УДК 681.518.54

А. В. Мазин, А. В. Бурмистров

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ ОБЪЕКТАМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Рассмотрены вопросы определения требований к безотказности, контролепригодности и ремонтопригодности автоматизированных объектов теплоснабжения в системе диагностирования. Предлагается метод нахождения оптимальных параметров технических средств диагностирования для автоматизированных объектов теплоснабжения. При системном подходе к проектированию эти требования определяют достоверность, точность, надежность, оптимальную структуру технических средств диагностирования, а также характеризуют эффективность технических средств диагностирования и автоматизированных объектов теплоснабжения.

В соответствии с процедурой проектирования после определения совокупности задач диагностирования объектов теплоснабжения необходимо обосновать количественные требования к показателям, характеризующим безотказность Λ_T, контролепригодность M_T и ремонтопригодность Γ_T технических средств диагностирования (ТСД). В настоящей статье рассмотрен метод определения требований к этим показателям, исходя из обеспечения заданного уровня показателя $\Pi_{\text{Г3}}$ готовности объекта диагностирования (ОД). В качестве ОД рассматривается автоматизированная система контроля, мониторинга и диагностирования объектов теплоснабжения.

Задача формулируется следующим образом. Известны (заданы): 1) совокупность $Z = \{z_i\}$, $i = 1, 2, 3$, задач диагностирования, решаемых ТСД в процессе взаимодействия с ОД; 2) значения показателей, характеризующих безотказность Λ_0 объекта, т.е. параметры (параметр) закона распределения случайной наработки ОД до отказов его элементов, не приводящих к отказам ОД в целом; контролепригодность M_0 объекта, т.е. длительности проверки τ_{μ_0} и прогнозирования τ'_{ξ_0} работоспособности ОД; ремонтопригодность Γ_0 объекта, т.е. длительности аварийного τ'_{γ_0} и профилактического $\tau'_{\gamma_{\text{ОП}}}$ восстановления ОД, а также организацию и использование объекта, т.е. длительность T_θ использования ОД и длительность T_η перерыва между последовательными использованиями, и организацию D процесса диагностирования, т.е. длительность T периода диагностирования.

Требуется определить значения показателей, характеризующих безотказность Λ_T, контролепригодность M_T и ремонтопригодность Γ_T

ТСД, обеспечивающие заданный уровень $\Pi_{\text{Г}з}$ показателя Π_{Γ} готовности ОД в рабочем режиме, если безотказность Λ_T, контролепригодность M_T и ремонтопригодность Γ_T ТСД соответственно характеризуют среднюю наработку T_{λ_T} ТСД до отказа их элемента, не приводящего к отказу ТСД в целом; длительность τ_{μ_T} проверки работоспособности и длительность τ'_{γ_T} восстановления ТСД.

Положим, что значения случайной наработки ТСД до отказов их элементов подчиняются экспоненциальному закону распределения. Решение сформулированной задачи заключается в определении T_{λ_T}, τ_{μ_T} и τ'_{γ_T} из уравнения

$$\Pi_{\Gamma}\left(T_{\lambda_T}, \tau_{\mu_T}, \tau'_{\gamma_T}\right) = \Pi_{\text{Г}з} \tag{1}$$

при учете ограничений

$$\left.\begin{aligned} T^{H}_{\lambda_T} \leqslant T_{\lambda_T} \leqslant T^{B}_{\lambda_T};\\ \tau^{H}_{\mu_T} \leqslant \tau_{\mu_T} \leqslant \tau^{B}_{\mu_T};\\ \tau'^{H}_{\gamma_T} \leqslant \tau'_{\gamma_T} \leqslant \tau'^{B}_{\gamma_T}, \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

где $\Pi_{\Gamma}\left(T_{\lambda_T}, \tau_{\mu_T}, \tau'_{\gamma_T}\right)$ — функция, описывающая аналитическую зависимость показателя Π_{Γ} готовности ОД в рабочем режиме от показателей безотказности Λ_T, контролепригодности M_T и ремонтопригодности Γ_T ТСД; $T^{H}_{\lambda_T}$, $\tau^{H}_{\mu_T}$, $\tau'^{H}_{\gamma_T}$ и $T^{B}_{\lambda_T}$, $\tau^{B}_{\mu_T}$, $\tau'^{B}_{\gamma_T}$ — соответственно нижние и верхние граничные (допустимые) значения искомых показателей T_{λ_T}, τ_{μ_T} и τ'_{γ_T}.

