

Определение риска возникновения ущерба при отказе электрооборудования подстанций

А.В. Рассказчиков¹, А.А. Шульпин¹, П.А. Шомов², С.М. Кулагин², В.В. Гоголюк³, Б.Л. Житомирский⁴
¹ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация

²ООО НТЦ «Промышленная Энергетика», г. Иваново, Российская Федерация

³Управление энергетики «Департамент по транспортировке, подземному хранению и транспортировке газа»
ОАО «Газпром», г. Москва, Российская Федерация

⁴ИТЦ «Орггазэнергетика» ОАО «Оргэнергогаз», г. Москва, Российская Федерация
E-mail: kafedra@esde.ispu.ru, aash111@yandex.ru, promenergo@dsn.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Анализ организации текущих ремонтов электрооборудования с учетом технического состояния показывает необходимость сбора информации о режимах его работы и состоянии в период эксплуатации.

Материалы и методы: Сбор информации производится для основного электрооборудования подстанций, работающего в стационарных и переходных режимах, включая силовые трансформаторы, выключатели и электродвигатели. Полученная информация используется для расчета величин наработки электрооборудования между ремонтами и определения величин рисков возникновения ущерба при отказе электрооборудования, которые зависят от степени возможного травмирования людей, экологического ущерба и материального ущерба.

Результаты: Проведен анализ организации текущих ремонтов электрооборудования подстанций с учетом технического состояния. Разработаны рекомендации по оценке риска возникновения ущерба при отказе электрооборудования подстанций.

Выводы: Разработанные рекомендации позволяют уменьшить величину риска возникновения ущерба при отказе электрооборудования подстанций и определить величину наработки и приоритет вывода электрооборудования в ремонт.

Ключевые слова: текущий ремонт, электрооборудование, риск отказов.

Determination of Damage Risk in Case of Electric Equipment Fault at Substations

A.V. Rasskazchikov¹, A.A. Shulpin¹, P.A. Shomov², S.M. Kulagin², V.V. Gogoluk³, B.L. Zhitomirskiy⁴
¹Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

²Limited Liability Company Scientific and Technical Center "Industrial Power Engineering", Ivanovo, Russia

³Power Engineering Department "Department of Transportation, Underground Storage and Gas Application"
Joint Stock Company "GasProm", Moscow, Russia

⁴Engineering Center "Orggasenergetika" of Joint Stock Company "Orgenergogaz", Moscow, Russia
E-mail: kafedra@esde.ispu.ru, aash111@yandex.ru, promenergo@dsn.ru

Abstract

Background: The analysis of current repairs of electrical equipment with taking into account its technical state shows the need for collecting information about operation modes and state in operation period.

Materials and methods: The collection of information is produced for the main electric equipment of substations, operation on permanent and transitional modes and including power transformers, switches and electric motors. The received information is used to calculate the value of equipment utilization between repairs and to determine the risk values of the fault of the equipment, which depend on the possible people injuring, environmental damage and the material damage.

Results: The analysis of the current repairs of substations electric equipment according to the technical state is carried out. The recommendations for estimation of damage risks in the case of electrical equipment fault at substations are developed.

Conclusions: The recommendations developed allow reducing the damage risk amount in the case of electrical equipment fault at substations and define the operating amount and electrical equipment output precedence for repairing.

Key words: current repair, electrical equipment, risk of fault.

В настоящее время в энергохозяйстве ОАО «Газпром», как и в других отраслях экономики России, развивается процесс внедрения системы технического обслуживания и ремонта по техническому состоянию (по состоянию)¹.

«Газпром» / утв. распоряжением ОАО «Газпром» от 29.03.2010 №74; СТО Газпром 2-1.9-089-2006. Прогнозирование технического состояния для возможного срока службы теплоэнергетического оборудования / утв. распоряжением ОАО «Газпром» от 21.11.2006 № 345.

¹ СТО Газпром 079-2010. Положение о системе технического диагностирования оборудования и сооружений ОАО

В соответствии со стандартом², решение задач по поддержанию основных производственных фондов энергохозяйства в исправном состоянии с оптимальными затратами на техническое обслуживание и ремонт может быть достигнуто за счет рационального сочетания планово предупредительной системы технического обслуживания и ремонта с учетом технического состояния.

