Известия Челябинского научного центра, вып. 4(9), 2000

МАТЕМАТИКА

УДК 519.248+519.116

# КОМБИНАТОРНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СЕТЕВЫХ СИСТЕМ

А.А. Гришкевич

e-mail: grishkev@math.tu-chel.ac.ru

Южно-Уральский государственный университет, г.Челябинск, Россия

Статья поступила в редакцию 3 октября 2000 года

## 1. Постановка задачи

Пусть сложная сетевая система задана графом $G(V,U)$, где $V$ - множество вершин ($s,t \in V$), $U$ - множество дуг. Обозначим

$$L = (V \cup U) \backslash (\{s,t\}) = \{I^l : l = 1,2,\ldots,n\}$$

совокупность элементов системы.

Каждый элемент $I$ системы может находиться в одном из четырех состояний $I_\alpha$, $\alpha \in \{M,N,R,S\}$, где $I_N$ – состояние нормальной работы, $I_S$ – состояние между отказом и завершением оперативных переключений, $I_R$ – состояние аварийного ремонта, $I_M$ – состояние предупредительного ремонта. Переходы между состояниями для одного элемента описываются марковскими моделями, где для элемента $I$ соответственно: $\lambda_{NS}(I), \lambda_{NM}(I)$ - интенсивность отказов и предупредительных ремонтов;

$$T_{SR}(I) = 1/\mu_{SR}(I),\ T_{RN}(I) = 1/\mu_{RN}(I),\ T_{MN}(I) = 1/\mu_{MN}(I)$$

среднее время переключений, аварийного и предупредительного ремонтов.

Состояние системы $\omega$ определяется состоянием каждого элемента и может быть описано как множество

$$\omega = \omega(L) = \{I^l_{\alpha_l} : I^l \in L, \alpha_l \in \{M,N,R,S\}, l = 1,2,\ldots,n\}.$$

Влияние состояния $\omega$ на работу системы заключается в замене графа $G$ подграфом $G^\omega(V^\omega,U^\omega)$, для которого

$$L^\omega = (V^\omega \cup U^\omega) \backslash (\{s,t\}) = L \backslash \bigcup_{I\alpha \in \omega} \mathcal{L}_{I_\alpha}\ ,$$

где $\mathcal{L}_{I_N} = \emptyset$, $\mathcal{L}_{I_R} = \mathcal{L}_{I_M} = \{I\}$, $\mathcal{L}_{I_S} \subseteq L$. Положим

$$Z_{st}(G^\omega) = Z_{st}(L^\omega) = "TRUE" ("FALSE"),$$

если в $G^\omega$ существует (не существует) путь из $s$ в $t$. Критерием отказа системы служит нарушение связи между вершинами $s$ и $t$ в графе $G^\omega$, т. е. $Z_{st}(G^\omega) = "FALSE"$. При этом проведение предупредительных ремонтов предполагается организованным таким образом, что в отказовом состоянии не может быть более одного элемента в состоянии $M$.

Оценка надежности системы заключается в получении значений вероятности состояния отказа системы $P$ и среднего параметра потока отказов системы $f$.

## 2. Классификация сечений сложных систем на основе вклада в результирующие показатели надежности

Рассмотрение множества $\Omega(J)=\{\omega : J\subseteq L, \forall I\in L\backslash J\Rightarrow I_N\in\omega\}$ состояний подсистемы $J\subseteq L$ позволяет каждому множеству элементов поставить во взаимно однозначное соответствие множество состояний

$$\widetilde{\Omega}(J)=\Omega(J)\setminus(\bigcup\nolimits_{I\subset J(I\neq J)}\Omega(I)),$$

причем для любых $I\neq J$ справедливо $\widetilde{\Omega}(I)\cap\widetilde{\Omega}(J)=\emptyset$.

Состояние $\omega$, для которого критерий отказа выполнен, называется состоянием отказа системы. Состояние отказа является состоянием с минимальными сечениями ($MC$-состоянием), если $\forall I_\alpha\in\omega$ перевод элемента $I$ из состояния $\alpha\in\{M,R\}$ в состояние $\alpha=N$, или из состояния $\alpha=S$ в состояние $\alpha=R$, возвращает систему в состояние успешной работы.