Из множества комбинаций показателей безотказности Λ_T, контролепригодности M_T и ремонтопригодности Γ_T ТСД может существовать, по крайней мере, одна комбинация, которая является решением задачи (1)–(2), т.е. обеспечивает заданный уровень $\Pi_{\text{Г}з}$ готовности ОД. Очевидно, что прямой перебор с дискретными шагами по искомым показателям T_{λ_T}, τ_{μ_T} и τ'_{γ_T} не всегда может обеспечить требуемую точность решения задачи (1)–(2). Поэтому ее целесообразно рассматривать как задачу оптимизации. Однако такой подход предполагает введение некоторой целевой функции, которая отражает в математической форме цель оптимизации проектируемых ТСД и позволяет из множества допустимых вариантов построения ТСД выбрать оптимальный.

Известно [1], что если целевая функция представляет собой квадрат отклонения функции, описывающей аналитическую зависимость выбранного критерия от искомых аргументов, от ее заданного значения, то при всех прочих условиях, налагаемых на аргументы функции, сходимость итерационного процесса выше, чем при любом другом способе задания целевой функции. Поэтому в качестве целевой функции при решении рассматриваемой задачи использован квадрат отклонения показателя Π_Γ готовности ОД от его заданного значения $\Pi_{\text{Г3}}$, т.е. величина $[\Pi_\Gamma\left(T_{\lambda_T}, \tau_{\mu_T}, \tau'_{\gamma_T}\right) - \Pi_{\text{Г3}}]^2$, а задача оптимизации сформулирована в следующем виде: необходимо найти

$$\min[\Pi_\Gamma\left(T_{\lambda_T}, \tau_{\mu_T}, \tau'_{\gamma_T}\right) - \Pi_{\text{Г3}}]^2, \tag{3}$$

где $\left\{T_{\lambda_T}, \tau_{\mu_T}, \tau'_{\gamma_T}\right\} \in M$ при ограничениях

$$\left.\begin{aligned} &T^H_{\lambda_T} \leqslant T_{\lambda_T} \leqslant T^B_{\lambda_T};\\ &\tau^H_{\mu_T} \leqslant \tau_{\mu_T} \leqslant \tau^B_{\mu_T};\\ &\tau'^H_{\gamma_T} \leqslant \tau'_{\gamma_T} \leqslant \tau'^B_{\gamma_T}, \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

После математической постановки задачи оптимизации необходимо найти зависимость $\Pi_\Gamma = \Pi_\Gamma\left(T_{\lambda_T}, \tau_{\mu_T}, \tau'_{\gamma_T}\right)$. С этой целью изучаются условия эксплуатации ОД и ТСД, в результате чего определяется конечное дискретное множество $E = \{\overline{e_1, e_m}\}$ всех возможных несовместных состояний, в которых может находиться ТСД в процессе взаимодействия ОД и ТСД. Для полученного множества $E = \{\overline{e_1, e_m}\}$ несовместных состояний СД составляется математическая полумарковская модель взаимодействия ОД и ТСД, представляющая собой ориентированный граф $G\left(\Pi, P\right)$ возможных переходов СД из состояния в состояние [2]. Затем для построенной модели взаимодействия ОД и ТСД с помощью математического аппарата теории полумарковских процессов [3] в соответствии с разработанной методикой [4] выводится аналитическое выражение

$$\Pi_\Gamma = \Pi_\Gamma\left(\Lambda_0, \tau_{\mu_0}, \tau'_{\gamma_0}, \mathit{И}, D, T_{\lambda_T}, \tau_{\mu_T}, \tau'_{\gamma_T}\right) \tag{5}$$

для критерия Π_Γ как функция показателей безотказности Λ_0 и Λ_T, контролепригодности M_0 и M_T, ремонтопригодности Γ_0 и Γ_T ОД и ТСД, организации и использования объекта и организации D процесса диагностирования. В выражении (5) символ Λ_0 означает, что процесс возникновения отказов элементов ОД может быть описан любым законом распределения, в том числе и двухпараметрическим.

