

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ И УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА СОСТОЯНИЕ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ*

А.В. Коржов
г. Челябинск, ЮУрГУ

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE OPERATING REGIME AND OPERATION CONDITIONS INFLUENCE ON THE URBAN POWER GRID CABLE INSULATION IN POINT OF PARTIAL DISCHARGES

A.V. Korzhov
Chelyabinsk, South Ural State University

Приведены результаты экспериментальных исследований по изменению интенсивности частичных разрядов в изоляции действующих кабельных линий 6 кВ городских электрических сетей в зависимости от режимов работы и условий эксплуатации.

Ключевые слова: силовой кабель, городские электрические сети, условия эксплуатации, частичные разряды.

The results of experimental researches about variation of partial discharges intensity in cable insulation according to operation conditions are represented in the article. The researches were held for urban power grid cables (the voltage is 6 kV) in operation.

Keywords: power cable, urban grid, operation conditions, partial discharges.

Диагностика силовых кабельных линий (КЛ) на сегодняшний день может осуществляться двумя способами: разрушающим и неразрушающим. По результатам ряда исследований отмечается, что при испытаниях повышенным выпрямленным напряжением дополнительно к выявленным проблемным местам происходит общее и локальное ослабление изоляции кабелей. Опыт эксплуатации КЛ 6 кВ в коммунальных городских сетях г. Нефтекамска и замеры интенсивности ЧР в изоляции КЛ подтверждает данный факт. По опыту эксплуатации известно, что в ряде случаев при проведении профилактических испытаний выявляются не ослабленные места, а только грубые дефекты, при этом пробой в слабых местах происходит через небольшой промежуток времени после испытаний.

Большое количество кабелей (муфт), находящихся на сегодняшний день в работе, выработавших нормативный срок эксплуатации, гарантиро-

ванный заводом изготовителем, вызывает необходимость отказываться в условиях эксплуатации на данных линиях от разрушающей диагностики в виде испытаний повышенным выпрямленным напряжением и объясняет необходимость перехода на неразрушающие виды диагностики, например, по интенсивности частичных разрядов. Однако, необходимо накапливать статистические массивы данных по характеристикам ЧР на кабелях находящихся длительное время в эксплуатации, устанавливая взаимосвязи с условиями эксплуатации кабелей, чтобы корректно оценивать диагностические данные. В идеале указанные зависимости необходимо иметь в паспорте на каждую КЛ.

Влияние режима работы кабеля (отключён; в горячем резерве под напряжением, но без нагрузки; под нагрузкой) и условий эксплуатации (температура, влажность, условия прокладки) на процессы, происходящие в изоляции проводится нами по характеристикам и интенсивности частичных

* Исследования проведены при государственной поддержке Совета по грантам Президента РФ для молодых российских учёных – кандидатов наук (шифр заявки: МК–1402.2009.8).

разрядов (ЧР), с применением диагностирующего устройства R-400 (Вибро-Центр, г. Пермь) рис. 1. Так же используется испытательная высоковольтная лаборатория типа АИП-70, мегаомметр типа Ф 4102-2-1М. В качестве объекта выбраны КЛ городских электрических сетей г. Нефтекамска.



Рис. 1. Схема экспериментальных исследований по определению интенсивности ЧР в изоляции КЛ (замеры в ячейке кабельного ввода в ТП 6/0,4 кВ)

На наш взгляд, одним из значимых факторов, негативно воздействующих на состояние изоля-

ции, является движение влаги вблизи кабеля. Исходя из этого обстоятельства, можно выдвинуть предположение, что параметры изоляции изменяются в течение годового цикла, корреляционно повторяют изменения увлажнения и температурного режима грунтовых массивов, что необходимо учитывать при оценке характеристик частичных разрядов. В табл. 1, 2 и на рис. 2, 3 приведены отдельные результаты исследований.

На рис. 2 сплошной линией представлен тренд зависимости интенсивности ЧР от влажности воздуха. Данный тренд можно описать зависимостью, с достоверностью аппроксимации экспериментальных данных $R^2 = 0,95$:

$$P_{\text{чр}} = 0,032 \cdot e^{0,08W}, \quad (1)$$

где $P_{\text{чр}}$ – интенсивность импульсов ЧР, мВт;
 W – влажность воздуха в %.

