

УДК 621.313.3

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕМ КОМПЛЕКСЕ

В.В. Гусев, О.П. Муравлев, В.П. Шевчук

Томский политехнический университет

E-mail: vvgus@rambler.ru

*Представлена методология, позволяющая оценить и обеспечить эффективность функционирования электрических машин с точки зрения системного анализа. Произведено деагрегирование цели на составные элементы, которые отражены в виде дерева целей, что позволяет изучить структуру обеспечения эффективности эксплуатации и обслуживания электрических машин. На основе экспертной оценки определены коэффициенты относительной важности компонентов дерева целей. Методология может быть использована для выявления и структуризации проблем, связанных с эксплуатацией и обслуживанием электрических машин.*

### **Ключевые слова:**

*Системный анализ, дерево целей, коэффициент относительной важности, экспертная оценка.*

Основной концепцией обеспечения надежности электрических машин (ЭМ) на современном этапе эксплуатации является системность. Системы обеспечения надежности охватывают весь жизненный цикл эксплуатационного режима: организация технического обслуживания (ТО), ремонт, хранение, эксплуатация. При этом методы обеспечения надежности ЭМ специфичны для каждого этапа. Для систем характерно большое количество компонентов, упорядоченная структура, наличие материальных, энергетических и информационных связей, определенная целостность, многосвязность системы по этим показателям и условиям работы, иерархическая структура. Выбор приоритетных компонентов, их характеристик с учетом всех обстоятельств, возникающих при диагностике, мониторинге, эксплуатации, ТО и ремонте ЭМ подчинен требованию обеспечения эффективности функционирования ЭМ. Поскольку данные аспекты характеризуются многими переплетающимися отношениями, то использование системного анализа (СА) позволит определить весь комплекс мероприятий, необходимых для достижения целей и выявления проблемных ситуаций, требующих первоочередного внимания и концентрации ресурсов [1–5].

Рассматривая данную ситуацию на примере горно-добывающего комплекса в алмазодобывающей отрасли, определим исходные позиции и критерии, являющиеся принципиальным подходом в обеспечении эффективности функционирования ЭМ.

Одним из основных положений СА в структуре алмазодобывающей отрасли является принцип первичности функции системы технологического процесса по отношению к системе обеспечения эффективности функционирования ЭМ. В соответствии с этим принципом структура дерева целей подчиняется основным функциям производственного процесса, которые определяются исходя из целей деятельности алмазодобывающей отрасли. Исходным моментом определения структуры дол-

жна быть функция сохранения во времени в установленных пределах значения всех параметров ЭМ, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

С точки зрения СА, проблема – есть разница между существующей и желаемой системой. Исходя из этого, основной реальной проблемой, имеющей место в горнодобывающем комплексе, является координация концептуальных принципов оценки качественных показателей ЭМ, отражающих эксплуатационную надежность в отношении взаимодействия системы технической диагностики и эксплуатационной надежности. Координирование данных принципов означает такое воздействие на подсистемы, которое заставляет действовать согласованно. Координация, как функция управления, представляет собой процесс, направленный на обеспечение пропорциональности и гармоничного развития совокупности различных сторон объекта при оптимальных затратах. В общем случае координация осуществляется в связи с определенной целью.

В аспекте данной проблемы целью СА является повышение эффективности эксплуатации и обслуживания ЭМ. Данная формулировка является обобщенным содержанием представленной цели, но степень ее достижения сложно измерить. Если же несколько по-иному выразить конечный результат, введя ряд подцелей, измеряемых количественно, то данная цель является достижимой. В частности, в отношении алмазодобывающих предприятий уровнями достижения цели является степень использования и применения систем технического диагностирования, эксплуатации и расчета эксплуатационной надежности ЭМ. Введенные подцели могут быть качественно и количественно охарактеризованы критериями, которые позволяют измерить степень достижения цели по повышению эффективности эксплуатации и обслуживания ЭМ.

