генетического алгоритма на верхнем и нижнем уровнях. Параметры моделирования таковы:

- 1) количество НПС равно 10,
- 2) количество работающих насосов на участке МНП равно 20;
- 3) используются паспортные данные насоса НМ 7000-210;
- 4) в качестве критерия останова используется значение суммарной мощности насосов, равное 89 МВт;
- 5) максимальная мощность равна 110 МВт, поскольку число насосов равно 20, все насосы одного типа и мощность каждого из них равна 5,5 МВт.

На рис. 5 показана работа описанной выше программы, моделирующей системы оптимизации работы НПС на основе ГА. В данном случае величина суммарной минимальной мощности всех МНА участка нефтепровода обозначена NS и равна 90,88 МВт.

```

x[6][0]=9
x[7][0]=9
x[8][0]=9
x[9][0]=9
x[10][0]=9
x[11][0]=9
x[12][0]=9
x[13][0]=9
x[14][0]=9
x[15][0]=9
x[16][0]=9
x[17][0]=9
x[18][0]=9
x[19][0]=9

Селевая функция
NS[9]=9.088439e+07

Число поколений
p=100000

H:\GA_Release_version>
Help 2>UserIn 3|View 4>Edit 5|Copy 6|RenMov 7|McFold 8|Delete 9|ConfMn 10|Quit

```

Рис. 5. Иллюстрация работы программы, моделирующей работу системы оптимизации

Для корректной работы ГА требуется задать изменение хромосомы, чтобы допустимый диапазон изменения хромосомы укладывался в диапазон изменения используемого типа данных. В связи с этим, рабочий диапазон производительности насоса (нижняя граница которого определяется минимально допустимой производительностью насоса, при которой выполняется план объема перекачки, а верхняя граница — максимально допустимым давлением на выходе НПС) разбивается на части.

Количество частей, на которые разбивается рабочий диапазон, называется кратностью разбиения. Для перевода значений кратности в значения точности, выраженной в процентах:

$$\Delta = \frac{100}{k}\%, \quad (11)$$

где Δ — точность, выраженная в процентах;

k — кратность разбиения рабочего диапазона.

На рис. 5, 6 приведены зависимости числа поколений и энергопотребления совокупности НПС от кратности разбиения при использовании ГА. Из рисунков видно, что с повышением точности (повышением кратности разбиения рабочего диапазона) растет число необходимых итераций поиска (в терминах ГА это число поколений), что увеличивает время поиска необходимого решения.

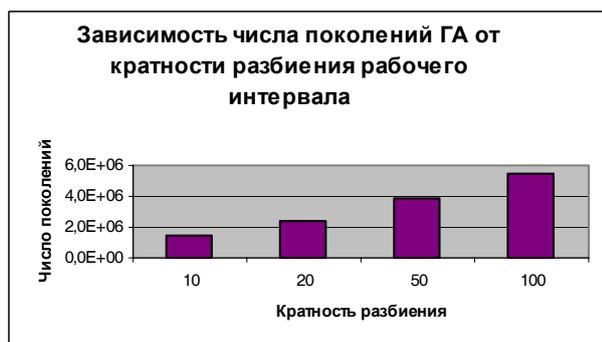


Рис. 6. Число поколений ГА

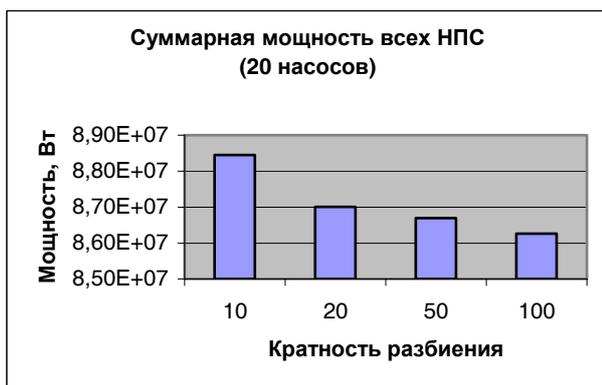


Рис. 7. Энергопотребление НПС

Видно, что с увеличением точности поиска оптимальных значений (рис. 6, 7) частот вращения МНА с помощью ГА, начинает уменьшаться общее энергопотребление участка МНП (или совокупности НПС участка МНП), что и является требуемым решени-

ем задачи. Оптимальным значением, по мнению автора, в данном случае является значение кратности разбиения 20 (точность 5%), при котором число поколений не столь велико и составляет чуть выше двух миллионов поколений при суммарной мощности насосов участка МНП в районе 87 МВт. Время поиска при помощи метода ГА не превышало получаса при любом значении кратности разбиения.