Множество $J\subseteq L$ есть сечение, если $MC(\widetilde{\Omega}(J))\neq\emptyset$. Множество всех сечений системы обозначим $\Re$.

Пусть отображение $\psi : L\to L$ есть биекция. Определим

$$\psi(\omega)=\{\psi(I^l_{\alpha_l})=(\psi(I^l))_{\alpha_l} : l=1,2,\ldots,n\}=\omega(\psi(L))=\eta$$

преобразование состояния $\omega$ в состояние $\eta$. Сечения $I,J\in\Re$ будем считать $\Theta$-эквивалентными ($I\equiv J(\Theta)$), если существует биекция $\psi_{IJ}$ такая, что

$$\psi_{IJ}(MC(\widetilde{\Omega}(I)))=MC(\widetilde{\Omega}(\psi_{IJ}(I)))=MC(\widetilde{\Omega}(J)).$$

Точное вычисление результирующих показателей надежности возможно только для очень простых систем. Для сложных систем используют различные приближенные методы, в частности, методы основанные на рассмотрении только состояний с минимальными сечениями. Для указанных приближений вычисление вклада эквивалентных сечений в вероятность состояния отказа и средний параметр потока отказов системы на основе состояний с минимальными сечениями ($MC$-состояний) происходит однотипным образом.

Таким образом, рассмотрение фактормножества множества сечений по отношению эквивалентности

$$\Re/\Theta=\{[J]\Theta\},$$

элементами которого являются подмножества эквивалентных сечений, дает классификацию сечений по вкладу в результирующие показатели надежности. В свою очередь, получение формул для вычисления вклада сечений различных классов в результирующие показатели надежности сводит задачу определения результирующих показателей надежности системы к комбинаторной задаче определения классов сечений по графу системы.

## 3. Классификация одно-, двух- и трехэлементных сечений сложных систем

На основе представленного комбинаторного подхода разработан метод определения показателей надежности сложных систем, в основе которого лежит рассмотрение множества одно-, двух- и трехэлементных сечений $\Re^3=\{J : J\in\Re,\ |J|\leq 3\}\subseteq\Re$. Действительно, в случае высоконадежных систем надежность системы определяется сечениями, состоящими из минимального числа элементов, и в первую очередь одно-, двух- и трехэлементными сечениями. Влиянием же сечений более высоких порядков в подавляющем большинстве приложений можно пренебречь.

Исследование множества $\Re^3/\Theta$ позволяет получить [1,2]

$$\Re^3/\Theta=\{[J_i]\Theta : i=1,2,\ldots,15\},$$

где $J_1=J_2=\{I\}$; $J_3=\ldots=J_6=\{I,K\}$; $J_7=\ldots=J_{15}=\{I,K,O\}$;

$MC(\widetilde{\Omega}(J_1))=\{\{I_M\},\{I_R\}\}$;