Высокая эффективность использования системы технического обслуживания и ремонта с учетом технического состояния подтверждается успешным опытом ее использования предприятиями различных областей деятельности, в том числе в отношении энергохозяйства, в нашей стране и за рубежом.

В основе системы технического обслуживания и ремонта электрооборудования с учетом технического состояния лежит следующий принцип: условия эксплуатации и сроки службы (ресурс) до технического обслуживания, ремонта и списания (замены) для отдельных составных частей сложного оборудования имеют значительные различия.

Ремонт с учетом технического состояния, в соответствии с указанным стандартом, предполагает, что объем и сроки проведения капитального ремонта определяются по результатам диагностирования и оценки надежности оборудования, зданий и сооружений. При этом техническое диагностирование (контроль технического состояния и прогнозирование остаточного ресурса) выполняется с периодичностью и в объеме, соответствующими требованиям нормативно-технической документации, и с учетом результатов предыдущего диагностирования.

Планирование технического обслуживания и ремонта оборудования и сооружений энергохозяйства, в том числе ремонта с учетом технического состояния, невозможно без использования ряда показателей надежности.

Расчет показателей надежности систем энергоснабжения и их элементов выполняется с различными целями в ходе проектирования, ввода в эксплуатацию и в период эксплуатации. На этапе проектирования расчет надежности систем и их элементов проводится для выбора технических вариантов и решения организационно-технических вопросов, в том числе для обоснования выбора:

- оптимального варианта структуры;
- способа резервирования;

- глубины и методов контроля технического состояния (технического диагностирования);
- количества запасных элементов;
- периодичности и трудоемкости технического обслуживания и ремонта и т.д.

На этапе эксплуатации, в соответствии с рекомендациями³, оценка показателей надежности изделий, систем и их элементов проводится для получения необходимых данных, с целью:

- совершенствования конструкции изделий, технологии их изготовления, правил и методов эксплуатации и ремонта;
- аттестации продукции;
- контроля показателей надежности.

При планировании ремонта изделий «по состоянию» целесообразно уточнение показателей надежности (безотказность, долговечность и ремонтпригодность), установленных предприятиями-изготовителями по результатам технического диагностирования (прогнозирование остаточного ресурса).

Вместе с тем статистические данные, полученные в ходе эксплуатации сложных систем различного назначения, показывают, что физический износ и интенсивность отказов их элементов существенно изменяются в различные периоды эксплуатации. Классическая зависимость интенсивности отказов λ элементов сложных систем [1] от их срока службы представлена на рис. 1.

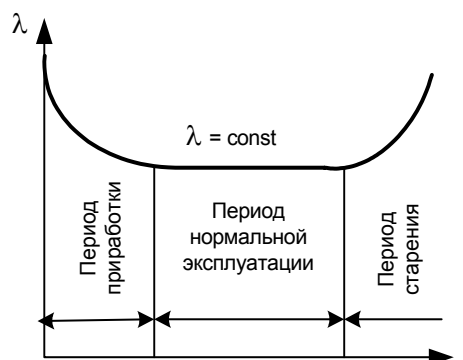


Рис. 1. Общий вид зависимости интенсивности отказов элементов

При определении сроков ремонтов величина интенсивности отказов электрооборудования λ принимается постоянной.

Определение периодичности и приоритета вывода оборудования в текущий ремонт производится в зависимости от величины риска при отказе оборудования.

Оценка риска отказов электрооборудования преимущественно отождествляется с

² СТО Газпром 2-1.9-089-2006. Прогнозирование технического состояния для возможного срока службы теплоэнергетического оборудования / утв. распоряжением ОАО «Газпром» от 21.11.2006 № 345.

³ СТО Газпром 2-2.3-132-2007. Положение по сервисному обслуживанию оборудования и сооружений энергохозяйства ОАО «Газпром» / утв. Распоряжением ОАО «Газпром» от 19.06.2007 № 160.

оценкой травмирования людей, экологическими последствиями и материальным ущербом.

Риск отказов электрооборудования является вероятностной величиной. Следовательно, лицо, принимающее решение, действует в условиях неопределенности. Неизбежны ошибки в получаемой информации, возможен недостаток информации и другие неопределенности.