В результате подстановки в выражение (5) заданных значений показателей, характеризующих безотказность Λ_0, контролепригодность M_0, ремонтопригодность Γ_0 и организацию $\mathit{И}$ использования ОД, а также организацию D процесса диагностирования, получается искомая зависимость

$$\Pi_\Gamma\left(T_{\lambda_T}, \tau_{\mu_T}, \tau'_{\gamma_T}\right) = \Pi_{\text{Г3}} \tag{6}$$

показателя Π_Γ готовности ОД в рабочем режиме от показателей безотказности Λ_T, контролепригодности M_T и ремонтопригодности Γ_T ТСД.

Затем на основе изучения условий эксплуатации ОД и ТСД, а также возможностей получения в процессе изготовления ТСД соответствующих показателей устанавливаются (задаются) нижние $T^H_{\lambda_T}, \tau^H_{\mu_T}, \tau'^H_{\gamma_T}$, и верхние $T^B_{\lambda_T}, \tau^B_{\mu_T}, \tau'^B_{\gamma_T}$ граничные (допустимые) значения искомых показателей T_{λ_T}, τ_{μ_T} и τ'_{γ_T}.

После получения зависимости (6) и ограничений (4) можно определить требования к показателям T_{λ_T}, τ_{μ_T} и τ'_{γ_T}, характеризующим безотказность Λ_T, контролепригодность M_T и ремонтопригодность $\varGamma_T$ ТСД. Обозначим через $\overline{\mathrm{X}}$ вектор-столбец с компонентами $x_1 = T_{\lambda_T}$, $x_2 = \tau_{\mu_T}$, $x_3 = \tau'_{\gamma_T}$: $\overline{\mathrm{X}} = \left[T_{\lambda_T}, \tau_{\mu_T}, \tau'_{\gamma_T}\right]^{\mathrm{т}}$ (индекс "т" означает операцию транспонирования), а через $\hat{\overline{\mathrm{X}}} = \left[\hat{T}_{\lambda_T}, \hat{\tau}_{\mu_T}, \hat{\tau}'_{\gamma_T}\right]^{\mathrm{т}}$ — вектор, обеспечивающий минимум функции (3) при ограничениях (4), т.е. решение задачи (3)–(4).

Задача (3)–(4) представляет собой задачу минимизации при наличии ограничений. Для решения исходной задачи оптимизации (3)–(4) сведем задачу условной минимизации (3) при наличии ограничений (4) к задаче безусловной минимизации без ограничений некоторой другой функции $\Phi\left(\overline{\mathrm{X}}\right) = \Phi\left(T_{\lambda_T}, \tau_{\mu_T}, \tau'_{\gamma_T}\right)$, называемой в дальнейшем штрафной. Для этого построим функцию $\Phi\left(\overline{\mathrm{X}}\right) = \Phi\left(T_{\lambda_T}, \tau_{\mu_T}, \tau'_{\gamma_T}\right)$:

$$\begin{aligned}
&\Phi\left(T_{\lambda_T}, \tau_{\mu_T}, \tau'_{\gamma_T}\right) = \left[\Pi_{\varGamma}\left(T_{\lambda_T}, \tau_{\mu_T}, \tau'_{\gamma_T}\right) - \Pi_{\Gamma\mathrm{З}}\right]^2 + C_1\times\\
&\times\left\{\left|T_{\lambda_T} - T^H_{\lambda_T}\right| - \left(T_{\lambda_T} - T^H_{\lambda_T}\right)\right\} + C_2\left\{\left|T^B_{\lambda_T} - T_{\lambda_T}\right| - \left(T^B_{\lambda_T} - T_{\lambda_T}\right)\right\} +\\
&+C_3\left\{\left|\tau_{\mu_T} - \tau^H_{\mu_T}\right| - \left(\tau_{\mu_T} - \tau^H_{\mu_T}\right)\right\} + C_4\left\{\left|\tau^B_{\mu_T} - \tau_{\mu_T}\right| - \left(\tau^B_{\mu_T} - \tau_{\mu_T}\right)\right\} +\\
&+C_5\left\{\left|\tau'_{\gamma_T} - \tau'^H_{\gamma_T}\right| - \left(\tau'_{\gamma_T} - \tau'^H_{\gamma_T}\right)\right\} + C_6\left\{\left|\tau'^B_{\gamma_T} - \tau'_{\gamma_T}\right| - \left(\tau'^B_{\gamma_T} - \tau'_{\gamma_T}\right)\right\},
\end{aligned} \tag{7}$$

где $C_1 \ldots C_6$ — некоторые положительные вещественные числа, влияющие на скорость поиска минимума функции (7) и выбираемые так, чтобы при нарушении ограничений (4) значения штрафов были соизмеримы со значением минимизируемой функции (3).

Обозначим через $\hat{\overline{\mathrm{X}}} = \left[\hat{T}_{\lambda_T}, \hat{\tau}_{\mu_T}, \hat{\tau}'_{\gamma_T}\right]^{\mathrm{т}}$ вектор, обеспечивающий минимум штрафной функции (7) и представляющий, таким образом, решение следующей задачи безусловной минимизации: требуется найти $\tilde{\overline{\mathrm{X}}}$, при котором

$$\Phi\left(\tilde{\overline{\mathrm{X}}}\right) = \min\Phi\left(\overline{\mathrm{X}}\right). \tag{8}$$

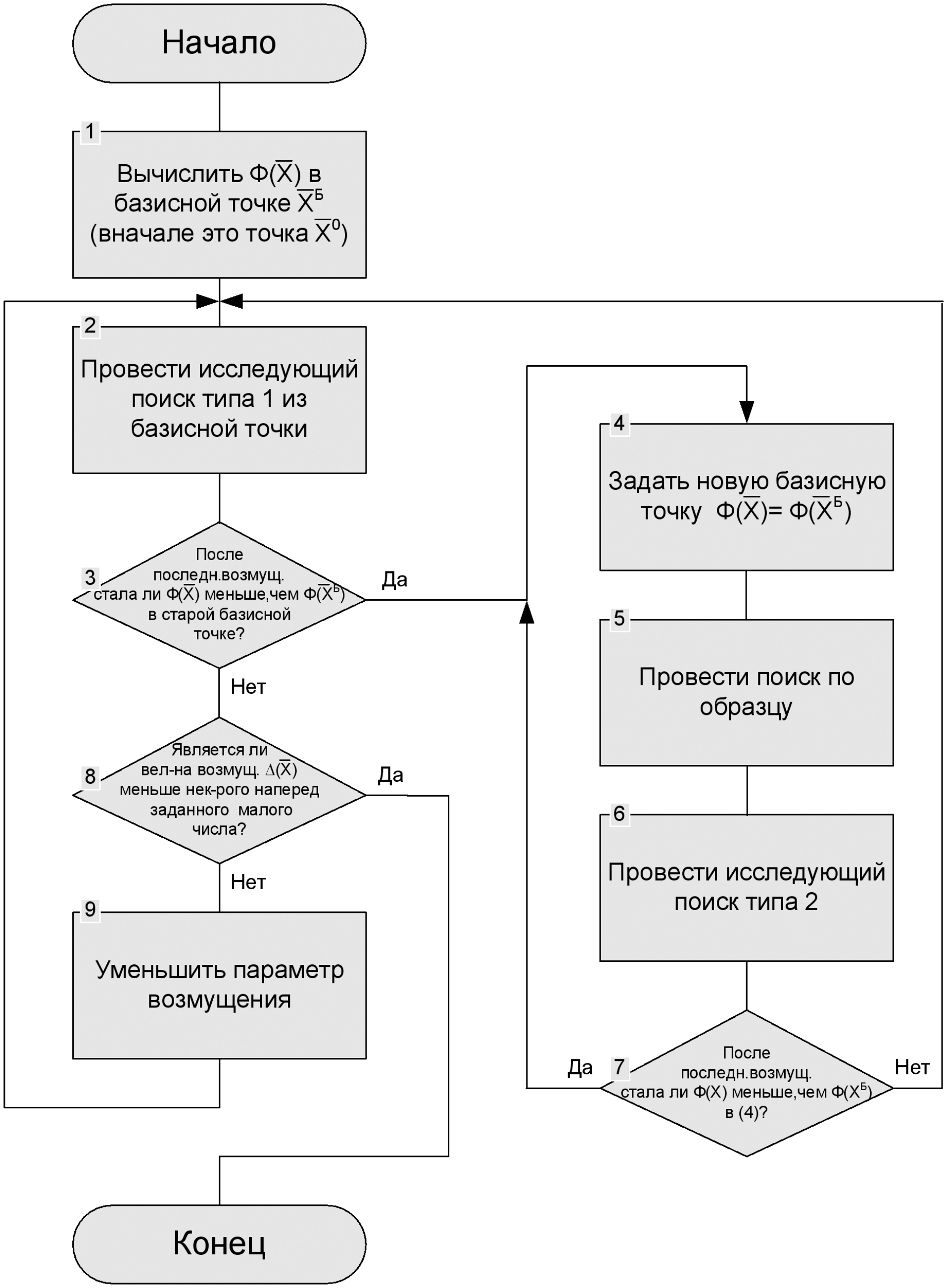
Следует заметить, что если $\tilde{\overline{\mathrm{X}}}$ удовлетворяет задаче (8), то $\tilde{\overline{\mathrm{X}}}$ удовлетворяет и исходной задаче (3)–(4), т.е. $\tilde{\overline{\mathrm{X}}} = \hat{\overline{\mathrm{X}}}$.