$MC(\widetilde{\Omega}(J_2)) = \{\{I_S\}\}$;
$MC(\widetilde{\Omega}(J_3)) = \{\{I_R, K_M\}, \{I_R, K_R\}, \{I_M, K_R\}\}$;
$MC(\widetilde{\Omega}(J_4)) = \{\{I_S, K_M\}, \{I_S, K_R\}\}$;
$MC(\widetilde{\Omega}(J_5)) = \{\{I_S, K_S\}\}$;
$MC(\widetilde{\Omega}(J_6)) = \{\{I_S, K_M\}, \{I_S, K_R\}, \{I_R, K_S\}, \{I_M, K_S\}\}$;
$MC(\widetilde{\Omega}(J_7)) = \{\{I_R, K_R, O_R\}, \{I_R, K_R, O_M\}, \{I_R, K_M, O_R\}, \{I_M, K_R, O_R\}\}$;
$MC(\widetilde{\Omega}(J_8)) = \{\{I_S, K_R, O_R\}, \{I_S, K_R, O_M\}, \{I_S, K_M, O_R\}\}$;
$MC(\widetilde{\Omega}(J_9)) = \{\{I_S, K_S, O_R\}, \{I_S, K_S, O_M\}\}$;
$MC(\widetilde{\Omega}(J_{10})) = \{I_S, K_S, O_S\}$;
$MC(\widetilde{\Omega}(J_{11})) = \{\{I_S, K_R, O_R\}, \{I_R, K_S, O_R\}, \{I_S, K_R, O_M\}, \{I_S, K_M, O_R\}, \{I_R, K_S, O_M\}, \{I_M, K_S, O_R\}\}$;
$MC(\widetilde{\Omega}(J_{12})) = \{\{I_S, K_R, O_S\}, \{I_R, K_S, O_S\}, \{I_S, K_M, O_S\}, \{I_M, K_S, O_S\}\}$;
$MC(\widetilde{\Omega}(J_{13})) = \{\{I_R, K_R, O_S\}, \{I_S, K_S, O_R\}, \{I_R, K_M, O_S\}, \{I_M, K_R, O_S\}, \{I_S, K_S, O_M\}\}$;
$MC(\widetilde{\Omega}(J_{14})) = \{\{I_S, K_R, O_R\}, \{I_R, K_S, O_R\}, \{I_S, K_R, O_M\}, \{I_S, K_M, O_R\}, \{I_R, K_S, O_M\}, \{I_M, K_S, O_R\}, \{I_R, K_R, O_S\}, \{I_R, K_M, O_S\}, \{I_M, K_R, O_S\}\}$;
$MC(\widetilde{\Omega}(J_{15})) = \{\{I_S, K_R, O_S\}, \{I_R, K_S, O_S\}, \{I_S, K_M, O_S\}, \{I_M, K_S, O_S\}, \{I_S, K_S, O_R\}, \{I_S, K_S, O_M\}\}$.

Рассмотрение сечений вместо состояний обладает следующими преимуществами: во-первых, их меньше (одному сечению соответствует от одного до девяти состояний); и, во-вторых, сечения состоят из реальных элементов системы, положение которых в графе системы обладает определенными структурными свойствами.

## 4. Получение приближений для вычисления вклада одно-, двух- и трехэлементных сечений в результирующие показатели надежности

Для вычисления вклада сечений различных классов $J_i,\ i = 1, 2, \ldots, 15$, в вероятность состояния отказа системы и средний параметр потока отказов системы получены следующие формулы (частично эти формулы приводятся в [2]):

$P_1(J_1) = \{P(I_M)\} + P(I_R) = \{\lambda_{NM}(I)T_{MN}(I)\} + \lambda_{NS}(I)T_{RN}(I)$;

$P_2(J_2) = P(I_S) = \lambda_{NS}(I)T_{SR}(I)$;

$P_3(J_3) = \{P(I_RK_M)\} + P(I_RK_R) + \{P(I_MK_R)\} = \{\lambda_{NS}(I)T_{RN}(I)\lambda_{NM}(K)T^2_{MN}(K)/(T_{MN}(K) + T_{RN}(I))\} + \lambda_{NS}(I)T_{RN}(I)\lambda_{NS}(K)T_{RN}(K) + \{\lambda_{NM}(I)\lambda_{NS}(K)T_{RN}(K)T^2_{MN}(I)/(T_{MN}(I) + T_{RN}(K))\}$;

$P_4(J_4) = P_4(I, K) = \{P(I_SK_M)\} + P(I_SK_R) = \{\lambda_{NS}(I)T_{SR}(I)\lambda_{NM}(K)T^2_{MN}(K)/(T_{MN}(K) + T_{SR}(I))\} + \lambda_{NS}(I)T_{SR}(I)\lambda_{NS}(K)T_{RN}(K)$;

$P_5(J_5) = P(I_SK_S) = \lambda_{NS}(I)T_{SR}(I)\lambda_{NS}(K)T_{SR}(K)$;

