Математические структуры и моделирование
2009, вып. 19, с. 85–96

УДК 65.012.8

ТЕОРЕТИКО-ГРАФОВЫЙ АНАЛИЗ РОЛЕВОЙ ПОЛИТИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

С.В. Белим, С.Ю. Белим, Н.Ф. Богаченко

В работе рассматривается формальная модель ролевого разграничения доступа. Представлен классовый подход к построению иерархии ролей, являющийся обобщением классического листового принципа распределения полномочий в ролевой политике безопасности. Показана возможность построения данной политики на произвольном ориентированном графе ролей.

Проблема разграничения доступа к данным является ключевым элементом систем безопасности компьютерной информации. Анализ теоретических исследований и программно-технических разработок в области информационной безопасности позволяет выделить четыре основных подхода в построении политики разграничения доступа [1]: дискреционные, мандатные, тематические и ролевые модели.

Особый интерес представляет ролевая политика безопасности. Это обусловлено тем, что на практике получила широкое распространение технология рабочих групп пользователей в системах разграничения доступа, являющаяся упрощенным вариантом ролевой политики, тогда как формальная ролевая модель изучена недостаточно полно.

1. Ролевая политика безопасности

Рассмотрим базовую модель ролевого разграничения доступа [1, 2], характеризующуюся неизменными установками системы безопасности. Выделим основные элементы, которые понадобятся для дальнейшего описания.

Основные множества:

1. U – множество пользователей системы.
2. R – множество ролей, возможных в системе.
3. P – множество полномочий (прав) на действия в системе.

Омский государственный университет.
E-mail: nfbogachenko@mail.ru

Зададим *отображения*, определяющие функционирование системы под управлением ролевой политики безопасности:

1. $RP : R \to 2^P$ – множество полномочий для роли, при этом $\forall\ p \in P\ \exists\ r \in R:\ p \in RP(r)$.

2. $UR : U \to 2^R$ – множество ролей, на которые может быть авторизирован пользователь. Следует отметить, что возможно существование ролей, на которые не авторизирован ни один пользователь.

Определение 1. ***Иерархией ролей*** будем называть отношение частичного нестрогого порядка, заданное на множестве ролей R. При этом, если $r_2 \le r_1$, то r_1 находится в иерархии ролей «выше», чем r_2 [1].

Исходя из определения, иерархию ролей можно представить в виде ориентированного графа $G = (R, E)$. Множество вершин R – это множество ролей. Дуга $(r_1, r_2) \in E$, если в иерархии ролей $r_2 \le r_1$ [2].

В большинстве работ, посвященных ролевому разграничению доступа, принято считать, что иерархия ролей имеет вид ориентированного дерева [1, 2], в дальнейшем будем называть его ***деревом ролей*** и обозначать $T = (R, E)$.

При иерархическом отношении ролей важным является вопрос построения отображения RP, задающего распределение множества полномочий для ролей, а именно, возможно ли назначение одного и того же набора полномочий двум ролям, находящимся в иерархическом подчинении. При этом применяется механизм наследования «снизу – вверх»: назначение полномочий начинается с листовых вершин – ***листовое распределение прав доступа***. Для этого случая возможны три подхода к построению отображения RP [1]:

1. Строго таксономический листовой подход. Все множество полномочий разбивается на непересекающиеся подмножества:

$$P = \bigcup_{i=1}^{k} P_i,\ \forall i, j \in \{1, \ldots, k\} :\ P_i \cap P_j = \varnothing. \qquad (1)$$

Здесь k – количество листовых вершин дерева ролей. Пусть R_L ($R_L \subset R$) – множество листовых вершин. Каждой листовой вершине дерева ролей r_i отображение RP сопоставляет одно из подмножеств P_i:

$$\forall r_i \in R_L : RP(r_i) = P_i. \qquad (2)$$

[1]Необходимо также выполнение еще одного условия: $\forall u \in U : (r, r' \in R) \wedge (r \in UR(u)) \wedge (r' \le r) \Rightarrow (r' \in UR(u))$. То есть вместе с заданной ролью пользователь должен быть авторизирован и на все роли, которые лежат в иерархии ниже.