По построению функция (7) не дифференцируема в области M допустимых значений $\tilde{\tilde{\overline{\overline{\mathrm{X}}}}}$. Поэтому для решения задачи (8) целесообразно использован метод прямого поиска [5, 1], который, в отличие от градиентных методов оптимизации, не требует вычисления частных производных.

В результате находится вектор $\tilde{\tilde{\overline{\overline{\mathrm{X}}}}}$, компоненты $\tilde{T}_{\lambda_T}$, $\tilde{\tau}_{\mu_T}$ и $\tilde{\tau}'_{\gamma_T}$ которого принимаются в качестве требований к безотказности Λ_T, контролепригодности M_T и ремонтопригодности $\varGamma_T$ технических средств диагностирования автоматизированного объекта теплоснабжения.

Алгоритм прямого поиска (см. рисунок) включает два основных этапа: "исследующий поиск" вокруг базисной точки, который проводится для определения удачного направления, и "поиск по образцу", т.е. в направлении, выбранном для оптимизации. Исследующий поиск подразделяется на исследующий поиск типа 1, проводимый до поиска по образцу, и исследующий поиск типа 2, который проводится после поиска по образцу, причем, успех или неудачу поиска по образцу нельзя установить до завершения исследующего поиска типа 2.

Алгоритм прямого поиска состоит из следующих операций. Прежде всего задаются начальные значения $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \ldots, x_m^{(0)}$ всех элементов $\overline{X} = [x_1, x_2, \ldots, x_m]^{\mathrm{т}}$, а также начальное приращение $\Delta\overline{X} = \left[\Delta x_1^{(0)}, \Delta x_2^{(0)}, \ldots, \Delta x_m^{(0)}\right]^{\mathrm{т}}$. Чтобы начать исследующий поиск типа 1, следует вычислить значение целевой (оптимизируемой) функции $\Phi(\overline{X})$ в базисной точке $\overline{X}^{(\text{Б})}$ (вначале это точка $\overline{X}^{(0)} = \left[x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \ldots, x_m^{(0)}\right]^{\mathrm{т}}$, которая представляет собой начальный вектор предполагаемых искомых значений независимых переменных на первом шаге). Затем в циклическом порядке изменяется каждая переменная (каждый раз только одна) на выбранные величины приращений, пока все параметры не будут таким образом изменены. В частности, $x_1^{(0)}$ изменяется на величину $\Delta x_1^{(0)}$, так что $x_1^{(1)} = x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}$. Если приращение $\Delta x_1^{(0)}$ не улучшает (уменьшает — при минимизации, увеличивает — при максимизации) целевую функцию $\Phi(\overline{X})$, $x_1^{(0)}$ изменяется на $-\Delta x_1^{(0)}$, и значение $\Phi(\overline{X})$ как и ранее проверяется. Если значения $\Phi(\overline{X})$ не улучшают ни $x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}$, ни $x_1^{(0)} - \Delta x_1^{(0)}$, то $x_1^{(0)}$ оставляют без изменений. Затем $x_2^{(0)}$ изменяют на величину $\Delta x_2^{(0)}$ и так далее, пока не будут изменены все независимые переменные, что завершает один исследующий поиск типа 1. На каждом сдвиге по независимой переменной значение целевой функции $\Phi(\overline{X})$ сравнивается с ее значением $\Phi(\overline{X}^{(\text{Б})})$ в базисной точке $\overline{X}^{(\text{Б})}$. Если функция $\Phi(\overline{X})$ улучшается на данном сдвиге, то при последующих сравнениях ее старое значение



