

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ МНОГОУРОВНЕВОГО ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА

Соколов Владимир Алексеевич

*Заведующий кафедрой «Строительные конструкции и материалы»
Санкт-Петербургского государственного политехнического университета,
кандидат технических наук, профессор*

В качестве примера рассматривается здание старой городской застройке, состоящее из следующих основных конструктивных систем: фундаменты, наружные стены, перекрытия, крыша. Для проведения вероятностного анализа технического состояния здания его элементы, подсистемы и системы со своими диагностическими параметрами можно представить в виде многоуровневой иерархической схемы – дерева диагнозов (рис. 1).

В данной статье рассмотрены результаты вероятностного анализа состояний только одной из конструктивных систем – междуэтажных перекрытий и их элементов. Эта ветвь дерева диагнозов выделена из общей схемы и отдельно представлена на рис. 2. Как видно, показаны два междуэтажных перекрытия, имеющих различное конструктивное исполнение: железобетонное монолитное, выполненное по схеме балочной клетки, и перекрытие по деревянным и стальным балкам с деревянным заполнением.

Монолитное железобетонное перекрытие состоит из главных балок G_k , второстепенных балок W_k , плитных участков F_k и колонн L_k , которые рассматриваются как его элементы-подсистемы. На рис. 3 схематично показан пример раскладки этих элементов. Как видно из этого рисунка, в состав перекрытия входят четыре подсистемы: подсистема «главные балки» ($g = 3$), подсистема «второстепенные балки» ($w = 22$), подсистема «плитные участки» ($f = 24$) и подсистема «колонны» ($l = 2$). Далее это перекрытие будет обозначено как объединенная система «перекрытие $U(GWFL)$ ».

Перекрытие по деревянным и стальным конструкциям состоит из стальных двутавровых балок D_k , деревянных балок B_k , деревянных элементов заполнения Z_k и стальных колонн L_k . Все они тоже рассматриваются как элементы-подсистемы перекрытия. На рис. 4 схематично показан пример их раскладки. Здесь в состав перекрытия входят также четыре подсистемы: подсистема «стальные балки» ($d = 3$), подсистема «деревянные балки» ($b = 22$), подсистема «элементы заполнения» ($z = 1$) и подсистема «колонны» ($l = 2$). Это перекрытие в дальнейшем изложении будет обозначено как объединенная система «перекрытие $U(DBZL)$ ».

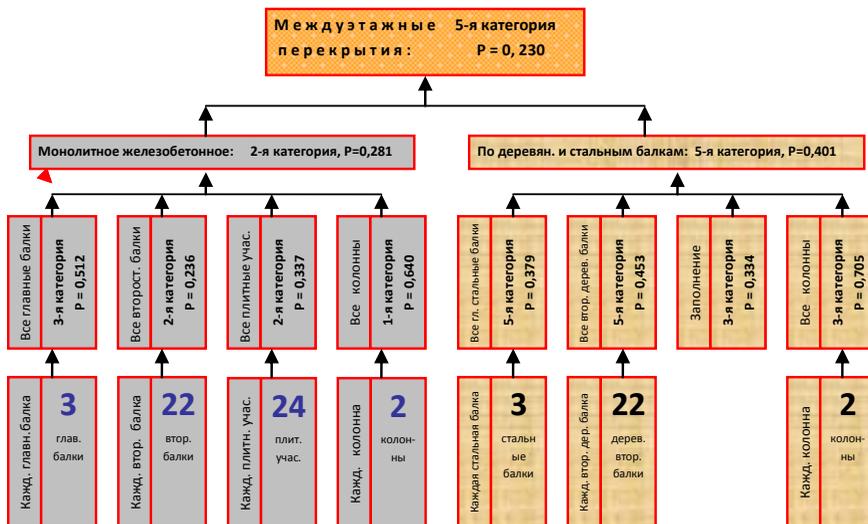


Рис. 2. Часть диагностического дерева для конструктивной системы «междуэтажные перекрытия»