Риск отказов вычисляется по выражению

$$P_{ЭО} = Q(t)B_{ОТ}, \quad (1)$$

где $P_{ЭО}$ – риск отказа электрооборудования; $Q(t)$ – вероятность отказа электрооборудования; $B_{ОТ}$ – важность отказа электрооборудования.

При организации текущих ремонтов электрооборудования по графикам планово-предупредительных ремонтов (ППР) не требуется определять наработку электрооборудования за период эксплуатации. Принимается, что все оборудование постоянно находится в эксплуатации и работает с номинальной величиной загрузки. Величина вероятности отказов электрооборудования рассчитывается по статистическим значениям интенсивности отказов:

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (2)$$

При организации текущих ремонтов с учетом технического состояния ремонт оборудования производится по наработке за период эксплуатации с момента ввода в эксплуатацию и между капитальными ремонтами электрооборудования. В этом случае расчет износа электрооборудования выполняется, как если бы оно работало постоянно с номинальной нагрузкой в течение расчетного времени, которое меньше периода эксплуатации. Исходя из этого допущения определяется эквивалентное время износа оборудования с номинальной нагрузкой. Это время меньше календарного времени нахождения электрооборудования в эксплуатации, и, следовательно, величина вероятности отказов оборудования также уменьшится. Кроме того, значения вероятности отказов у электрооборудования будут разными, в зависимости от величины наработки. Таким образом, вероятность отказа различных видов электрооборудования зависит от величины выработки ресурса за период эксплуатации.

Характеризуется величина выработки ресурса электрооборудования коэффициентом наработки K_n :

$$K_n = \frac{K_{\text{ресурс}} - K_{\text{экс}}}{K_{\text{ресурс}}}, \quad (3)$$

где $K_{\text{ресурс}}$ – нормативный ресурс оборудования; $K_{\text{экс}}$ – величина выработки ресурса оборудованием за срок эксплуатации.

С учетом выработки ресурса величина вероятности отказов определяется по выражению

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda K_n t}. \quad (4)$$

Для расчета риска отказа оборудования при организации ремонтов по ППР вероятность отказа может определяться по величине интенсивности отказов λ . Данный параметр приводится в справочной литературе для всех видов электрооборудования.

Оценка выработки ресурса силовых трансформаторов зависит от его конструктивного исполнения и вида основной изоляции.

Для трансформаторов с бумажно-масляной изоляцией, в соответствии с ГОСТом, принято, что скорость износа удваивается при каждом повышении температуры на 6°C . Ресурс изоляции определяется по выражению

$$P = e^{-\rho\theta}, \quad (5)$$

где ρ – постоянная величина; θ – температура, $^\circ\text{C}$.

При использовании трансформаторов с элегазовой, пластмассовой или литой изоляцией ресурс изоляции выражается формулой

$$P = e^{(\alpha+\beta/T)}, \quad (6)$$

где α и β – постоянные величины; T – абсолютная температура, $^\circ\text{K}$.

Механический ресурс силовых трансформаторов, который определяется по числу внешних близких коротких замыканий со сквозным током, близким к предельным величинам, контролируется отдельно. В технических условиях дается значение допустимого числа таких режимов.

Выработка ресурса изоляции электродвигателей зависит от теплового, механического и электрического износа изоляции.

Тепловой износ электродвигателя определяется в стационарных режимах за время пуска и за время охлаждения изоляции после пуска. Ресурс изоляции при температуре θ вычисляется по выражению

$$T_p = C_1 \exp\left(\frac{C_2}{\theta}\right), \quad (7)$$

где C_1 и C_2 – постоянные коэффициенты, зависящие от класса изоляции; θ – температура изоляции, $^\circ\text{K}$.

Механический износ изоляции электродвигателя, в основном, происходит во время пуска. Этому подвержены лобовые части обмоток статора. Предельное число колебаний лобовых частей обмоток статора определяется по формуле

$$\lg N_{\text{пред}} = m_m - \gamma_m \lg(\ell), \quad (8)$$

где $N_{\text{пред}}$ – предельное допустимое число колебаний стержня с амплитудой ℓ ; m_m и γ_m – постоянные коэффициенты, зависящие от типа изоляции.