Следующим этапом является определение и детализация составных элементов целей и путей их достижения, выявление существующих между ними взаимосвязей и определенной логики решения возникающей проблемы. Возможным ее решением является структуризация цели, основанной на деагрегировании (поэтапном расчленении) исследуемой проблемы на составные элементы с последующей возможной количественной оценкой их относительной важности. Для выявления полного набора элементов каждого уровня вначале построим дерево с прямыми связями, а затем перейдем к обобщенной структуре с перекрестными связями.

На рисунке представлено в общем виде дерево целей, позволяющее обеспечить достижение цели. На *первом* уровне дерева целей произведено раскрытие содержания главной цели, для чего она структурирована на отдельные компоненты по принципу охвата направлений, которые определяют эффективность эксплуатации и обслуживания ЭМ.

На *втором* уровне происходит дальнейшая конкретизация понятия главной цели на основе принципа охвата всех направлений действия подцелей, выявленных на первом уровне.

Далее, на *третьем* уровне используется предметный принцип структуризации. Такая степень детализации дает возможность на последнем уровне дерева целей представить конкретные значения отдельных нормативных показателей, характеризующих требуемый уровень достижения поставленной цели:

$A^3_1$  – соблюдение эксплуатационных режимов;  $A^3_2$  – энергосберегающие мероприятия;  $A^3_3$  – модернизация оборудования;  $A^3_4$  – ТО при использовании;  $A^3_5$  – ТО на хранение;  $A^3_6$  – периодическое ТО;  $A^3_7$  – сезонное ТО;  $A^3_8$  – регламентированное ТО;  $A^3_9$  – ТО с периодическим контролем;  $A^3_{10}$  – плановое ТО;  $A^3_{11}$  – неплановое ТО;  $A^3_{12}$  – капитальный ремонт;  $A^3_{13}$  – средний ремонт;  $A^3_{14}$  – текущий ремонт;  $A^3_{15}$  – регламентированный ремонт;  $A^3_{16}$  – неплановый ремонт;  $A^3_{17}$  – ремонт по техническому состоянию;  $A^3_{18}$  – ТО и ремонт эксплуатационным персоналом;  $A^3_{19}$  – ТО и ремонт специализированным персоналом;  $A^3_{20}$  – фирменный метод ТО и ремонт;  $A^3_{21}$  – средства и сооружения, предназначенные для выполнения ТО и ремонт;  $A^3_{22}$  – комплект запасных инструментов и принадлежностей;  $A^3_{23}$  – квалифицированный персонал;  $A^3_{24}$  – нормативно-техническая документация;  $A^3_{25}$  – информационные данные по ремонту и эксплуатации ЭМ;

$B^3_1$  – организация локальной и централизованной информационной базы данных;  $B^3_2$  – квалификационный персонал;  $B^3_3$  – методы диагностирования;  $B^3_4$  – алгоритм технического диагностирования (контроля технического состояния);  $B^3_5$  – средства сбора и обработки информации;  $B^3_6$  – тестовое диагностирование;  $B^3_7$  – рабочее диагностирование;  $B^3_8$  – экспресс-диагностирование;  $B^3_9$  – определение с заданной вероятностью интервала времени (ресурса), в течение которого сохранится работоспособное состояние;  $B^3_{10}$  – определение вероятности сохранения работоспособного (исправного) состояния объекта на заданный интервал времени;