Для установления динамики изменения параметров изоляции в течение годового цикла нами проводятся регулярные плановые замеры сопротивлений изоляции и величин токов утечки при испытаниях постоянным напряжением 6, 10, 12, 15 кВ с мая 2006 года по настоящее время на действующих силовых кабелях. Типы обследуемых кабелей: ААБл $3 \times 120 \text{ мм}^2$, 640 м; ААШвУ $3 \times 185 \text{ мм}^2$, 2770 м; ААШв $3 \times 120 \text{ мм}^2$, 330 м; ААШв $3 \times 120 \text{ мм}^2$, 2130 м; ААШв $3 \times 185 \text{ мм}^2$, 775 м.

Текущий анализ результатов замеров позволяет констатировать, что в процессе эксплуатации

Таблица 1
Результаты замеров на кабельной линии марки ААШВу сечением жил $3 \times 120 \text{ мм}^2$, длиной 2130 м, 1984 г.

Дата	Нагрузка КЛ, А	Влажность, %; температура, °С	Максимальная амплитуда импульсов ЧР, мВ	Интенсивность ЧР, мВт	Суммарное кол-во импульсов за 250 периодов	Сопротивление изоляции, МОм; ток утечки, мкА
20.08.2010	58	49,8; 21,7	8	1,2	4742	350; 50
17.03.2010	2	57,5; -3,2	4	3,9	24578	600; 50
19.04.2010	2	84,2; 8,4	8	21	92382	260; 60

Таблица 2
Результаты замеров на кабельной линии марки ААШВу сечением жил $3 \times 185 \text{ мм}^2$, длиной 2770 м, 1993 г.

Дата	Нагрузка КЛ, А	Влажность, %; температура, °С	Максимальная амплитуда импульсов ЧР, мВ	Интенсивность ЧР, мВт	Суммарное кол-во импульсов за 250 периодов	Сопротивление изоляции, МОм; ток утечки, мкА
20.07.2010	50	43,3; 20,75	80	0,5	405	300; 60
14.09.2010	54	50,7; 13,2	205	1,3	1106	290; 60
15.07.2010	45	53,6; 23,8	86	1,5	4500	350; 50
17.03.2010	66	57,5; -3,2	103	0,8	2400	600; 50
16.03.2010	65	60; -2,4	114	16	68408	780; 40
19.04.2010	63	84,2; 8,4	50	14	68273	270; 60

происходят циклические изменения сопротивления изоляции и токов утечки, что коррелирует с данными замеров интенсивности ЧР (рис. 4, 5). Установлено, что ток утечки от каждой фазы кабеля через изоляцию меняется пропорционально из-

менению уровня прикладываемого постоянного выпрямленного напряжения, поэтому нет необходимости для контроля тока утечки прикладывать напряжение, превышающее рабочее.

Токи утечки от каждой фазы не равны меж-

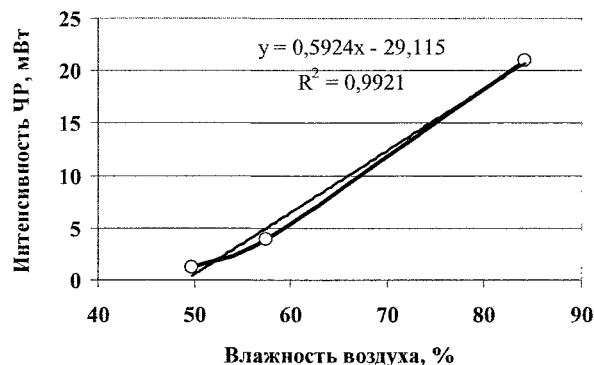


Рис. 2. Интенсивность импульсов ЧР в кабеле марки ААШВу сечением жил 3х120 мм², длиной 2130 м, 1984 г. в зависимости от влажности воздуха

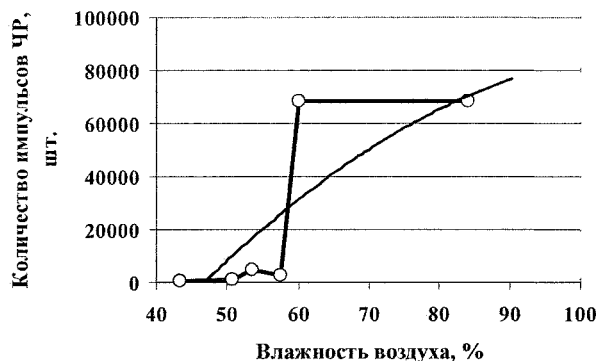


Рис. 3. Зависимость от влажности количества импульсов ЧР на кабельной линии марки ААШВу сечением жил 3х185 мм², длиной 2770 м, 1993 г.