Старение изоляции электродвигателя под действием электрического поля выражается линейной зависимостью в логарифмическом масштабе:

$$N_E = \frac{E}{E_0} = \left(1 - \frac{t}{T_r}\right)^{\frac{1}{n_E}}, \quad (9)$$

где n_E – постоянный коэффициент; T_r – гипотетическое время достижения пробивным напряжением значения 0; N_E – оставшееся значение ресурса изоляции при электрическом старении.

Комплексный расчет старения изоляции электродвигателя за время пуска позволяет определить относительное старение изоляции за один пуск по отношению к старению изоляции при номинальной нагрузке. В этом случае необходимо контролировать только число пусков электродвигателя и длительность каждого пуска.

Величина выработки ресурса выключателя зависит от двух параметров: механического ресурса и коммутационного ресурса.

Механический ресурс выключателя определяется износом привода. Величина выработки механического ресурса определяется как отношение количества коммутаций выключателем тока холостого хода или нагрузки к номинальной величине механического ресурса:

$$P_{\text{мех.в}} = \frac{N_{\text{ком.н}}}{N_{\text{ком.м}}}, \quad (10)$$

где $N_{\text{ком}}$ – число коммутаций приводом выключателя; $N_{\text{ком.н}}$ – номинальное число коммутаций выключателя.

Коммутационный ресурс выключателя задается в технической документации в виде зависимости допустимого числа отключений для различных величин токов короткого замыкания. При каждом отключении тока короткого замыкания определяется относительное значение выработанного ресурса выключателя. Величина выработанного ресурса определяется как сумма всех относительных ресурсов выключателя:

$$P_{\text{мех}} = \sum_{i=1}^n \frac{N_{ij}}{N_{i\text{н}}}, \quad (11)$$

где N_{ij} – число отключений токов коротких замыканий величиной i .

Коэффициент важности для i -го электрооборудования $B_{\text{оти}}$ определяется как произведение коэффициентов материального ущерба, экологического ущерба, травмирования людей и категорийности потребителей. Коэффициенты определяются методом экспертных оценок.

Формула расчета коэффициента важности для i -го электрооборудования $B_{\text{оти}}$ имеет вид

$$B_{\text{оти}} = K_{\text{мы}} K_{\text{эу}} K_{\text{тл}} K_{\text{к}}, \quad (12)$$

где $K_{\text{мы}}$ – коэффициент материального ущерба, о.е.; $K_{\text{эу}}$ – коэффициент экологического ущерба, о.е.; $K_{\text{тл}}$ – коэффициент травмирования людей, о.е.; $K_{\text{к}}$ – коэффициент категорийности объекта, о.е.

Коэффициент материального ущерба определяется в зависимости от влияния на технологический процесс и длительность восстановления последствий отказа электрообо-

рудования. Для определения $K_{\text{мы}}$ рассчитывается величина ущерба, который возникает при полном погашении подстанции. Это значение принимается за базовый параметр. Затем определяется ущерб при отказе i -го электрооборудования. Коэффициент $K_{\text{мы}}$ определяется как отношение ущерба при отказе рассматриваемого электрооборудования к максимальному ущербу, возникающему при полном погашении подстанции.

Величина коэффициента экологического ущерба $K_{\text{эу}}$ зависит от последствий для окружающей среды. Экологический ущерб возникает при заражении окружающей среды. Следовательно, экологический ущерб возможен при наличии электрооборудования с масляной системой изоляции и системой дугогашения и элегазового электрооборудования. К такому электрооборудованию относятся силовые и измерительные трансформаторы, выключатели и токопроводы. Отказы такого электрооборудования могут вызвать пожары, взрывы, растекание масла, утечку элегаза. Кроме того, экологический ущерб возникает при отказе систем отопления, вентиляции и очистных сооружений.

Величина коэффициента травмирования людей $K_{\text{тл}}$ зависит от степени опасности для жизни, которая появляется при взрыве, пожаре, рентгеновском излучении, повреждении изоляции. К таким последствиям, в основном, приводят отказы маслонаполненного оборудования, оборудования с элегазовой изоляцией, оборудования с вакуумными камерами дугогашения.