Для дополнительной проверки концепции двухуровневой системы оптимизации работы НПС с помощью ГА и сравнения с ним в части эффективности была написана программа моделирования системы оптимизации, основанная на методе прямого перебора. Главным достоинством метода прямого перебора является то, что он находит самое лучшее решение на пространстве поиска, пусть и в ущерб времени поиска. Результаты работы программы, использующей метод прямого перебора, представлен на рис. 8.

Поскольку особенность метода такова, что он проходит все поисковое пространство, число насосов участка МНП ограничено до 10. Эта величина выбрана исходя из выражения расчета числа итераций и времени поиска.

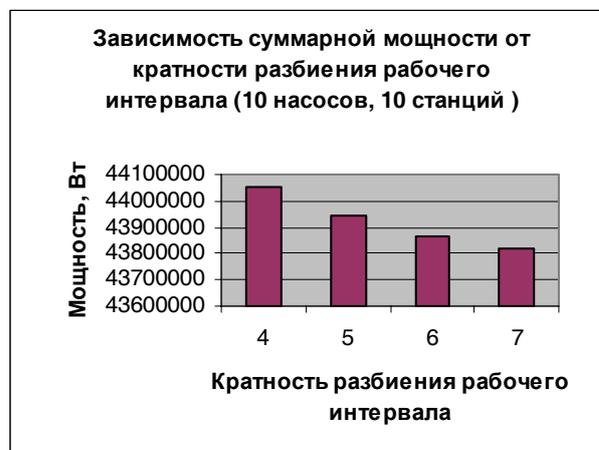


Рис. 8. Результаты работы метода прямого перебора

Так, для подсчета числа итераций используется выражение:

$$M = a^b, \quad (12)$$

где M — число итераций,

a — кратность разбиения,

b — число насосов.

Так, для кратности разбиения 5 для 10 насосов число итераций равнялось 9765625, а при кратности 12 — уже 61917364224 итераций. Время поиска методом прямого перебора

вычислялось по формуле:

$$t = \frac{n}{G}, \quad (13)$$

где t — время поиска,

n — число итераций,

G — производительность компьютера (в данном случае использовался ПК с производительностью 600 MIPS).

Используя известные величины, получаем время расчета 0,01 с и 103 с соответственно для варианта с десятью насосами при значении кратности разбиения интервала пять и двенадцать. При кратности разбиения, равной 20, время поиска вырастает до 4,74 часа, а вариант с пятнадцатью насосами и кратностью разбиения 20 будет рассчитываться 42 тыс. лет, что недопустимо. Вариант использования ГА хоть и не обеспечит наилучшего решения, но позволит при этом затратить не столь чудовищно большие объемы машиночасов, что является его достоинством и основной причиной его применения авторами.

6. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРЕДЛОЖЕННОГО МЕТОДА И ЕГО ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Экономия электроэнергии рассчитывается исходя из выражений, представленных в [7]:

$$\Delta W = \sum_{i=1}^k \left(\frac{N_{1i}}{\eta_{1i}} - \frac{N_{2i}}{\eta_{2i}} \right) \Delta t, \quad (14)$$

где N_{1i} , N_{2i} — мощности электродвигателя МНА для нерегулируемого и тиристорного электроприводов,

Δt — расчетный временной интервал,

η_{1i} , η_{2i} — КПД электродвигателей МНА для нерегулируемого и тиристорного электроприводов соответственно,

k — количество интервалов дискретного регулирования расхода в течение суток.

Для упрощения выражения примем допущения, что частота, с которой система проводит изменение параметров участка МНП, не превосходит одного раза в сутки, а КПД электродвигателей меняется незначительно (что вполне реально). Суммарную мощность автор предлагает взять равной 87 МВт, как наиболее оптимальное решение, описанное выше и полученное с помощью ГА. Тогда, используя эти условия, можно вычислить стоимость сэкономленной электроэнергии за квартал при помощи выражения:

$$M = \left(\sum_{m=1}^{20} N_m \right) \Delta t c_0, \quad (15)$$

где M — стоимость сэкономленной электроэнергии,

m — число насосов на участке МНП,

N_m — сэкономленная мощность насоса на участке МНП, определяемая как разница между максимальной мощностью насоса и его оптимальным значением, найденным ГА,

Δt — расчетное время, в нашем случае 2160 ч.,

c_0 — стоимость одного киловатт-часа, равная 2,50 руб.