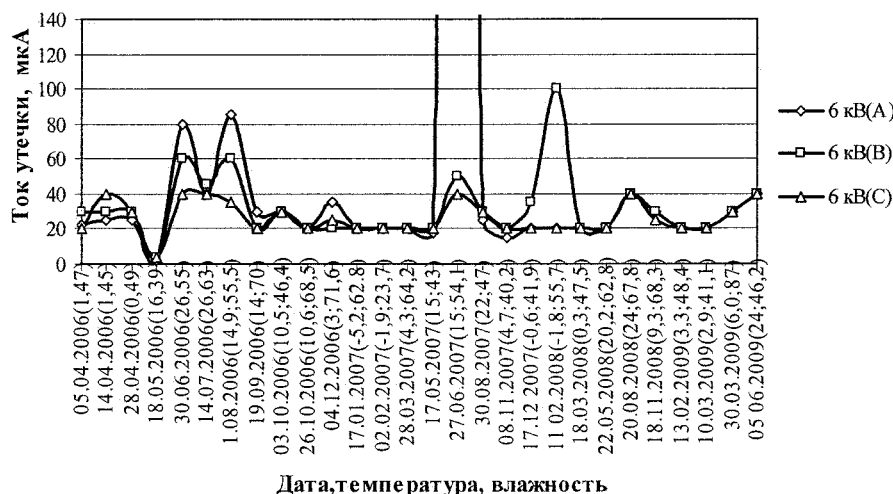


Рис. 4. Результаты замеров на силовом кабеле типа ААШВ, сечение 3х120 мм², длина 330 м, в эксплуатации с1991 г.

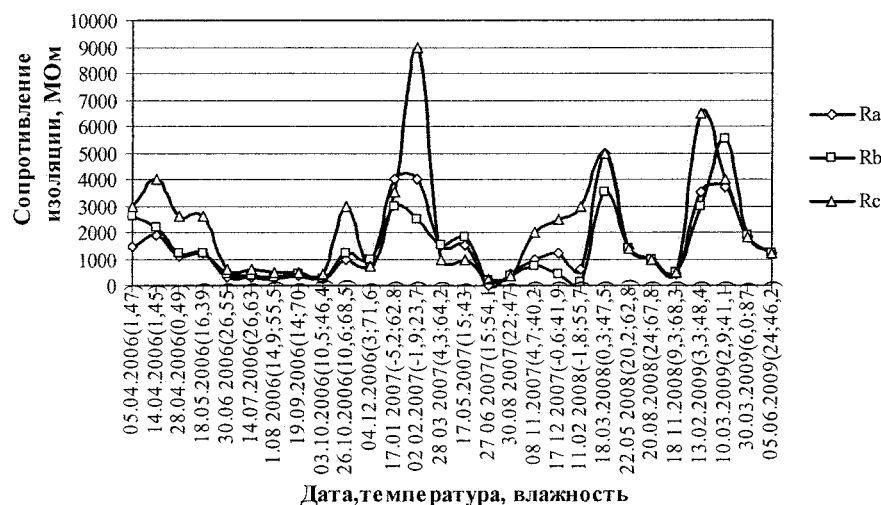


Рис. 5. Результаты замеров на силовом кабеле типа ААШВ, сечение 3х120 мм², длина 330 м, в эксплуатации с 1991 г.

ду собой, что говорит о неравномерном старении жильной и поясной изоляции, что необходимо учитывать при проведении теплового расчёта КЛ. Причём, если существуют периоды ухудшения состояния изоляции, сменяющиеся восстановлением первоначальных характеристик, данный факт свидетельствует о хорошем состоянии изоляции. Постоянное увеличение тока утечки и интенсивности ЧР свидетельствует о предпробойном состоянии. Так замер от 27.06.2007 г. показал рост тока утечки, при испытании выпрямленным напряжением 6 кВ, в фазе А кабеля типа ААШв, сечение $3 \times 120 \text{ мм}^2$ (рис. 4). При дальнейшей эксплуатации кабеля была установлена причина: пробой в соединительной муфте в фазе А кабеля.

В табл. 3 представлены результаты замеров для одного и того же кабеля при различных условиях окружающей среды.

В ходе исследований установлено, что колебания температуры и влажности воздуха (почвы) сказываются на изменениях тока утечки и интенсивности ЧР. Если данные приращения незначительны, то это связано с временными изменениями структуры диэлектрика, например, увлажнением изоляции во влажной почве. При значительном увеличении тока утечки, сохраняющемся при разных климатических условиях, можно говорить о безвозвратном ухудшении состояния изоляции КЛ (табл. 4).