Значения коэффициента категорийности $K_{\text{к}}$ для четырех категорий по надежности и бесперебойности электроснабжения потребителей приведены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициент категорийности объекта системы $K_{\text{к}}$ для потребителей электрической энергии

№	Категория	$K_{\text{к}}$, о.е.
1	0	1,00
2	1	0,95
3	2	0,90
4	3	0,85

Пример расчета показателя важности отказов электрооборудования приведен в табл. 2.

Таблица 2. Важность элементов системы электроснабжения (категория надежности электроснабжения – 0)

Наименование	$K_{\text{мы}}$, о.е.	$K_{\text{эу}}$, о.е.	$K_{\text{тл}}$, о.е.	$K_{\text{к}}$, о.е.	$B_{\text{от}}$, о.е.
Выключатель 10 кВ:					
- элегазовый	0,9	1	1	1	0,900
- вакуумный	0,9	0,8	1	1	0,720
- маломасляный	0,9	0,9	1	1	0,810
Кабельная линия 10 кВ	0,8	0,8	0,8	1	0,512
Трансформатор 10/0,4 кВ:					
- масляный	0,8	0,95	1	1	0,760
- сухой	0,8	1	1	1	0,800
Вводной автомат	0,9	0,9	0,9	1	0,729
Линейный автомат	0,85	0,9	0,9	1	0,689
Кабельная линия 0,4 кВ	0,9	0,9	0,9	1	0,729
Электродвигатель	0,85	0,9	1	1	0,765

Инженерная методика организации ремонта электрооборудования с учетом обеспечения требуемой надежности работы объекта (на примере газоперекачивающей станции) включает контроль выработки ресурса электрооборудования.

Для этого решаются две задачи:

1. Оценивается влияние отказа электрооборудования на работу технологического оборудования, обеспечивающего перекачку газа в трубопроводе.

2. Оценивается величина выработки ресурса электрооборудования в зависимости от стационарных и переходных режимов работы технологического оборудования, обеспечивающего перекачку газа в трубопроводе.

Для оценки влияния отказа электрооборудования на работу технологического оборудования производится анализ технологической схемы, т.е. количество основного и резервного оборудования, его загрузка в нормальных и ремонтных режимах, величина резерва по мощности и число оборудования, способ включения резервного оборудования.

Величина выработки ресурса электрооборудования зависит от длительности работы с различной величиной загрузки, от величины и тяжести переходных режимов, от влияния внешних аварийных режимов.

Первая задача решается с использованием дерева отказов. Дерево отказов применяется при небольшом числе оборудования и различных причинных связях между элементами технологической схемы. Оно позволяет наглядно показать связи между оборудованием с учетом наличия резерва и работы автоматики. Такую связь можно проанализировать в рабочем и ремонтном состоянии схемы. Зная количественные показатели надежности отдельного электрооборудования, рассчитывается надежность всей системы.

Для решения второй задачи необходимо контролировать работу технологического оборудования в стационарных и переходных режимах.

При отсутствии необходимых значений о режимах работы технологического оборудования производится определение только времени его работы и числа переходных режимов.

Расчетным путем определяется величина выработанного ресурса. По этому значению находится коэффициент наработки K_n .

Контроль режимов работы и определение величины выработки ресурса предполагается производить для следующего электрооборудования: силовых трансформаторов, электродвигателей, выключателей и кабелей.

Для силовых трансформаторов контролируется величина нагрузки. Если контроль нагрузки не предусмотрен, то определяется средняя загрузка за расчетный период. По величине нагрузки рассчитывается выработанный ресурс.

Кроме того, определяется число повреждений на секциях потребителей за рассматриваемый период. Этот показатель может значительно снизить надежность трансформатора.

Контроль выработанного ресурса электродвигателя осуществляется в зависимости от типа электродвигателя: синхронный электродвигатель, асинхронный электродвигатель с короткозамкнутой обмоткой ротора, двигатель постоянного тока.

Мощные синхронные электродвигатели пускаются по специальной технологической схеме для исключения больших пусковых токов, вызывающих тепловые и механические перегрузки. Следовательно, для контроля выработанного ресурса электродвигателя достаточно учитывать только стационарные режимы.