Блок-схема алгоритма прямого поиска

изменяется на новое. Однако, если произведенное возмущение по $\overline{X}$ неудачно, то сохраняется прежнее значение $\Phi(\overline{X})$.

Если $\Phi(\overline{X})$ улучшается в процессе исследующего поиска типа 1, то точка $\overline{X}^{(K)}$, в которой значение $\Phi(\overline{X})$ наилучшее по сравнению с $\Phi(\overline{X}^{(\text{Б})})$, выбирается в качестве новой базисной. Затем из новой базисной точки $\overline{X}^{(K)}$ проводится поиск по образцу в соответствии с правилом

$$\overline{X}^{(K+1)} = \overline{X}^{(K)} - \overline{X}^{(\text{Б})},$$

где K — номер шага (итерации); $\overline{X}^{(K)}$ — новый базисный вектор $\overline{X}$; $\overline{X}^{(\text{Б})}$ — предыдущий базисный вектор $\overline{X}$.

В результате поиска по образцу получается точка $\overline{X}^{(K+1)}$, а вектор $\Delta\overline{X}^{(K)} = \overline{X}^{(K+1)} - \overline{X}^{(K)}$ перехода из точки $\overline{X}^{(K)}$ в точку $\overline{X}^{(K+1)}$ указывает направление оптимизации, которое может привести к успеху. Далее вычисляется значение $\Phi(\overline{X}^{(K+1)})$ целевой функции $\Phi(\overline{X})$ в точке $\overline{X}^{(K+1)}$. После этого из точки $\overline{X}^{(K+1)}$ проводится исследующий поиск типа 2. После проведения исследующего поиска типа 2 принимается решение о том, было ли предыдущее движение по образцу успешным или неудачным. Неудача или успех исследующего поиска типа 2 оцениваются путем сравнения получаемых значений $\Phi(\overline{X}^{(K+2)})$ функции $\Phi(\overline{X})$ с $\Phi(\overline{X}^{(K+1)})$. Если $\Phi(\overline{X})$ улучшается в процессе исследующего поиска типа 2, то чтобы определить, оказался ли поиск по образцу успешным, наилучшее, по сравнению с $\Phi(\overline{X}^{(K+1)})$, получившееся в результате поиска типа 2 значение $\Phi(\overline{X}^{(K+2)})$ функции $\Phi(\overline{X})$ сравнивается со значением $\Phi(\overline{X}^{(K)})$ функции $\Phi(\overline{X})$ в базисной точке $\overline{X}^{(K)}$. Если это наилучшее значение $\Phi(\overline{X})$, в свою очередь, лучше значения $\Phi(\overline{X}^{(K)})$, т.е. функция $\Phi(\overline{X})$ улучшается в процессе исследующего поиска типа 2, то считается, что проведенный поиск по образцу оказался успешным. В этом случае точка $\overline{X}^{(K+2)}$, в которой значение $\Phi(\overline{X}^{(K+2)})$ функции $\Phi(\overline{X})$ наилучшее по сравнению с $\Phi(\overline{X}^{(K+1)})$, становится новой базисной точкой, а $\overline{X}^{(K)}$n — старой базисной точкой. Затем из полученной новой базисной точки $\overline{X}^{(K+2)}$ проводятся поиск по образцу и сопровождающий его исследующий поиск типа 2.