$P_6(J_6) = \{P(I_SK_M)\} + P(I_SK_R) + P(I_RK_S) + \{P(I_MK_S)\} = \{\lambda_{NS}(I)T_{SR}(I)\lambda_{NM}(K)T^2_{MN}(K)/(T_{MN}(K) + T_{SR}(I))\} + \lambda_{NS}(I)T_{SR}(I)\lambda_{NS}(K)T_{RN}(K) + \lambda_{NS}(I)T_{RN}(I)\lambda_{NS}(K)T_{SR}(K) + \{\lambda_{NM}(I)\lambda_{NS}(K)T_{SR}(K)T^2_{MN}(I)/(T_{MN}(I) + T_{SR}(K))\}$;

$P_7(J_7) = P(I_RK_RO_R) + \{P(I_RK_RO_M)\} + \{P(I_RK_MO_R)\} + \{P(I_MK_RO_R)\} =$
$\lambda_{NS}(I)T_{RN}(I)\lambda_{NS}(K)T_{RN}(K)\lambda_{NS}(O)T_{RN}(O) +$
$\{\lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)\lambda_{NM}(O)T_{RN}(I)T_{RN}(K)T_{MN}(O)$
$((T_{MN}(O)T_{RN}(I) + T_{MN}(O)T_{RN}(K))/(T_{MN}(O)T_{RN}(I) + T_{MN}(O)T_{RN}(K) + T_{RN}(I)T_{RN}(K)))\} +$
$\{\lambda_{NS}(I)\lambda_{NM}(K)\lambda_{NS}(O)T_{RN}(I)T_{MN}(K)T_{RN}(O)$
$((T_{MN}(K)T_{RN}(I) + T_{MN}(K)T_{RN}(O))/(T_{MN}(K)T_{RN}(I) + T_{MN}(K)T_{RN}(O) + T_{RN}(I)T_{RN}(O)))\} +$
$\{\lambda_{NM}(I)\lambda_{NS}(K)\lambda_{NS}(O)T_{MN}(I)T_{RN}(K)T_{RN}(O)$
$((T_{MN}(I)T_{RN}(K) + T_{MN}(I)T_{RN}(O))/(T_{MN}(I)T_{RN}(K) + T_{MN}(I)T_{RN}(O) + T_{RN}(K)T_{RN}(O)))\}$;

$P_8(J_8) = P(I_SK_RO_R) + \{P(I_SK_RO_M)\} + \{P(I_SK_MO_R)\} = \lambda_{NS}(I)T_{SR}(I)\lambda_{NS}(K)T_{RN}(K)\lambda_{NS}(O)T_{RN}(O) + \{\lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)\lambda_{NM}(O)T_{SR}(I)T_{RN}(K)T_{MN}(O)\} + \{\lambda_{NS}(I)\lambda_{NM}(K)\lambda_{NS}(O)T_{SR}(I)T_{MN}(K)T_{RN}(O)\}$;

$P_9(J_9) = P(I_SK_SO_R) + \{P(I_SK_SO_M)\} = \lambda_{NS}(I)T_{SR}(I)\lambda_{NS}(K)T_{SR}(K)\lambda_{NS}(O)T_{RN}(O) + \{\lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)\lambda_{NM}(O)T_{SR}(I)T_{SR}(K)T_{MN}(O)\}$;

$P_{10}(J_{10}) = P(I_S K_S O_S) = \lambda_{NS}(I) T_{SR}(I) \lambda_{NS}(K) T_{SR}(K) \lambda_{NS}(O) T_{SR}(O)$;

$P_{11}(J_{11}) = P(I_S K_R O_R) + P(I_R K_S O_R) + \{P(I_S K_R O_M)\} + \{P(I_S K_M O_R)\} + \{P(I_R K_S O_M)\}$
$+ \{P(I_M K_S O_R)\} = \lambda_{NS}(I) T_{SR}(I) \lambda_{NS}(K) T_{RN}(K) \lambda_{NS}(O) T_{RN}(O) + \lambda_{NS}(I) T_{RN}(I) \lambda_{NS}(K) T_{SR}(K) \lambda_{NS}(O) T_{RN}(O) +$
$\{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NM}(O) T_{SR}(I) T_{RN}(K) T_{MN}(O)\} + \{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NM}(K) \lambda_{NS}(O) T_{SR}(I) T_{MN}(K) T_{RN}(O)\} +$
$\{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NM}(O) T_{RN}(I) T_{SR}(K) T_{MN}(O)\} + \{\lambda_{NM}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NS}(O) T_{MN}(I) T_{SR}(K) T_{RN}(O)\}$;