[2]Если следовать системе обозначений графического языка моделирования UML (Unified Modeling Language), позволяющего представлять различные объектно-ориентированные проекты в единых обозначениях, то дугу надо ориентировать от младшей роли r' – к старшей r. Чтобы сохранить терминологию теории графов, будем считать, что дуги направлены от старших ролей – к младшим. Очевидно, в обоих случаях отношение порядка, задающее иерархию ролей, и соответствующий неориентированный граф останутся неизменными.

Полномочия остальных (нелистовых) вершин дерева ролей определяются как объединение полномочий непосредственно подчиненных им ролей:

$$\forall r \notin R_L : RP(r) = \bigcup_{r' \in Ch(r)} RP(r'), \tag{3}$$

где $Ch(r)$ – полный набор сыновей вершины r.

2. Нетаксономический листовой подход. Полномочия непосредственно получают также только листовые роли, а полномочия остальных ролей получаются объединением полномочий сыновей. Однако допускается непустое пересечение полномочий листовых ролей:

$$P = \bigcup_{i=1}^{k} P_i,\ \exists i, j \in \{1, \ldots, k\} :\ P_i \cap P_j \neq \varnothing. \tag{4}$$

3. Иерархический охватный листовой подход. В набор полномочий старших ролей непосредственно включаются (добавляются) только те полномочия, которые не вошли в наборы полномочий подчиненных ролей.

За счет иерархической структуры, во всех трех случаях в итоговом наборе полномочий присутствуют все полномочия подчиненных ролей.

2. Разбиение ролей на классы эквивалентности

Пусть иерархия ролей задана в виде ориентированного дерева $T = (R, E)$. Определим разбиение множества листовых вершин R_L дерева ролей T на k подмножеств:

$$R_L = \bigcup_{i=1}^{k} R_L^{(i)},\ \forall i, j \in \{1, \ldots, k\} : R_L^{(i)} \cap R_L^{(j)} = \varnothing. \tag{5}$$

Данное разбиение задает отношение эквивалентности $\stackrel{R_L}{\backsim}$ на множестве листовых вершин.

Рассмотрим теперь ***классовое распределение прав доступа***. Пусть две роли, относящиеся к одному классу эквивалентности листовых вершин, имеют одинаковые права:

$$\forall r_1, r_2 \in R_L : (r_1 \stackrel{R_L}{\backsim} r_2) \Rightarrow (RP(r_1) = RP(r_2)). \tag{6}$$

Как и для традиционного листового распределения полномочий, возможны три алгоритма построения отображения RP на всем множестве ролей R.

1. Строго таксономический классовый подход. Разобъем множество P на k непересекающихся подмножеств по числу классов эквивалентности листовых вершин дерева ролей:

$$P = \bigcup_{i=1}^{k} P_i,\ \forall i, j \in \{1, \ldots, k\} :\ P_i \cap P_j = \varnothing. \tag{7}$$

Распределение прав, определяющееся отображением $RP : R \to 2^P$, зададим для листовых вершин в следующем виде:

$$\forall r \in R_L^{(i)} : RP(r) = P_i. \tag{8}$$

Для нелистовых вершин множество прав будем определять как объединение прав всех вершин, которые являются сыновьями данной вершины:

$$\forall r \notin R_L : RP(r) = \bigcup_{r' \in Ch(r)} RP(r'). \tag{9}$$

Здесь, как и прежде, через $Ch(r)$ обозначено множество всех сыновей вершины r.

2. Нетаксономический классовый подход. Аналогично предыдущему случаю, рапределение прав изначально производится только между листовыми вершинами, но множества прав различных классов эквивалентности листовых вершин могут пересекаться.

3. Иерархический охватный классовый подход. Распределение прав производится между классами эквивалентности листовых вершин и передается по иерархическим принципам. Но, кроме того, нелистовые вершины, унаследовавшие одинаковые наборы прав, могут одновременно получать дополнительные права.