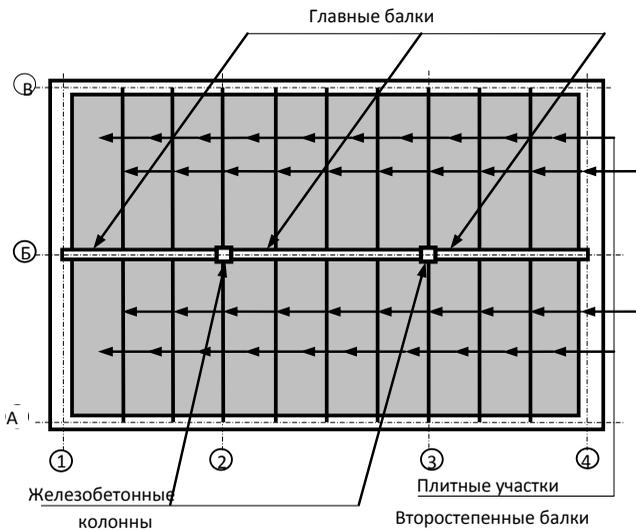


Рис. 3. Схема раскладки балок монолитного железобетонного перекрытия

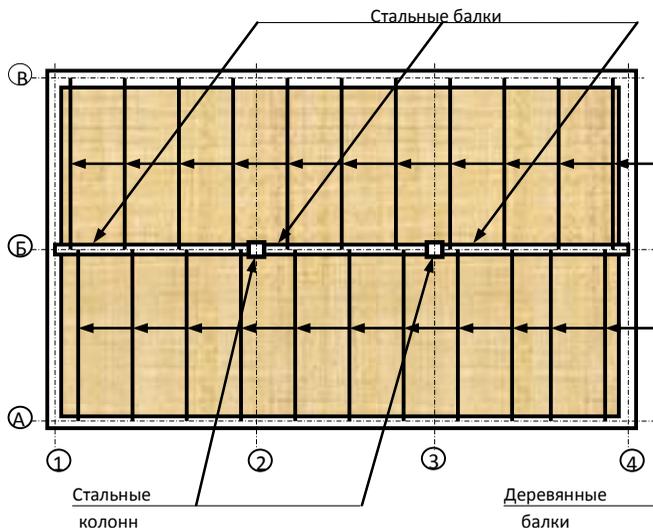


Рис. 4. Схема раскладки элементов перекрытия по стальным и деревянным балкам

Для анализа технического состояния, а также для назначения категорий технического состояния рассматриваемых перекрытий и их подсистем в соответствии с [1], предложен подход, основанный на теоретическом аппарате технической диагностики, использующем вероятностные методы распознавания состояний сложных технических систем. Диагностирование выполняется статистическим методом с применением обобщенной формулы Байеса [2-5]

$$P(S_i / K^*) = \frac{P(S_i)P(K^* / S_i)}{\sum_{s=1}^n P(S_s)P(K^* / S_s)}$$

После вычисления апостериорных вероятностей состояний $P(S_i / K^*)$ для каждого элемента каждой подсистемы по указанной зависимости осуществляется анализ полученных результатов с использованием аппарата теории информации, в частности, с использованием понятий информационной энтропии [3-5].

Процедура построения решения для диагностирования состояний подсистем «перекрытия $U(GWFL)$ » рассмотрена в статье [3]. Результаты диагностирования в общем виде представлены в табличной форме (табл.1).