$P_{12}(J_{12}) = P(I_S K_R O_S) + P(I_R K_S O_S) + \{P(I_S K_M O_S)\} + \{P(I_M K_S O_S)\} =$
$\lambda_{NS}(I) T_{SR}(I) \lambda_{NS}(K) T_{RN}(K) \lambda_{NS}(O) T_{SR}(O) + \lambda_{NS}(I) T_{RN}(I) \lambda_{NS}(K) T_{SR}(K) \lambda_{NS}(O) T_{SR}(O) +$
$\{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NM}(K) \lambda_{NS}(O) T_{SR}(I) T_{MN}(K) T_{SR}(O)\} + \{\lambda_{NM}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NS}(O) T_{MN}(I) T_{SR}(K) T_{SR}(O)\}$;

$P_{13}(J_{13}) = P(I_R K_R O_S) + P(I_S K_S O_R) + \{P(I_R K_M O_S)\} + \{P(I_M K_R O_S)\} + \{P(I_S K_S O_M)\} =$
$\lambda_{NS}(I) T_{RN}(I) \lambda_{NS}(K) T_{RN}(K) \lambda_{NS}(O) T_{SR}(O) + \lambda_{NS}(I) T_{SR}(I) \lambda_{NS}(K) T_{SR}(K) \lambda_{NS}(O) T_{RN}(O) +$
$\{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NM}(K) \lambda_{NS}(O) T_{RN}(I) T_{MN}(K) T_{SR}(O)\} + \{\lambda_{NM}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NS}(O) T_{MN}(I) T_{RN}(K) T_{SR}(O)\} +$
$\{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NM}(O) T_{SR}(I) T_{SR}(K) T_{MN}(O)\}$;

$P_{14}(J_{14}) = P(I_S K_R O_R) + P(I_R K_S O_R) + \{P(I_S K_R O_M)\} + \{P(I_S K_M O_R)\} + \{P(I_R K_S O_M)\} +$
$\{P(I_M K_S O_R)\} + P(I_R K_R O_S) + \{P(I_R K_M O_S)\} + \{P(I_M K_R O_S)\} =$
$\lambda_{NS}(I) T_{SR}(I) \lambda_{NS}(K) T_{RN}(K) \lambda_{NS}(O) T_{RN}(O) + \lambda_{NS}(I) T_{RN}(I) \lambda_{NS}(K) T_{SR}(K) \lambda_{NS}(O) T_{RN}(O) +$
$\{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NM}(O) T_{SR}(I) T_{RN}(K) T_{MN}(O)\} + \{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NM}(K) \lambda_{NS}(O) T_{SR}(I) T_{MN}(K) T_{RN}(O)\} +$
$\{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NM}(O) T_{RN}(I) T_{SR}(K) T_{MN}(O)\} + \{\lambda_{NM}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NS}(O) T_{MN}(I) T_{SR}(K) T_{RN}(O) +$
$\lambda_{NS}(I) T_{RN}(I) \lambda_{NS}(K) T_{RN}(K) \lambda_{NS}(O) T_{SR}(O) + \{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NM}(K) \lambda_{NS}(O) T_{RN}(I) T_{MN}(K) T_{SR}(O)\} +$
$\{\lambda_{NM}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NS}(O) T_{MN}(I) T_{RN}(K) T_{SR}(O)\}\}$;