Очевидно, что каждый из трех листовых подходов распределения полномочий является частным случаем соответствующего классового подхода при условии: $|R_L^{(i)}| = 1$, где $\{R_L^{(i)}\}_{i=1}^k$ – начальное разбиение множества листовых вершин, другими словами, каждая листовая вершина образует отдельный класс разбиения.

Оказывается, что разбиение листовых вершин дерева ролей вместе с правилами построения отображения RP порождает разбиение всего множества ролей.

Определение 2. Будем считать две роли ***эквивалентными***, если они наделены одинаковыми правами:

$$\forall r_1, r_2 \in R : (RP(r_1) = RP(r_2)) \Rightarrow (r_1 \overset{RP}{\backsim} r_2). \tag{10}$$

Определение 3. Отношение эквивалентности $\overset{RP}{\backsim}$ задает разбиение множества ролей R. Полученные классы эквивалентности ролей будем называть RP***-классами***.

Определение 4. Каждому узлу r дерева ролей припишем соответствующий данной роли набор полномочий $RP(r)$. Результирующее помеченное дерево ролей назовем RP***-деревом***.

Итак, в RP-дереве в один RP-класс попадают вершины, помеченные одним и тем же набором полномочий.

Обозначим число RP-классов через K, а число классов эквивалентности листовых вершин через k. Очевидно, что в случае строгого таксономического классового подхода $K \geqslant k$. При двух других подходах возможно получить $K < k$ в тех ситуациях, когда несколько классов эквивалентности листовых вершин наделяются одним и тем же набором полномочий.

3. Оптимальные RP-деревья

Определение 5. RP-дерево называется ***вырожденным***, если на нем существует ровно один RP-класс: $K = 1$.

Например, вырожденным является RP-дерево, представляющее собой ориентированную цепь в случае строго таксономического классового подхода.

Определение 6. RP-дерево называется ***оптимальным***, если количество заданных на нем RP-классов совпадает с количеством вершин: $K = |R|$.

Заметим, что неоптимальность может быть присуща не только RP-деревьям, полученным в результате классового распределения полномочий. Она может появиться и при листовом построении отображения RP.

Очевидно, что для оптимальности RP-дерева необходимо потребовать, чтобы в начальном разбиении множества листовых вершин каждый лист составлял отдельный класс (использовалось листовое распределение полномочий). Далее рассмотрим необходимые и достаточные условия оптимальности.

Теорема 1. *При строго таксономическом листовом подходе распределения прав RP-дерево является оптимальным тогда и только тогда, когда полустепень исхода (число исходящих дуг) каждой нелистовой вершины не меньше двух:*

$$\forall r \notin R_L : d^-(r) \geqslant 2. \tag{11}$$

Доказательство. Пусть RP-дерево является оптимальным. Тогда

$$\forall r_1, r_2 \in R : (r_1 \neq r_2) \Rightarrow (RP(r_1) \neq RP(r_2)). \tag{12}$$

От противного. Пусть $\exists r_1 \notin R_L : d^-(r_1) < 2$, следовательно, $d^-(r_1) = 1$. Тогда вершина r_1 имеет ровно одного сына, обозначим его r_2. Согласно правилам строго таксономического листового подхода: $RP(r_1) = RP(r_2)$ – противоречие.

Пусть теперь выполнено неравенство (11). Рассмотрим две различные вершины $r_1, r_2 \in R$. Надо показать справедливость условия (12). Заметим, что требование (11) влечет выполнение следующего неравенства:

$$\forall r_1, r_2 \in R : (r_1 \neq r_2) \Rightarrow (R_L(r_1) \neq R_L(r_2)), \tag{13}$$

где $R_L(r_i)$ – потомки вершины r_i, являющиеся листовыми вершинами в случае, когда $r_i \notin R_L$, либо сама вершина r_i, если она листовая. Данное утверждение очевидным образом следует из ацикличности принятой иерархии ролей (T – дерево). Согласно введенной системе обозначений, при строго таксономическом листовом подходе:

$$\forall r \in R : RP(r) = \bigcup_{r' \in R_L(r)} RP(r') \tag{14}$$

и

$$\forall r', r'' \in R_L : (r' \neq r'') \Rightarrow (RP(r') \cap RP(r'') = \varnothing). \tag{15}$$