Для асинхронных электродвигателей с короткозамкнутой обмоткой ротора, как правило, производится прямое включение в сеть, что вызывает большие пусковые токи с перегревом обмоток статора и ротора. Необходим контроль стационарной нагрузки, числа и длительности каждого пуска.

Для двигателей постоянного тока производится непрерывный контроль тока в обмотке якоря в стационарных и переходных режимах работы.

Показатели надежности выключателя складываются из надежности камеры дугогашения и привода. Надежность работы камеры дугогашения зависит от величины выработанного ресурса, который в основном определяется величиной отключаемого тока короткого замыкания. Необходим контроль числа и величин отключаемых токов короткого замыкания для расчета выработанного ресурса. Надежность привода выключателя определяется по статистическим данным.

По величинам выработанного ресурса рассчитывается величина надежности (вероятность отказов) электротехнического оборудования. Для однотипного оборудования определяется приоритет вывода в ремонт или в резерв. Рассчитываются приоритеты вывода в ремонт всего электрооборудования с учетом ответственности каждой группы оборудования.

Сбор и обработка информации производится в ручном или автоматическом режиме с использованием АСУТП.

Основные этапы выполнения работы по организации ремонта электрооборудования с учетом обеспечения требуемой надежности работы объекта (на примере газоперекачивающей станции):

1. Анализ схемы электроснабжения газоперекачивающей станции (выявление основных мощностей, резервного оборудования, работы автоматики и т.д.).

2. Разработка дерева отказов системы электроснабжения с учетом технологического оборудования.

3. Расчет числа случаев отказов электроснабжения, приводящих к нарушению технологического режима на основе топологии схемы электроснабжения и систем автоматики с учетом технологического оборудования. Выявление единиц оборудования с высокой критичностью. Расчет числа случаев отказов электроснабжения по обобщенным статистическим данным.

4. Разработка форм таблиц, в которые заносятся режимные значения работы электрооборудования в течение года: длительность работы, величины нагрузки, число и длительность переходных и аварийных режимов.

5. Расчет величины выработанного ресурса электрооборудования на основе времени работы, данных по нормальным и аварийным режимам.

6. Определение вероятности выхода из строя энергетического оборудования в зависимости от его состояния с учетом величины выработанного ресурса в нормальных и аварийных режимах.

7. Расчет величины риска отказа электрооборудования.

8. Разработка графика ремонта электрооборудования с учетом обеспечения требуемой надежности.

Заключение

Организация ремонта электрооборудования с учетом наработки позволит повысить надежность системы электроснабжения потребителей за счет своевременного вывода в ремонт электрооборудования с наибольшей вероятностью отказа.

Список литературы

1. Папков Б.В., Куликов А.Л. Основы теории систем для электроэнергетиков / под ред. Н.И. Воропая. – Н. Новгород: Изд-во Волго-Вятской академии госслужбы, 2011. – 456 с.

References

1. Papkov, B.V., Kulikov, A.L. *Osnovy teorii sistem dlya elektroenergetikov* [Foundations of Systems Theory for Engineers]. Nizhniy Novgorod: Izdatel'stvo Volgo-Vyatskoy akademii gosudarstvennoy sluzhby, 2011. 456 p.

Рассказчиков Александр Викторович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования,
e-mail: kafedra@esde.ispu.ru

Шульпин Андрей Александрович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электрических систем,
e-mail: aash111@yandex.ru

Шомов Петр Аркадьевич,

ООО НТЦ «Промышленная Энергетика»,
кандидат технических наук, директор,
e-mail: promenergo@dsn.ru

Кулагин Станислав Михайлович,

ООО НТЦ «Промышленная Энергетика»,
кандидат технических наук, заместитель директора,
e-mail: promenergo@dsn.ru

Гоголюк Владимир Васильевич,

Управление энергетики Департамента по транспортировке, подземному хранению и транспортировке газа
ОАО «Газпром»,
начальник,
e-mail: kafedra@esde.ispu.ru

Житомирский Борис Леонидович,

ИТЦ «Орггазэнергетика» ОАО «Оргэнергогаз»,
член-корр. МАНПО, директор,
e-mail: kafedra@esde.ispu.ru