Таблица 1
Результаты диагностирования для системы «перекрытие $U(GWFL)$ »

Подсистемы	$P_1(U_k)$	$P_2(U_k)$	$P_3(U_k)$	$P_4(U_k)$	$P_5(U_k)$	$H(U_k)$	$V(U_k)$	$P(V_k)$
Главные балки	$P_1(G_k)$	$P_2(G_k)$	$P_3(G_k)$	$P_4(G_k)$	$P_5(G_k)$	$H(G_1G_2...G_k)$	$V(G_1G_2...G_k)$	$P(V_g)$
Второстепенные балки	$P_1(W_k)$	$P_2(W_k)$	$P_3(W_k)$	$P_4(W_k)$	$P_5(W_k)$	$H(W_1W_2...W_k)$	$V(W_1W_2...W_k)$	$P(V_w)$
Плитные участки	$P_1(F_k)$	$P_2(F_k)$	$P_3(F_k)$	$P_4(F_k)$	$P_5(F_k)$	$H(F_1F_2...F_k)$	$V(F_1F_2...F_k)$	$P(V_f)$
Колонны	$P_1(L_k)$	$P_2(L_k)$	$P_3(L_k)$	$P_4(L_k)$	$P_5(L_k)$	$H(L_1L_2...L_k)$	$V(L_1L_2...L_k)$	$P(V_l)$

Окончательные зависимости для распределения вероятностей состояния системы «перекрытие $U(GWFL)$ » записаны в следующем виде [3, 4]:

$$\begin{aligned}
 P_1(U) / K_u^* &= \sum_{k=1}^u P(U_{k1} / K_u^*) P(U_k) = P(U_{11} / K_u^*) P(V_1) + \dots + P(U_{41} / K_u^*) P(V_4); \\
 P_2(U) / K_u^* &= \sum_{k=1}^u P(U_{k2} / K_u^*) P(U_k) = P(U_{12} / K_u^*) P(V_1) + \dots + P(U_{42} / K_u^*) P(V_4); \\
 P_3(U) / K_u^* &= \sum_{k=1}^u P(U_{k3} / K_u^*) P(U_k) = P(U_{13} / K_u^*) P(V_1) + \dots + P(U_{43} / K_u^*) P(V_4); \\
 P_4(U) / K_u^* &= \sum_{k=1}^u P(U_{k4} / K_u^*) P(U_k) = P(U_{14} / K_u^*) P(V_1) + \dots + P(U_{44} / K_u^*) P(V_4); \\
 P_5(U) / K_u^* &= \sum_{k=1}^u P(U_{k5} / K_u^*) P(U_k) = P(U_{15} / K_u^*) P(V_1) + \dots + P(U_{45} / K_u^*) P(V_4).
 \end{aligned} \tag{1}$$

В статье [4] для этого перекрытия приведены численные результаты вероятностного анализа, основанные на построенных для его подсистем матрицах диагнозов. Полученные значения расчетных вероятностных параметров сведены в табл.2.

Таблица 2
Численные значения вероятностных параметров

Подсистемы	$P(U_{k1})$	$P(U_{k2})$	$P(U_{k3})$	$P(U_{k4})$	$P(U_{k5})$	$H(U_k)$	$V(U_k)$	$P(V_k)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Главные балки	0,144	0,285	0,512	0,060	0,0006	1,372	0,728	0,059
Второстепенные балки	0,181	0,236	0,177	0,223	0,183	9,93	5,47	0,446
Плитные участки	0,318	0,337	0,218	0,107	0,020	11,34	5,46	0,445
Колонны	0,640	0,218	0,089	0,049	0,0043	0,796	0,604	0,049

По данным табл.2 на основе предложенной в [3, 4] методики вычислена энтропия состояний системы «перекрытие $U(GWFL)$ »

$$H(U_k) = \sum_{k=1}^u H(U_k) = H(U_1) + H(U_2) + H(U_3) + H(U_4) = 23,44,$$

затем степень определенности или количество внесенной информации (табл.3, колонка 8)

$$V(U_k) = \sum_{k=1}^u V(U_k) = V(U_1) + V(U_2) + V(U_3) + V(U_4) = 12,26.$$

Вводится понятие вероятностей степени определенности (табл.3, колонка 9). Формулы для их определения имеют вид:

$$P(V_1) = V(U_1)/V(U_k) = 0,728/12,26 = 0,059;$$

$$P(V_2) = V(U_2)/V(U_k) = 5,47/12,26 = 0,446;$$

$$P(V_3) = V(U_3)/V(U_k) = 5,46/12,26 = 0,445;$$

$$P(V_4) = V(U_4)/V(U_k) = 0,604/12,26 = 0,049.$$

Тогда для перекрытия в целом апостериорные вероятности состояний $P_i(U)/K_u^*$ в соответствии с (1) получились равными:

$$P_1(U)/K_u^* = 0,262; \quad P_2(U)/K_u^* = 0,281; \quad P_3(U)/K_u^* = 0,211;$$

$$P_4(U)/K_u^* = 0,154; \quad P_5(U)/K_u^* = 0,091.$$

Следует иметь ввиду, что с одной стороны, основываясь на общем большом количестве диагностируемых элементов всего перекрытия, максимальное значение энтропии можно определить по зависимости $H(U_k)_{max} = H(U_k) + V(U_k) = 23,44 + 12,26 = 35,70$. С другой стороны этот максимум $H(U_k)_{max}$ по определению [2] вычисляется по формуле $H(U_k)_{max} = k \log n$. Если $k = 4$ (четыре подсистемы) и $n = 5$ (пять состояний), то $H(U_k)_{max} = 2,800$. Для диагностирования с выходом на следующий уровень предлагается принять значение максимума $H(U_k)_{max} = 2,800$, а $H(U_k)$ и $V(U_k)$ назначить в долях, которые предлагается взять по результатам расчета на данном уровне. Таким образом, скорректированные значения $H(U_k)$ и $V(U_k)$, вычисленные в соответствующих пропорциях, для дальнейшего анализа предлагается принять равными:

$$H(U_k) = (2,800 \cdot 23,44/35,7) = 1,840;$$

$$V(U_k) = (2,800 \cdot 12,26/35,7) = 0,960.$$

Процедура построения решения и численные результаты при диагностировании состояний подсистем деревянного перекрытия $U(DBZL)$ на основе построенных для них диагностических матриц подробно рассмотрены в статье [5]. Результаты сведены в табл.3. Численные же значения этих параметров представлены в табл.4 [5].

Таблица 3
Результаты диагностирования для системы «перекрытие $U(DBZH)$ »

Подсистемы	$P_1(U_k)$	$P_2(U_k)$	$P_3(U_k)$	$P_4(U_k)$	$P_5(U_k)$	$H(U_k)$	$V(U_k)$	$P(V_k)$
Стальные балки	$P_1(D_k)$	$P_2(D_k)$	$P_3(D_k)$	$P_4(D_k)$	$P_5(D_k)$	$H(D_1D_2...D_k)$	$V(D_1D_2...D_k)$	$P(V_d)$
Деревянные балки	$P_1(B_k)$	$P_2(B_k)$	$P_3(B_k)$	$P_4(B_k)$	$P_5(B_k)$	$H(B_1B_2...B_k)$	$V(B_1B_2...B_k)$	$P(V_b)$
Элементы заполнения	$P_1(Z_k)$	$P_2(Z_k)$	$P_3(Z_k)$	$P_4(Z_k)$	$P_5(Z_k)$	$H(Z_1Z_2...Z_k)$	$V(Z_1Z_2...Z_k)$	$P(V_z)$
Колонны	$P_1(H_k)$	$P_2(H_k)$	$P_3(H_k)$	$P_4(H_k)$	$P_5(H_k)$	$H(H_1H_2...H_k)$	$V(H_1H_2...H_k)$	$P(V_h)$