Из (13) и (15) следует:

$$\forall r_1, r_2 \in R : (r_1 \neq r_2) \Rightarrow \left(\bigcup_{r' \in R_L(r_1)} RP(r') \neq \bigcup_{r' \in R_L(r_2)} RP(r') \right). \qquad (16)$$

Принимая во внимание равенство (14), получаем условие (12). ■

Теорема 2. *При нетаксономическом листовом подходе распределения прав, RP-дерево является оптимальным тогда и только тогда, когда полустепень исхода каждой нелистовой вершины не меньше двух (выполнено условие (11)) и разбиение множества прав P на подмножества P_i произведено таким образом, что*

$$\forall j \in \{1, \ldots, k\} : \; P_j \nsubseteq \bigcup_{i=1, i\neq j}^{k} P_i. \qquad (17)$$

Доказательство. Необходимость доказывается аналогично предыдущей теореме. При доказательстве достаточности условие (15) заменяется условием (17). Пусть $I_1, I_2 \subseteq \{1, \ldots, k\} : (I_1 \neq I_2)$, тогда $\exists j : (j \in I_1) \wedge (j \notin I_2)$. Согласно (17): $P_j \nsubseteq \bigcup_{i \in I_2} P_i$, следовательно, $\bigcup_{i \in I_1} P_i \nsubseteq \bigcup_{i \in I_2} P_i$. В результате:

$$\forall I_1, I_2 \subseteq \{1, \ldots, k\} : (I_1 \neq I_2) \Rightarrow \left(\bigcup_{i \in I_1} P_i \neq \bigcup_{i \in I_2} P_i \right). \qquad (18)$$

Тогда, принимая во внимание неравенство (13) и то, что $\forall r_i \in R_L : RP(r_i) = P_i$, получаем (16) и, как следствие, (12). ■

Отметим, что при иерархическом охватном листовом подходе оптимальным может быть RP-дерево произвольной структуры (например, ориентированная цепь) за счет того, что нелистовые вершины не только наследуют права, но и получают их непосредственно.

4. Расширение и оптимизация RP-деревьев

В дальнейшем выбранный подход к построению отображения RP будем указывать в названии RP-дерева.

Определение 7. Пусть T – RP-дерево. RP***-характеристикой*** T называется спецификация, указывающая, какой именно подход был применен при построении отображения RP:

1. Дерево T называется *таксономическим* (или *нетаксономическим*, или *охватным*), если при распределении прав был использован строго таксономический (или нетаксономический, или иерархический охватный) подход.

2. Если важно подчеркнуть, что было использовано листовое (классовое) распределение полномочий, то T – *листовое* (*классовое*) дерево.

Определение 8. ***Расширение*** RP-дерева T – это процесс построения RP-дерева T', такого, что

1. T является подграфом T'.
2. $\forall r \in R_T$: $RP_T(r) = RP_{T'}(r)$ – множество RP-классов T является подмножеством множества RP-классов T'.

Теорема 3. *Произвольное RP-дерево может быть расширено до таксономического (в общем случае классового) RP-дерева.*

Доказательство. Пусть T – произвольное RP-дерево. Построим искомое RP-дерево T'. Все вершины, дуги и полномочия дерева T перенесем в дерево T'. Тем самым условия определения 8 будут выполнены.

Пусть каждой листовой вершине r_i сопоставлен набор полномочий $P_i = \{p_{i1}, \ldots, p_{im_i}\}$. Если $|P_i| = m_i > 1$, то в дереве T' к этой вершине присоединим m_i листовых вершин, каждая из которых будет наделена правом p_{ij} ($j \in \{1, \ldots, m_i\}$).

Двигаясь по дереву T' от листьев к корню, каждую нелистовую вершину r пополним сыновьями-листьями по числу полномочий из набора $RP(r)$ дерева T, которые не были унаследованы (каждой новой вершине припишем соответствующее право).