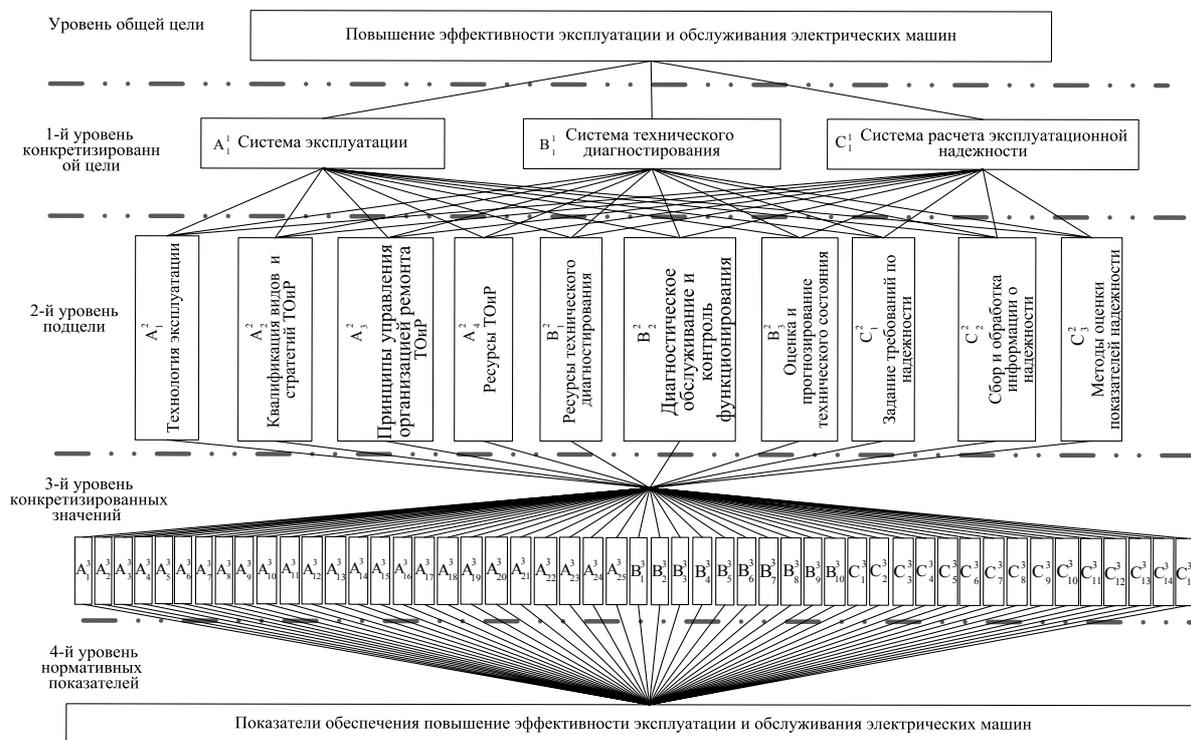


Рисунок. Дерево целей по обеспечению эффективности эксплуатации и обслуживания электрических машин

$C_1^3$  – формирование номенклатуры и количественных значений показателей надежности для модели эксплуатации;  $C_2^3$  – определение модели эксплуатации (хранение, транспортирование, ожидание применения по назначению, применение по назначению, ТО, плановый ремонт) с указанием их продолжительности;  $C_3^3$  – определение критерия повреждений для модели эксплуатации (критериями повреждений являются проявления, свидетельствующие о наступлении или предпосылках наступления неработоспособного состояния: шум; стук в механических частях ЭМ; вибрация; перегрев обмотки статора или ротора, подшипникового узла; неравномерный воздушный зазор; старение смазки изоляции; разбалансировка ротора; увлажнение изоляции обмотки; непостоянная частота вращения);  $C_4^3$  – определение критерия предельных состояний ЭМ (критериями предельных состояний является отказ одной или нескольких составных частей, восстановление или замена которых на месте эксплуатации не предусмотрена эксплуатационной документацией: витковое, межфазное корпусное замыкание; обрыв цепи в фазе; обрыв стержней обмотки ротора; выход из строя подшипникового узла; заклинивание ротора о статор; повреждение вентилятора; поломка вала; нарушение взрывозащитных зазоров; повреждение деталей, лап);  $C_5^3$  – методы контроля соответствия ЭМ заданным требованиям по надежности;  $C_6^3$  – требования к способам обеспечения эксплуатационной надежности;  $C_7^3$  – информация по данным учета, проводимого эксплуатационными и ремонтными предприятиями;  $C_8^3$  – информация по данным результатов наблюдений за ЭМ в эксплуатации;  $C_9^3$  – классификация первичной информации по принятым признакам (условиям эксплуатации, наработка, виду отказавших составных частей и т. п.);  $C_{10}^3$  – контроль полноты, достоверности и однородности информации;  $C_{11}^3$  – перевод исходной информации на ЭВМ;  $C_{12}^3$  – классификация причин отказов и предельных состояний и их анализ;  $C_{13}^3$  – разработка мероприятий, направленных на выявление недостатков и повышение надежности ЭМ в эксплуатации;  $C_{14}^3$  – параметрический метод оценки показателей надежности;  $C_{15}^3$  – непараметрический метод оценки показателей надежности.