Таблица 4
Численные значения вероятностных параметров

Подсистемы	$P(U_{k1})$	$P(U_{k2})$	$P(U_{k3})$	$P(U_{k4})$	$P(U_{k5})$	$H(U_k)$	$V(U_k)$	$P(V_k)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Стальные балки	0,013	0,064	0,212	0,332	0,379	2,028	0,578	0,108
Деревянные балки	0,065	0,047	0,135	0,297	0,453	10,39	4,26	0,734
Элементы заполнения	0,317	0,334	0,219	0,109	0,020	0,600	0,063	0,012
Колонны	0,705	0,205	0,057	0,030	0,003	0,796	0,464	0,148

По данным табл.4 вычислена энтропия состояний системы «перекрытие $U(DBZL)$ »

$$H(U_k) = \sum_{k=1}^u H(U_k) = H(U_1) + H(U_2) + H(U_3) + H(U_4) = 13,81,$$

затем степень определенности (колонка 8 таблицы 4)

$$V(U_k) = \sum_{k=1}^u V(U_k) = V(U_1) + V(U_2) + V(U_3) + V(U_4) = 5,37.$$

Вероятности степени определенности в последней колонке табл.4 вычислены по формуле $P(V_k) = V(U_k)/V(DBZL)$.

Тогда для этого перекрытия ряд численных значений апостериорных вероятностей состояния $P_i(U)/K_u^*$ запишется в следующем виде [5]:

$$P_1(U)/K_u^* = 0,066; \quad P_2(U)/K_u^* = 0,117; \quad P_3(U)/K_u^* = 0,138;$$

$$P_4(U)/K_u^* = 0,276; \quad P_5(U)/K_u^* = \underline{0,401}.$$

Здесь, также как и для «перекрытия $U(GWFL)$ », максимальное значение энтропии при учете диагностируемых параметров всех элементов всех уровней составляет величину $H(U_k)_{max} = H(U_k) + V(U_k) = 13,81 + 5,37 = 19,18$. С другой стороны $H(U_k)_{max} = k \log n = 2,800$. Тогда скорректированные значения $H(U_k)$ и $V(U_k)$, вычисленные в соответствующих пропорциях, при переходе на следующий уровень диагностирования предлагается принять равными:

$$H(U_k) = (2,800 \cdot 13,81/19,18) = 2,016;$$

$$V(U_k) = (2,800 \cdot 5,37/19,18) = 0,784.$$

Таким образом, для двух систем – «перекрытие $U(GWFL)$ » и «перекрытие $U(DBZL)$ », получены вероятностные параметры, с помощью которых можно провести анализ технического состояния конструктивной системы следующего уровня – «междуэтажные перекрытия MU » (см.рис. 2). При этом вероятности степени определенности с учетом скорректированных значений $H(U_k)$ и $V(U_k)$ вычисляются следующим образом

$$P(V_1) = V(U_1)/V(U_k) = 0,960/(0,960+0,784) = 0,550;$$

$$P(V_2) = V(U_2)/V(U_k) = 0,784/(0,960+0,784) = 0,450.$$

Результаты расчетов также удобно свести в аналогичную таблицу (табл. 5).

Таблица 5

Численные значения вероятностных параметров для системы MU

Перекрытия	$P(U_{k1})$	$P(U_{k2})$	$P(U_{k3})$	$P(U_{k4})$	$P(U_{k5})$	$H(U_k)$	$V(U_k)$	$P(V_k)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U(GWFL)$	0,262	0,281	0,211	0,154	0,091	1,840	0,960	0,550
$U(DBZL)$	0,066	0,117	0,138	0,276	0,401	2,016	0,784	0,450

Для дальнейшего уровневого анализа можно определить энтропию состояний системы «междуэтажные перекрытия MU », учитывая результаты диагностирования всех элементов обоих перекрытий

$$H(MU_k) = \sum_{k=1}^u H(U_k) = H[U(GWFL)] + H[U(DBZL)] = 3,856.$$

Степень определенности (количество внесенной информации)

$$V(MU_k) = \sum_{k=1}^u V(U_k) = V[U(GWFL)] + V[U(DBZL)] = 1,744.$$

Тогда вероятности состояний объединенной системы «междуэтажные перекрытия MU » предлагается вычислить по зависимостям аналогичного характера:

$$\begin{aligned}
 P_1(MU) / K_u^* &= \sum_{k=1}^u P(U_{k1} / K_u^*) P(V_k) = P(U_{11} / K_u^*) P(V_1) + P(U_{21} / K_u^*) P(V_2) = 0,174; \\
 P_2(MU) / K_u^* &= \sum_{k=1}^u P(U_{k2} / K_u^*) P(V_k) = P(U_{12} / K_u^*) P(V_1) + P(U_{22} / K_u^*) P(V_2) = 0,207; \\
 P_3(MU) / K_u^* &= \sum_{k=1}^u P(U_{k3} / K_u^*) P(V_k) = P(U_{13} / K_u^*) P(V_1) + P(U_{23} / K_u^*) P(V_2) = 0,178; \quad (2) \\
 P_4(MU) / K_u^* &= \sum_{k=1}^u P(U_{k4} / K_u^*) P(V_k) = P(U_{14} / K_u^*) P(V_1) + P(U_{24} / K_u^*) P(V_2) = 0,210; \\
 P_5(MU) / K_u^* &= \sum_{k=1}^u P(U_{k5} / K_u^*) P(V_k) = P(U_{15} / K_u^*) P(V_1) + P(U_{25} / K_u^*) P(V_2) = \underline{0,230}.
 \end{aligned}$$

Как видно, по результатам выполненных расчетов техническое состояние системы «междуэтажные перекрытия MU » в данном примере с вероятностью $P(MU) / K_u^* = 0,230$ может быть отнесено к пятой (аварийной) категории. При этом с помощью параметра $V(MU_k)$ в дальнейшем уровне построения решения оценивается вклад состояния этой системы в состояние системы следующего уровня – здания в целом (см.рис. 1).

Это прямой ход диагностирования, позволяющий в итоге определить техническое состояние и категорию для всего здания, а также оценить на этой основе степень и глубину инженерного вмешательства в систему и всех ее подсистем при планировании мероприятий по технической эксплуатации здания.

Интересен обратный ход. Его суть состоит в том, что он позволяет определить информационную долю (вклад) состояния каждого конструктивного элемента каждой подсистемы в общей информации о состоянии системы высшего уровня – здания в целом. Представляется, что результаты прохождения по иерархической структуре в обратном направлении вполне могли бы дополнить полученную выше чисто техническую информацию о состоянии объекта еще и стоимостными параметрами.

В качестве примера предлагается проделать обратный ход следующим образом. Предположим, что рассматриваемый уровень диагностирования «междуэтажные перекрытия MU » является высшим (рис.5). В этом случае, как видно из табл.5, доля внесенной информации о состоянии системы «перекрытие $U(GWFL)$ » (монолитное железобетонное) в общей информации о состоянии системы «междуэтажные перекрытия

MU) (условный высший уровень) составляет величину $P(V_1) = 0,550$, а системы «перекрытие $U(DBZL)$ » – величину $P(V_2) = 0,450$. Очевидно, что $P(V_1) + P(V_2) = 1,0$.

Тогда, основываясь на данных табл.2, доля (вклад) состояния подсистемы «главные балки $G_1G_2G_3$ » в состоянии системы «перекрытие $U(GWFL)$ » определится соотношением $0,550 \cdot 0,059 = 0,033$ (3,3%). Далее, в соответствии с данными табл.5 в [4] доля каждого элемента подсистемы «главные балки $G_1G_2G_3$ » будет представлена следующим рядом значений:

- для балки $G_1 - 0,033 \cdot 0,470 = 0,0153$ (1,53%);
- для балки $G_2 - 0,033 \cdot 0,255 = 0,0084$ (0,84%);
- для балки $G_3 - 0,033 \cdot 0,275 = 0,0091$ (0,91%).