$P_{15}(J_{15}) = P(I_S K_R O_S) + P(I_R K_S O_S) + \{P(I_S K_M O_S)\} + \{P(I_M K_S O_S)\} + P(I_S K_S O_R) + \{P(I_S K_S O_M)\} =$
$\lambda_{NS}(I) T_{SR}(I) \lambda_{NS}(K) T_{RN}(K) \lambda_{NS}(O) T_{SR}(O) + \lambda_{NS}(I) T_{RN}(I) \lambda_{NS}(K) T_{SR}(K) \lambda_{NS}(O) T_{SR}(O) +$
$\{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NM}(K) \lambda_{NS}(O) T_{SR}(I) T_{MN}(K) T_{SR}(O)\} + \{\lambda_{NM}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NS}(O) T_{MN}(I) T_{SR}(K) T_{SR}(O)\} +$
$\lambda_{NS}(I) T_{SR}(I) \lambda_{NS}(K) T_{SR}(K) \lambda_{NS}(O) T_{RN}(O) + \{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NM}(O) T_{SR}(I) T_{SR}(K) T_{MN}(O)\}$;

$f_1(J_1) = \{f(I_M)\} + f(I_R) = \{\lambda_{NM}(I)\} + \lambda_{NS}(I)$;

$f_2(J_2) = f(I_S) = \lambda_{NS}(I)$;

$f_3(J_3) = \{f(I_R K_M)\} + f(I_R K_R) + \{f(I_M K_R)\} = \{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NM}(K) T_{MN}(K)\} +$
$\lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) (T_{RN}(I) + T_{RN}(K)) + \{\lambda_{NM}(I) \lambda_{NS}(K) T_{MN}(I)\}$;

$f_4(J_4) = f_4(I, K) = \{f(I_S K_M)\} + f(I_S K_R) = \{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NM}(K) T_{MN}(K)\} + \lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) (T_{SR}(I) + T_{RN}(K))$;

$f_5(J_5) = f(I_S K_S) = \lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) (T_{SR}(I) + T_{SR}(K))$;

$f_6(J_6) = \{f(I_S K_M)\} + f(I_S K_R) + f(I_R K_S) + \{f(I_M K_S)\} = \{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NM}(K) T_{MN}(K)\} +$
$\lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) (T_{SR}(I) + T_{RN}(K)) + \lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) (T_{RN}(I) + T_{SR}(K)) + \{\lambda_{NM}(I) \lambda_{NS}(K) T_{MN}(I)\}$;

$f_7(J_7) = f(I_R K_R O_R) + \{f(I_R K_R O_M)\} + \{f(I_R K_M O_R)\} + \{f(I_M K_R O_R)\} =$
$\lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NS}(O) (T_{RN}(I) T_{RN}(K) + T_{RN}(I) T_{RN}(O) + T_{RN}(K) T_{RN}(O)) +$
$\{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NM}(O) T_{MN}(O) (T_{RN}(I) + T_{RN}(K))\} + \{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NM}(K) \lambda_{NS}(O) T_{MN}(K) (T_{RN}(I) + T_{RN}(O))\} +$
$\{\lambda_{NM}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NS}(O) T_{MN}(I) (T_{RN}(K) + T_{RN}(O))\}$;

$f_8(J_8) = f(I_S K_R O_R) + \{f(I_S K_R O_M)\} + \{f(I_S K_M O_R)\} =$
$\lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NS}(O) (T_{SR}(I) T_{RN}(K) + T_{SR}(I) T_{RN}(O) + T_{RN}(K) T_{RN}(O)) +$
$\{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NM}(O) T_{RN}(K) T_{MN}(O)\} + \{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NM}(K) \lambda_{NS}(O) T_{MN}(K) T_{RN}(O)\}$;

$f_9(J_9) = f(I_S K_S O_R) + \{f(I_S K_S O_M)\} =$
$\lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NS}(O) (T_{SR}(I) T_{SR}(K) + T_{SR}(I) T_{RN}(O) + T_{SR}(K) T_{RN}(O)) +$
$\{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NM}(O) T_{MN}(O) (T_{SR}(I) + T_{SR}(K))\}$;

$f_{10}(J_{10}) = f(I_S K_S O_S) = \lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NS}(O) (T_{SR}(I) T_{SR}(K) + T_{SR}(I) T_{SR}(O) + T_{SR}(K) T_{SR}(O))$;