Стоимость сэкономленной электроэнергии за квартал составила 124 млрд руб. Столь большая сумма не учитывает амортизацию оборудования, изменение цены на электроэнергию, что говорит о том, что это всего лишь примерная оценка возможной экономии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует отметить следующее. Генетические алгоритмы, применяемые в АСУ верхнего и нижнего уровней, решают разные задачи. Задача верхнего уровня — просчитать и оптимизировать параметры перекачки всей ветки МНП [5]. Задача нижнего уровня — по данным, определяемым на верхнем уровне, уточнить (оптимизировать) параметры работы отдельных МНА с целью тонкой настройки оборудования. Все это необходимо, поскольку верхний уровень ведет перерасчет лишь при вводе новых значений параметров перекачки ветки МНП или при невозможности какой-либо станции выйти на заданный режим работы. Нижний уровень лишь уточняет задаваемые параметры, незначительно изменяя частоту вращения вала МНА, дабы не нарушить устоявшийся режим перекачки.

В то же время оба уровня управления объединяет единство используемого метода оптимизации — генетические алгоритмы. Они позволяют работать с массивами данных большой размерности. Следовательно, предлагаемый подход к решению задачи оптимизации работы НПС может быть применен для АСУ МНП различной протяженности, с различным числом самих НПС.

Для проверки предложенного метода разработана программа, реализующая поиск оптимальных значений технологических параметров участка МНП для минимизации потребления электрической энергии с максимально возможным КПД насоса.

Моделирование, осуществленное при помощи вышеуказанной программы, подтверждает верность предложенной концепции о применении метода ГА в сравнении с другими методами, в частности, с методом прямого перебора. Сравнение доказало, что применение ГА для поиска оптимальных значений технологических параметров является наиболее оптимальным и целесообразным выбором.

Результатом проделанной работы стала разработка программного обеспечения, представленного программой, выполняющей функцию системы оптимизации работы НПС на основе ГА. Данная программа предназначена для внедрения ее в состав SCADA-систем, в настоящее время широко используемых при управлении промышленными объектами. Для непосредственного начала работы требуется лишь небольшая настройка коэффициентов ГА и значений некоторых констант (число насосов, кратность разбиения и т. д.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ахмадуллин, К. Р.** Энергосберегающие технологии трубопроводного транспорта нефтепродуктов : автореф. дисс.... на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук / К. Р. Ахмадуллин. Уфа : УГНТУ, 2005. 46 с.
2. **Гусев, Ю. М.** Использование интеллектуальных методов в системе управления нефтеперекачивающей станцией / Ю. М. Гусев, Р. Р. Гафаров // Электроника, автоматика и измерительная техника : межвуз. науч. сб. Уфа : УГАТУ, 2007. С. 73–77.
3. **Рутковская, Д.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. М. : Горячая линия–Телеком, 2006. 452 с.
4. **Бадамшин, Б. И.** Применение генетического алгоритма в системе управления модульными преобразователями энергии / Б. И. Бадамшин, Р. Р. Гафаров, О. Е. Данилин // Вычислительная техника и новые информационные технологии : межвуз. науч. сб. Вып. 6. Уфа : УГАТУ, 2007. С. 108–115.
5. **Коршак, А. А.** Трубопроводный транспорт нефти, нефтепродуктов и газа : учеб. пособие для системы доп. проф. образования / А. А. Коршак, А. М. Нечваль. Уфа : Дизайн-ПолиграфСервис, 2005. 516 с.
6. SCADA система Trace Mode 6 [Электронный ресурс] (<http://www.adastra.ru/products/dev/scada/>).
7. **Костышин, В. С.** Моделирование режимов работы центробежных насосов на основе электрогидравлической аналогии : монография на соиск. уч. ст. д-ра наук / В. С. Костышин. Ивано-Франковск : ИФДТУНГ, 2000. 163 с.

ОБ АВТОРАХ

Гусев Юрий Матвеевич, профессор кафедры промыш. электр. Дипл. инженер по технике высоких напряжений (ЛПИ, 1960). Д-р техн. наук по управл. авиац. и космич. системами (ЦИ-АМ, 1980). Иссл. в обл. проектир. электрич. систем управления энергетич. объектами в условиях риска и неопределенности.



Гафаров Радик Русланович, асп. Дипл. магистр по (электронике и микроэлектронике) (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. интеллектуальных систем управления.



Данилин Олег Евгеньевич, доц. каф. ПЭ. Дипл. инж. по электрон. технике (УАИ, 1982). Канд. техн. наук по систем. анализу и автоматич. упр. техн. объектами (УГАТУ, 1987). Иссл. в обл. идентификации сложн. нелинейн. моделей и анализа и синтеза иерархич. систем упр., контроля, диагностики сложн. техн. объектами.