В результате в дереве T' каждая нелистовая вершина не получает ни одного полномочия непосредственно, а лишь наследует их от сыновей:

$$\forall r \notin R_L : RP(r) = \bigcup_{r' \in Ch(r)} RP(r'). \tag{19}$$

Каждой листовой вершине дерева T' приписано одно-единственное полномочие. Объединяя листовые вершины с одним и тем же значением $RP(r) = \{p_i\}$ в один класс разбиения листовых вершин $R_L^{(i)}$, получаем:

$$\forall r \in R_L^{(i)} : RP(r) = \{p_i\} = P_i,\ \forall i, j \in \{1, \ldots, k\} : P_i \cap P_j = \varnothing. \tag{20}$$

Итак, отображение RP удовлетворяет всем требованиям строго таксономического классового подхода, следовательно, T' – таксономическое RP-дерево (см. рис. 1). ■

Расширяя RP-дерево, мы тем самым строим новую ролевую политику, наследующую все роли и их иерархию из исходной модели.

В силу теоремы 3, одним из преимуществ классового распределения полномочий является возможность расширения нетаксономических или охватных RP-деревьев до строго таксономических классовых, то есть возможна смена произвольной RP-характеристики дерева на таксономическую. Но, к сожалению, при таком преобразовании, как правило, увеличивается количество ролей (и RP-классов) в системе.

В противовес расширению RP-дерева можно рассматривать в некотором смысле обратную операцию. Если в RP-дереве найдется хотя бы один RP-класс,

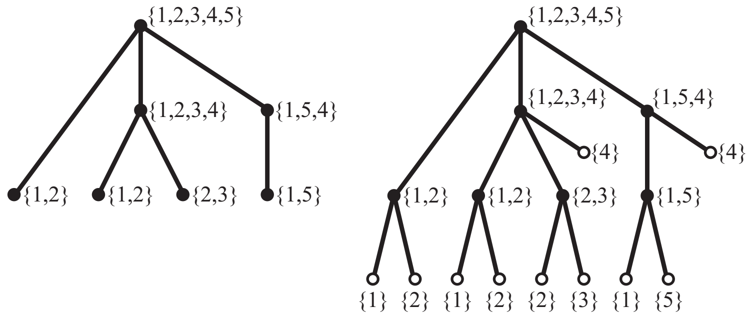

Рис. 1. Охватное классовое RP-дерево T (слева) расширено до таксономического классового RP-дерева T' (справа)

содержащий несколько ролей, то дерево не оптимально, а это свидетельствует о наличии в политике безопасности «дублирующих» ролей. Естественно попытаться преобразовать иерархию ролей так, чтобы результирующее RP-дерево стало оптимальным и при этом не изменилось множество RP-классов системы.

Определение 9. Два RP-дерева T и T' ***эквивалентны***, если множества их RP-классов совпадают (совпадают различные наборы полномочий, встречающиеся в структуре).

Например, если в RP-дереве T на рисунке 1 удалить левое ребро, то получим RP-дерево, задающее уже другую иерархию ролей, но эквивалентное исходному.

Определение 10. ***Оптимизация*** RP-дерева T – это процесс построения RP-дерева T' такого, что

1. T' эквивалентно T.

2. T' – оптимальное RP-дерево.

Заметим, что RP-дерево, полученное в результате оптимизации, будет листовым в силу оптимальности.

Попытаемся ответить на следующие вопросы. Любое ли RP-дерево поддается оптимизации? Как при этом ведет себя RP-характеристика дерева?

Если RP-дерево является листовым и вершины в пределах одного RP-класса не связаны дугами (иначе достаточно произвести попарное *стягивание* таких вершин, как эта операция понимается в теории графов [3]), то добиться оптимальности в ряде случаев можно за счет перестройки древовидной структуры и изменения RP-характеристики на охватную. Этот подход не столь интересен, так как, исходя из практических приложений, желательно получить эквивалентное оптимальное таксономическое RP-дерево.

5. Ролевая политика безопасности на произвольном ориентированном графе

Получение эквивалентной оптимальной структуры с той же RP-характеристикой представляется возможным за счет отказа от древовидности и построения эквивалентного ориентированного графа, задающего иерархию ролей.