Эта последовательность поисков продолжается до тех пор, пока не будет достигнута ситуация, в которой в конце исследующего поиска типа 2 значение $\Phi(\overline{X})$ окажется хуже, чем значение $\Phi(\overline{X}^{(\text{Б})})$ в последней базисной точке. Тогда, если даже исследующий поиск типа 2 является успешным при одном или более возмущениях, говорят, что последующий поиск по образцу неудачен. В этой ситуации из предыдущей базисной точки проводится исследующий поиск типа 1 для определения нового удачного направления.

Если исследующий поиск типа 1 не дает нового удачного направления, то последовательно уменьшается $\Delta\overline{X}$ до тех пор, пока либо будет определено новое удачное направление, либо $\Delta\overline{X}$ не станет меньше, чем некоторая заранее установленная допустимая величина. Невозможность улучшить $\Phi(\overline{X})$ указывает на то, что достигнут оптимум, и поиск заканчивается, когда на данном шаге изменение каждой переменной $\Delta x_i^{(K)}$ $(i = \overline{1, m})$ оказывается меньше, чем некоторое заранее определенное число $\Delta x_{i\,\min}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О с н о в ы теории проектирования цифровых машин и систем / Иловайский И.В., Сидристый Г.А. – Новосибирск: Наука, 1976. – 1280 с.
2. М а з и н А. В., Б у р м и с т р о в А. В. Решение задач определения требований к системе диагностирования // Материалы IV Всерос. научно-техн. конф. “Новые информационные технологии в системах связи и управления”. – Калуга, 2005. – С. 109-110.
3. М а р к о в с к и е процессы принятия решений / Майн Х., Осаки С. – М.: Наука, 1977. – 176 с.
4. М а з и н А. В., Б у р м и с т р о в А. В. Разработка системы автоматизации диагностирования и управления объектов теплоснабжения // Материалы IV Всерос. научно-техн. конф. “Новые информационные технологии в системах связи и управления”. – Калуга, 2005. – С. 111–113.
5. П р о е к т и р о в а н и е систем диагностирования / Мозгалевский А.В. // Практика проектирования технических средств диагностирования: В-нк. – Л., 1979. – С. 5–9.

Статья поступила в редакцию 28.11.2006

Анатолий Викторович Мазин родился в 1948 г., окончил Одесское высшее инженерно-морское училище в 1972 г. Канд. техн наук, доцент кафедры “Компьютерные системы и сети” Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 23 научных работ в области систем автоматизированного проектирования и технической диагностики.

A.V. Mazin (b. 1948) graduated from the Odessa Higher Engineering-marine School in 1972. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Computer Systems and Networks” department of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 23 publications in the field of systems of computer-aided design and technical diagnostics.

Бурмистров Алексей Владимирович родился в 1978 г., окончил Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2002 г. Ассистент кафедры “Компьютерные системы и сети” Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 9 научных работ в области систем автоматизированного проектирования и технической диагностики.

A.V. Burmistrov (b. 1978) graduated from the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University in 2002. Assistant of “Computer Systems and Networks” department of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 9 publications in the field of systems of computer-aided design and technical diagnostics.