Обеспечения эксплуатационной надежности должны задаваться с учетом требований, изложенных в [6].

Для расчета эксплуатационной надежности ЭМ применяются следующие методики:

- типовые, основанные на классических методах оценки, характеризующиеся однородностью и полнотой информации;
- оригинальные, эксплуатационная информация которых определена неоднородностью и неопределенностью, что отражается на объеме статистических данных об отказах и наработках. Данные методики представляют в виде цензурированных выборок [7–10].

Построение дерева целей заканчивается дальнейшей конкретизацией на его четвертом уровне подцелей третьего уровня, где указываются показатели, позволяющие оценить мероприятия и ресурсы в реализации поставленной цели. Общее количество задаваемых показателей для ЭМ возможно представить минимальным числом, но они должны характеризовать эффективность функционирования ЭМ. В то же время все показатели должны иметь однозначное толкование, и для каждой модели эксплуатации должны существовать методы контроля (оценки).

В отношении сбора информации о надежности следует руководствоваться периодичностью технического диагностирования, определяемой техническим состоянием ЭМ и регистрируемых данных, что должно обеспечивать исключение потерь информации с заданной вероятностью. В процессе анализа причин отказов и предельных состояний производят систематизацию первичной информации по принятым признакам (условиям эксплуатации, наработке, виду отказавших составных частей и т. п.), выявление составных частей, лимитирующих надежность ЭМ, установление причин отказов, выявление и классифицирование причин и продолжительности простоев ЭМ, выявление случаев нарушения требований ведения эксплуатационной документации [11].

Представленная детализация элементов системы необходима для того, чтобы учесть события, которые подвержены влиянию большого количества внешних и внутренних факторов. Необходимо подчеркнуть, что каждый элемент дерева целей взаимосвязан с каждым вышестоящим и нижележащим уровнем. Данная взаимозависимость была выполнена на основании следующей точки зрения: между уровнями и элементами древовидной иерархической структуры существуют более сложные взаимосвязи, чем может быть отражено в графическом изображении дерева целей. Если даже между элементами одного уровня иерархии нет явных связей, то они все равно взаимосвязаны через вышестоящий уровень. Кроме этого, последующая оценка иерархической структуры методом парных сравнений элементов позволит выявить коэффициент относительной важности (КОВ) элементов дерева целей. Таким образом, представленное дерево целей в виде упорядоченной иерархии помогает лучше понять возможность достижения поставленной цели и ее целостность.

Оценка иерархической структуры дерева целей связана со многими условиями, которые являются многокритериальными. Решением данного вопроса является использование метода анализа иерархии, который объединяет аналитический подход, опирающийся на алгебраическую теорию матриц с экспертными процедурами. Суть данного метода можно описать следующим образом. Допустим, заданы элементы третьего уровня иерархии и один элемент второго уровня. Количественные сужде-

ния (геометрически среднее или медианное значение), отражающие достигнутое при сравнении согласие во мнениях, заносятся в матрицу парных сравнений размером  $n \times n$  относительно этой цели.

$$A = (a_{ij}), \quad i, j = 1, 2, \dots, n.$$

Элементы суждений  $a_{ij}$  определены по следующим правилам. Если  $a_{ij} = \alpha$ , то  $a_{ji} = 1/\alpha$ ,  $\alpha \neq 0$ . Если суждения таковы, что  $X_i$  имеет одинаковую с  $X_j$  относительную важность, то  $a_{ij} = 1$ ,  $a_{ji} = 1$ .

Следующей процедурой является определение собственного вектора с наибольшим значением  $\lambda_{\max}$ , представляющее максимальное или главное собственное значение. Собственный вектор обеспечивает упорядочение КОВ, а собственное значение является мерой согласованности суждений или же пропорциональности предпочтений. Чем ближе  $\lambda_{\max}$  к  $n$  (числу объектов или видов действия в матрице), тем более согласован результат. Отклонение от согласованности может быть выражено величиной  $(\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$ , являющейся индексом согласованности (ИС). В общем случае, если это число  $\leq 0,1$ , результат является удовлетворительным [12].