Теорема 4. *Ориентированный граф задает иерархию ролей (является орграфом ролей) тогда и только тогда, когда в нем отсутствуют ориентированные циклы.*

Доказательство. Отсутствие ориентированных циклов необходимо и достаточно для существования отношения частичного порядка, а именно свойств транзитивности и антисимметричности. ∎

Заметим, что в орграфе без ориентированных циклов найдется как минимум один сток (вершина с нулевой полустепенью исхода: $d^-(t_i) = 0$) и как минимум один источник (вершина с нулевой полустепенью захода: $d^+(s) = 0$). Далее будем рассматривать ориентированные графы с одним источником.

Распределение прав по произвольному орграфу ролей, так же как и по дереву ролей, может производиться одним из трех способов. При этом построение отображения RP начинается либо со стоков (листовое распределение), либо с классов эквивалентности, на которые разбиты стоки (классовое распределение).

Определения оптимальности, расширяемости, эквивалентности и оптимизации очевидным образом переносятся на случай RP-орграфа (помеченного орграфа ролей).

Теорема 5. *Произвольное RP-дерево может быть оптимизировано до RP-орграфа.*

Доказательство. В RP-дереве достаточно *склеить* вершины, соответствующие эквивалентным ролям, если они не соединены дугами, либо попарно *стянуть*, если такие дуги имеются (операции склейки и стягивания вершин понимаются в соответствии с определениями теории графов [3]). В результате множество RP-классов останется прежним, но орграф будет оптимальным (см. рис. 2). ∎

Следствие 5.1. *Из алгоритма построения эквивалентного оптимального RP-орграфа G непосредственно следует ряд свойств этой структуры:*

1. *G имеет один источник s.*

2. *Число стоков t_i в G совпадает с числом классов разбиения $R_L^{(i)}$ листовых вершин исходного RP-дерева T.*

3. *Если исходное RP-дерево T являлось оптимальным, то $G = T$.*

4. *G – листовой RP-орграф.*

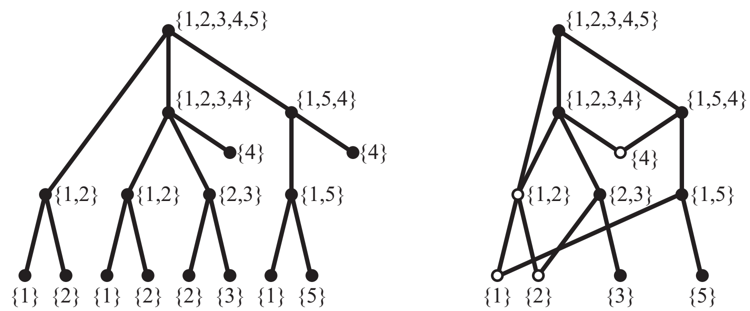

Рис. 2. Таксономическое классовое RP-дерево T (слева) оптимизировано до листового таксономического RP-орграфа G (справа)

Следствие 5.2. *Если исходное RP-дерево таксономическое, то построенный по предложенному алгоритму эквивалентный оптимальный RP-орграф также таксономический.*

Доказательство. Стягивание двух вершин, соответствующих эквивалентным ролям, по дуге их соединяющей не изменяет RP-характеристику. При склейке вершин из одного RP-класса результирующий набор сыновей будет распределен по тем же RP-классам, что и в исходном RP-дереве – тем самым сохранится таксономичность структуры. ■

Следствие 5.3. *Если исходное RP-дерево нетаксономическое, то построенный по предложенному алгоритму эквивалентный оптимальный RP-орграф также нетаксономический.*

Следствие 5.4. *Если исходное RP-дерево охватное, то построенный по предложенному алгоритму эквивалентный оптимальный RP-орграф может оказаться охватным, нетаксономическим или таксономическим.*

Обобщая вышесказанное, получаем следующую возможную последовательность построения ролевой политики безопасности:

1. Исходя из содержательной постановки задачи, построить RP-дерево T_1 (листовое или классовое).