$f_{11}(J_{11}) = f(I_S K_R O_R) + f(I_R K_S O_R) + \{f(I_S K_R O_M)\} + \{f(I_S K_M O_R)\} + \{f(I_R K_S O_M)\} + \{f(I_M K_S O_R)\} =$
$\lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NS}(O) (T_{SR}(I) T_{RN}(K) + T_{SR}(I) T_{RN}(O) + T_{RN}(K) T_{RN}(O)) +$
$\lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NS}(O) (T_{RN}(I) T_{SR}(K) + T_{RN}(I) T_{RN}(O) + T_{SR}(K) T_{RN}(O)) +$
$\{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NM}(O) T_{RN}(K) T_{MN}(O)\} + \{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NM}(K) \lambda_{NS}(O) T_{MN}(K) T_{RN}(O)\} +$
$\{\lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NM}(O) T_{RN}(I) T_{MN}(O)\} + \{\lambda_{NM}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NS}(O) T_{MN}(I) T_{RN}(O)\}$;

$f_{12}(J_{12}) = f(I_S K_R O_S) + f(I_R K_S O_S) + \{f(I_S K_M O_S)\} + \{f(I_M K_S O_S)\} =$
$\lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NS}(O) (T_{SR}(I) T_{RN}(K) + T_{SR}(I) T_{SR}(O) + T_{RN}(K) T_{SR}(O)) +$
$\lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) \lambda_{NS}(O) (T_{RN}(I) T_{SR}(K) + T_{RN}(I) T_{SR}(O) + T_{SR}(K) T_{SR}(O)) +$

$\{\lambda_{NS}(I)\lambda_{NM}(K)\lambda_{NS}(O)T_{MN}(K)(T_{SR}(I)+T_{SR}(O))\}+\{\lambda_{NM}(I)\lambda_{NS}(K)\lambda_{NS}(O)T_{MN}(I)(T_{SR}(K)+T_{SR}(O))\}$;

$f_{13}(J_{13})=f(I_RK_RO_S)+f(I_SK_SO_R)+\{f(I_RK_MO_S)\}+\{f(I_MK_RO_S)\}+\{f(I_SK_SO_M)\}=$
$\lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)\lambda_{NS}(O)(T_{RN}(I)T_{RN}(K)+T_{RN}(I)T_{SR}(O)+T_{RN}(K)T_{SR}(O))+$
$\lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)\lambda_{NS}(O)(T_{SR}(I)T_{SR}(K)+T_{SR}(I)T_{RN}(O)+T_{SR}(K)T_{RN}(O))+$
$\{\lambda_{NS}(I)\lambda_{NM}(K)\lambda_{NS}(O)T_{RN}(I)T_{MN}(K)\}+\{\lambda_{NM}(I)\lambda_{NS}(K)\lambda_{NS}(O)T_{MN}(I)T_{RN}(K)\}+$
$\{\lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)\lambda_{NM}(O)T_{MN}(O)(T_{SR}(I)+T_{SR}(K))\}$;

$f_{14}(J_{14})=f(I_SK_RO_R)+f(I_RK_SO_R)+\{f(I_SK_RO_M)\}+$
$\{f(I_SK_MO_R)\}+\{f(I_RK_SO_M)\}+\{f(I_MK_SO_R)\}+f(I_RK_RO_S)+\{f(I_RK_MO_S)\}+\{f(I_MK_RO_S)\}=$
$\lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)\lambda_{NS}(O)(T_{SR}(I)T_{RN}(K)+T_{SR}(I)T_{RN}(O)+T_{RN}(K)T_{RN}(O))+$
$\lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)\lambda_{NS}(O)(T_{RN}(I)T_{SR}(K)+T_{RN}(I)T_{RN}(O)+T_{SR}(K)T_{RN}(O))+$
$\{\lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)\lambda_{NM}(O)T_{RN}(K)T_{MN}(O)\}+\{\lambda_{NS}(I)\lambda_{NM}(K)\lambda_{NS}(O)T_{MN}(K)T_{RN}(O)\}+$
$\{\lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)\lambda_{NM}(O)T_{RN}(I)T_{MN}(O)\}+\{\lambda_{NM}(I)\lambda_{NS}(K)\lambda_{NS}(O)T_{MN}(I)T_{RN}(O)\}+$
$\lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)\lambda_{NS}(O)(T_{RN}(I)T_{RN}(K)+T_{RN}(I)T_{SR}(O)+T_{RN}(K)T_{SR}(O))+$
$\{\lambda_{NS}(I)\lambda_{NM}(K)\lambda_{NS}(O)T_{RN}(I)T_{MN}(K)\}+\{\lambda_{NM}(I)\lambda_{NS}(K)\lambda_{NS}(O)T_{MN}(I)T_{RN}(K)\}$;