В ходе проведения экспертной оценки центральным вопросом анализа иерархической структуры дерева целей являлся следующий: насколько сильно влияют отдельные факторы самого низкого уровня иерархии на вершину – общую цель: повышение эффективности эксплуатации и обслуживания ЭМ. В ходе конкретизации каждого уровня дерева целей неравномерность влияния по всем факторам позволила выявить интенсивность влияния приоритетов или же КОВ.

Уровень общей цели иерархической структуры имеет цель, связанную с повышением эффективности эксплуатации и обслуживания ЭМ. Значение его приоритета полагается равным единице. Первый уровень иерархии представлен конкретизированными целями по системам:  $A^1_1$  – эксплуатации;  $B^1_1$  – технического диагностирования;  $C^1_1$  – расчета эксплуатационной надежности. Приоритеты этих целей получаются из матрицы сравнений относительно цели общего уровня. В табл. 1 представлена матрица парных сравнений относительно общей цели.

**Таблица 1.** Парная оценка конкретизированных целей 1-го уровня

Компоненты	$A^1_1$	$B^1_1$	$C^1_1$	КОВ, отн.ед.	$\lambda_{\max}$	ИС
$A^1_1$	1	1/5	1/3	0,106	3,033	0,01
$B^1_1$	5	1	3	0,633		
$C^1_1$	3	1/3	1	0,260		

Вектор приоритетов, полученный из первой матрицы парных сравнений, представим в виде вектора-столбца:

$$\omega_1 = \begin{bmatrix} 0,106 \\ 0,633 \\ 0,260 \end{bmatrix}.$$

Так как приоритет общего уровня иерархии дерева целей равен 1, то взвешенные величины по следующему уровню равны полученному выше вектору  $\omega_1$ , умноженному на 1, что дает тот же самый вектор.

Следующим шагом является вычисление относительного ранга каждого направления второго уровня подцелей. Задача заключается в определении влияния этих подцелей и их взаимодействия относительно каждой системы первого уровня. Ниже приведена одна из матриц компонентов 2-го уровня подцелей (обозначение компонентов представлено в соответствии с рисунком).

**Таблица 2.** Сравнение компонентов 2-го уровня подцелей относительно уровня конкретизированных целей

Система эксплуатации													
Компоненты	$A^2_1$	$A^2_2$	$A^2_3$	$A^2_4$	$B^2_1$	$B^2_2$	$B^2_3$	$C^2_1$	$C^2_2$	$C^2_3$	КОВ, отн.ед.	$\lambda_{\max}$	ИС
$A^2_1$	1	1	5	1	5	1/3	1/5	5	7	7	0,143	10,831	0,09
$A^2_2$	1	1	5	7	3	1/3	1	4	8	3	0,174		
$A^2_3$	1/5	1/5	1	1/7	4	1/4	1/3	1	7	1/3	0,051		
$A^2_4$	1	1/7	7	1	5	3	3	5	4	1	0,168		
$B^2_1$	1/5	1/3	1/4	1/5	1	1/3	1/4	4	1	1/3	0,036		
$B^2_2$	3	3	4	1/3	3	1	1	3	5	3	0,156		
$B^2_3$	5	1	3	1/3	4	1	1	5	7	1	0,145		
$C^2_1$	1/5	1/4	1	1/5	1/4	1/3	1/5	1	1/3	1/3	0,024		
$C^2_2$	1/7	1/8	1/7	1/4	1	1/5	1/7	3	1	1/5	0,026		
$C^2_3$	1/7	1/3	3	1	3	1/3	1	3	5	1	0,078		

Как и ранее, векторы приоритетов получают для каждой матрицы. Они, соответственно, являются столбцами следующей матрицы. Эта матрица умножается справа на вектор  $\omega_1$ , чтобы взвесить вектор приоритетов, измеряющих каждое воздействие компонент соответствующей конкретизированной цели, что позволяет получить общий вектор  $\omega_2$  приоритетов 2-го уровня цели иерархической структуры. Коэффициенты относительной важности, характеризующие повышение эффективности эксплуатации и обслуживания ЭМ через промежуточные конкретизированные цели второго уровня, представлены в табл. 3.