Доля (вклад) состояния подсистемы «второстепенные балки $W_1W_2W_3...W_{22}$ » составляет величину $0,550 \cdot 0,446 = 0,245$ (24,5%) и в соответствии с табл.6 в [4] вклад состояний каждой из 22-х второстепенных балок определится диапазоном $0,0062 - 0,0176$ (0,62-1,76%).

Для подсистемы «плитные участки $F_1F_2F_3...F_{24}$ » – $0,550 \cdot 0,445 = 0,245$ (24,5 %), а доля каждого плитного участка [4, табл.7] будет находиться в пределах от $0,0059$ (0,74%) до $0,0179$ (1,79%).

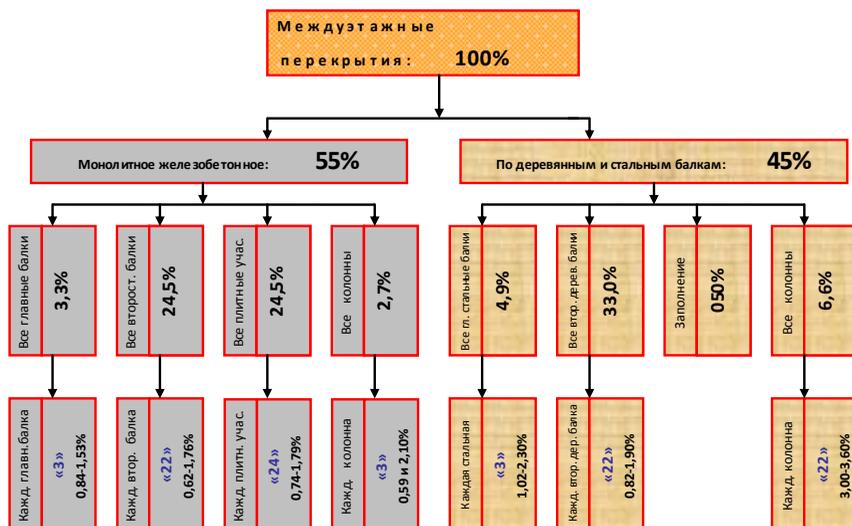


Рис. 5. Часть диагностического дерева для конструктивной системы «междуэтажные перекрытия».

Обратный ход

Для подсистемы «колонны L_1L_2 » – $0,550 \cdot 0,049 = 0,027$ (2,7%) и доля каждой из них определится значениями 0,0059 и 0,0210 (0,59 и 2,10% [4, табл.8]).

Аналогичное распределение долей состояний конструктивных элементов можно получить и для перекрытия по стальным и деревянным балкам, т.е. для конструктивной системы «перекрытие $U(DBZL)$ » (см.рис.5).

Представляется, что это доленое распределение вполне могло бы стать достаточно аргументированным обоснованием при выполнении расчетов физического износа каждого конструктивного элемента каждого уровня диагностирования и объекта в целом. Не исключено, что это распределение может быть использовано и в методиках стоимостных расчетов строительной части при проведении работ по оценке объектов недвижимости.

Библиографический список

1. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. Свод правил по проектированию и строительству. Госстрой России. ГУЛ ЦПП. 2003.
2. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с., ил. – (Надежность и качество).
3. Соколов В.А. Построение решения для оценки технического состояния конструктивных систем зданий и сооружений с использованием вероятностных методов распознавания. Инженерно-строительный журнал, Изд-во СПбГПУ, 2010, №6. С. 48-57.
4. Соколов В.А. Вероятностный метод оценки технического состояния конструкций железобетонного монолитного перекрытия зданий старой городской застройки. Инженерно-строительный журнал, Изд-во СПбГПУ, 2010, №4. С. 49-58.
5. Соколов В.А. Вероятностный анализ технического состояния конструкций зданий старой городской застройки: Сборник трудов Международного симпозиума «Современные строительные конструкции из металла, дерева и пластмасс», №14, часть 1, Внешрекламсервис, ОГАСА, Одесса, 2010. С. 242-250.