$f_{15}(J_{15})=f(I_SK_RO_S)+f(I_RK_SO_S)+\{f(I_SK_MO_S)\}+\{f(I_MK_SO_S)\}+f(I_SK_SO_R)+\{f(I_SK_SO_M)\}=$
$\lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)\lambda_{NS}(O)(T_{SR}(I)T_{RN}(K)+T_{SR}(I)T_{SR}(O)+T_{RN}(K)T_{SR}(O))+$
$\lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)\lambda_{NS}(O)(T_{RN}(I)T_{SR}(K)+T_{RN}(I)T_{SR}(O)+T_{SR}(K)T_{SR}(O))+$
$\{\lambda_{NS}(I)\lambda_{NM}(K)\lambda_{NS}(O)T_{MN}(K)(T_{SR}(I)+T_{SR}(O))\}+\{\lambda_{NM}(I)\lambda_{NS}(K)\lambda_{NS}(O)T_{MN}(I)(T_{SR}(K)+T_{SR}(O))\}+$
$\lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)\lambda_{NS}(O)(T_{SR}(I)T_{SR}(K)+T_{SR}(I)T_{RN}(O)+T_{SR}(K)T_{RN}(O))+$
$\{\lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)\lambda_{NM}(O)T_{MN}(O)(T_{SR}(I)+T_{SR}(K))\}$.

Слагаемые в фигурных скобках учитывают вклад в результирующие показатели надежности предупредительных ремонтов элементов.

Формулы для вычисления вклада состояний $\{I_M\}$, $\{I_R\}$, $\{I_S\}$, $\{I_RK_R\}$, $\{I_RK_M\}$, $\{I_SK_R\}$, $\{I_SK_S\}$, $\{I_SK_M\}$, $\{I_R,K_R,O_R\}$, $\{I_R,K_R,O_S\}$, $\{I_R,K_S,O_S\}$, $\{I_S,K_S,O_S\}$, $\{I_M,K_R,O_R\}$, $\{I_S,K_R,O_M\}$, $\{I_M,K_S,O_S\}$ в результирующие показатели надежности приводятся в [3,4]. Отличие между различными авторами заключается в использовании приближений для состояния $\{I_SK_M\}$.

Окончательная оценка надежности системы производится по следующим формулам

$$P=\sum_{i=1}^{15}\sum_{C\in[J_i]\Theta}P_i(C), \qquad f=\sum_{i=1}^{15}\sum_{C\in[J_i]\Theta}f_i(C).$$

## Выводы

Введено понятие сечения сложной системы. Получена классификация сечений сложных систем на основе вклада в результирующие показатели надежности системы (вероятность состояния отказа и средний параметр потока отказов). Выделено только пятнадцать различных классов сечений в множестве одно-, двух- и трехэлементных сечений. Получены формулы для определения вклада одно-, двух- и трехэлементных сечений различных классов в результирующие показатели надежности системы (дифференцированно с учетом и без учета предупредительных ремонтов элементов).

## Список литературы

1. Гришкевич А.А.-Комбинаторная модель надежности сложной системы//Обозрение прикладной и промышленной математики,т.7,вып.2,2000,с.337-338.

2. Гришкевич А.А.-Комбинаторный метод оценки надежности сложных электрических цепей//Электричество N.8,2000,с.53-61.

3. Эндрени Дж.-Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах//М.: Энергоатомиздат,1983.-336с.

4. Фокин Ю.А.-Оценка надежности схем электроснабжения. В кн.:Электротехнический справочник//М.: Энергоатомиздат,1985.-Т.3,кн.1,разд.31,с.187-197.