**Таблица 3.** Коэффициенты относительной важности компонентов 2-го уровня

Компоненты 2-го уровня дерева целей	КОВ, отн.ед.	%
$A^2_1$ – технология эксплуатации	0,043	4
$A^2_2$ – стратегии ТО и ремонта	0,055	4
$A^2_3$ – принципы управления организацией ремонта	0,046	2
$A^2_4$ – ресурсы ТО и ремонта	0,088	4
$B^2_1$ – ресурсы технического диагностирования	0,198	19
$B^2_2$ – диагностическое обслуживание и контроль функционирования	0,077	14
$B^2_3$ – оценка и прогнозирование технического состояния	0,116	12
$C^2_1$ – задание требований по надежности	0,118	14
$C^2_2$ – сбор и обработка информации	0,145	9
$C^2_3$ – методы оценки показателей надежности	0,114	18
Итого	1,000	100

Далее определяются приоритеты конкретизированных значений относительно каждой подцели второго уровня и затем взвешиваются вектором приоритетов второго уровня, что позволяет получить искомый вектор приоритетов дерева цели.

Из всего выше сказанного следует, что использование принципов СА позволило представить обеспечение эффективности функционирования ЭМ в горнодобывающем комплексе как методологию. И поскольку эта система является универсальной, то возможно ее применение в других отраслях промышленности. Сформированное дерево целей позволяет изучить структуру обеспечения эффективности эксплуатации и обслуживания ЭМ. В случае нарушения полноты системы будут нарушены принципы системно-концептуального подхода. Построенное дерево целей определяет систему требуемых (нормативных) значений показателей, необходимых для достижения поставленной

цели. Исследование методом экспертных оценок показало, что комплекс мероприятий по обеспечению эффективности функционирования ЭМ представляется как интегративный объект, связанный со своими компонентами отношениями приоритетов относительной важности и взаимовлияния. Эти отношения налагают на выбор компонентов специфические обязательства, т. к. выбор компонентов должен производиться для повышения эффективности функционирования ЭМ. Такой подход отражает в полной мере концепцию СА. Практическая ценность СА заключается в том, что он вооружает лиц, принимающих решения, формализованным инструментарием соизмерения различных целей иерархической древовидной структуры. В условиях субъективности сопоставления вариантов управленческих решений СА определяет более строгие логические рамки обеспечения эффективности функционирования ЭМ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов А.В. Системный анализ. – М.: Высшая школа, 2006. – 454 с.
2. Варжапетян А.Г., Глушенко В.В., Глушенко П.В. Системность процессов создания и диагностики технических структур. – СПб.: Политехника, 2004. – 186 с.
3. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Основы системного анализа. – Томск: Изд-во НТЛ, 2001. – 396 с.
4. Голубков Е.П. Использование системного анализа в принятии плановых решений. – М.: Экономика, 1982. – 160 с.
5. Оптнер С.Л. Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем. – М.: Советское радио, 1969. – 216 с.
6. ГОСТ 27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. – Введ. 1992-01-01. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам: Изд-во стандартов, 2002. – 23 с.
7. Муравлев О.П., Шевчук В.П., Гусев В.В. Информационное обеспечение для оценки надежности электрических машин // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: Матер. Всеросс. научно-техн. конф. – 12–14 мая 2008. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – С. 166–168.
8. Скрипник В.М., Назин А.Е., Приходько Ю.Г., Благовещенский Ю.Н. Анализ надежности технических систем по цензурированным выборкам. – М.: Радио и связь, 1988. – 184 с.
9. Агапов А.С. Опыт применения некоторых методов статистической оценки надежности промышленных изделий. – Л.: ЛДНТП, 1977. – 28 с.
10. Кузьмин Р.В., Гром В.П. Расчет надежности судового оборудования по малым выборкам. – Л.: Судостроение, 1976. – 96 с.
11. РД 50-204-87. Надежность в технике. Сбор и обработка информации о надежности изделий в эксплуатации. – Введ. 1988-07-01. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам: Изд-во стандартов, 1987. – 12 с.
12. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархии. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.

*Поступила 22.04.2009 г.*