2. Расширить T_1 до таксономического (в общем случае классового) RP-дерева T_2 (см. теорему 3).

3. Преобразовать T_2 в эквивалентный оптимальный таксономический RP-орграф T_3 (см. теорему 5).

Таким образом, любую ролевую модель распределения полномочий можно расширить до политики, в которой иерархия ролей задана орграфом без ориентированных циклов, роли распределены в соответствии со строго таксономическим листовым подходом и RP-структура оптимальна.

Оказывается, предложенный в теореме 5 алгоритм обратим: по произвольному RP-орграфу можно построить эквивалентное (но не обязательно оптимальное) RP-дерево.

Теорема 6. *Для произвольного RP-орграфа существует эквивалентное ему RP-дерево.*

Доказательство. Пусть дан RP-орграф G. Будем строить эквивалентную ему RP-структуру T. На первом шаге каждому стоку t_i орграфа G сопоставляем $d^+(t_i)$ листьев в T («оригинал» и $(d^+(t_i)-1)$ «дублей»). Эта операция называется *расщеплением* вершины (если полустепень захода равна единице, то имеется только «оригинал»).

Далее, двигаясь по орграфу G от нижних ярусов к источнику, последовательно расщепляем все вершины. «Оригинал» и «дубли» наделяем теми же правами, что были у вершины их образующей. К «оригиналу» присоединяем уже существующие вершины структуры T из тех, что не имеют входящих дуг, восстанавливая сыновей расщепляемой вершины орграфа G (такие вершины в T всегда найдутся по построению). К каждому «дублю» добавляем вершины и дуги так, чтобы подграф, порожденный «дублем», представлял собой копию поддерева, порожденного «оригиналом».

Очевидно, что построенная таким образом иерархия T является RP-деревом и задает те же RP-классы, что и исходный RP-орграф G, то есть ему эквивалентна (см. рис. 3). ■

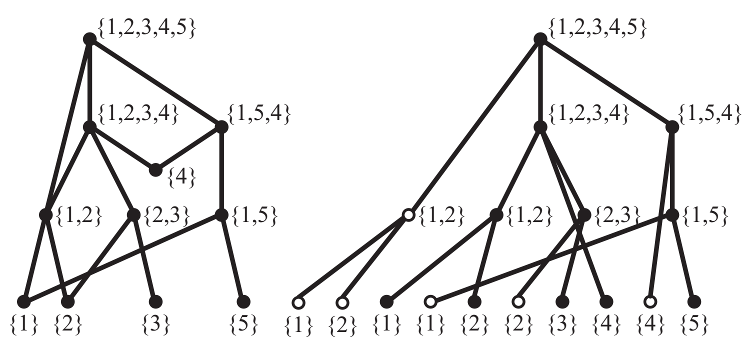

Рис. 3. RP-орграф G (слева) и эквивалентное ему RP-дерево T (справа)

Следствие 6.1. *Количество вершин RP-дерева T, эквивалентного RP-орграфу G и построенного по алгоритму, описанному в теореме, равно*

$$\sum_{r\in R_G} \left(1+(d^+(r)-1)|R_{T(r)}|\right), \tag{21}$$

где R_G *– множество вершин орграфа* G, $R_{T(r)}$ *– множество вершин поддерева, порожденного той вершиной дерева* T, *которая соответствует вершине* r *орграфа* G.

Заметим, что теорема 6 дает возможность свести исследование ролевой политики безопасности на произвольном RP-орграфе к изучению эквивалентного RP-дерева.

Таким, образом, теоремы 5 и 6 позволяют выполнять различные эквивалентные преобразования иерархии ролей в зависмости от того, какой признак более значим: древовидность или оптимальность.

Литература

1. Гайдамакин, Н.А. Разграничение доступа к информации в компьютерных системах / Н.А. Гайдамакин. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2003. – 328 с.
2. Девянин, П.Н. Модели безопасности компьютерных систем / П.Н. Девянин. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 144 с.
3. Новиков, Ф.А. Дискретная математика для программистов / Ф.А. Новиков – СПб.: Питер, 2001. – 304 с.