Установлено, что такие дефекты, как прокол изоляции между броней и жилой, не обнаруживаются мегаомметром, хотя на практике из-за боязни испортить кабель повышенным напряжением часто производят контроль изоляции только мегаомметром. Проведённые эксперименты показали, что данный вид повреждения выявляется по возрастанию тока утечки и интенсивности ЧР.

Таблица 3

Испытания кабеля при разных напряжениях

Кабель 6 кВ, марка ААШБ, сечение $3 \times 120 \text{ мм}^2$, длина 2130 м				
Наружная температура воздуха: +2 °С				
Сопротивление изоляции, измеренное мегаомметром				
R_a , МОм	160	R_{ab} , МОм	400	
R_b , МОм	170	R_{bc} , МОм	400	
R_c , МОм	180	R_{ca} , МОм	600	
Выпрямленное напряжение, кВ	6	10	12	15
I_a , мкА	100	200	180	220
I_b , мкА	100	100	140	180
I_c , мкА	40	140	140	120
Наружная температура воздуха: +8 °С, повышенная влажность почвы				
Сопротивление изоляции, измеренное мегаомметром				
R_a , МОм	250	R_{ab} , МОм	600	
R_b , МОм	290	R_{bc} , МОм	650	
R_c , МОм	210	R_{ca} , МОм	600	
Выпрямленное напряжение, кВ	6	10	12	15
I_a , мкА	200	220	260	300
I_b , мкА	200	180	280	320
I_c , мкА	180	200	220	250

Таблица 4

Результаты испытания в реальной кабельной сети

Кабель 6 кВ, марка ААБЛ, сечение $3 \times 120 \text{ мм}^2$, длина 640 м				
Наружная температура воздуха, °С	+2	+1	+2	+8
Сопротивление изоляции, измеренное мегаомметром				
R_a , МОм	40	200	350	180
R_b , МОм	60	280	350	160
R_c , МОм	60	280	400	190
R_{ab} , МОм	65	600	800	230
R_{bc} , МОм	120	700	800	240
R_{ca} , МОм	100	670	1000	300
Ток утечки при испытаниях 6 кВ выпрямленным напряжением				
I_a , мкА	220	40	20	80
I_b , мкА	200	45	28	80
I_c , мкА	180	40	30	160
Причина	Коронирование концевой эпоксидной заделки	Кабель после восстановления концевой разделки	Сухая погода	Повышенная влажность почвы

Обычно, полагая, что силовой кабель под нагрузкой представляет собой практически линейную систему, действия электрического и магнитного полей рассматривают отдельно, используя принцип наложения. Учитывают воздействие электрического поля на свободные заряды в диэлектрике, приводящее к возникновению токов утечки, и поляризационные процессы смещения связанных зарядов в веществе, влияющие на появление токов смещения. Анализируют явления, обусловленные магнитным полем: увеличение электрического сопротивления токопроводящих жил кабеля за счёт поверхностного эффекта; появление электродинамических усилий; магнитные потери в металлических оболочках кабеля.

Однако, на наш взгляд, процессы, происходящие в изоляции силового кабеля, необходимо рассматривать как результат воздействия единого электромагнитного поля, не разделяя его на электрическую и магнитную составляющие [1]. Данные процессы влияют на степень старения изоляции в условиях эксплуатации силовых кабелей [2].

Отдельные результаты исследований по изменению характеристик ЧР в изоляции КЛ в зависимости от режима работы приведены в табл. 5 и на рис. 6, 7.

Проведённые исследования показывают:

1. Сопротивление изоляции в течение эксплуатации силового кабеля изменяется в широких пределах. Для рассмотренных кабелей сопротивления изменяются циклически в течение годового цикла на один порядок.

2. Анализ графических зависимостей, характерных и для других обследованных кабельных линий, свидетельствует о существенном влиянии температуры и влажности на процесс сорбции влаги внешней изоляцией кабеля. Так, повышение интенсивности ЧР наблюдалось в период с апреля по июнь и с сентября по ноябрь, что соответствует периодам повышенной влажности; последнее необходимо учитывать при выборе режима работы кабеля и оценке данных неразрушающей диагностики.

3. Наблюдается снижение сопротивления изоляции одной из фаз по сравнению с другими и

наоборот, что свидетельствует о неравномерном старении жил в различные моменты времени, хотя при проведении теплового расчёта кабельной линии, на наш взгляд, некорректно полагают условия окружающей среды одинаковыми и неизменными для трёх жил.

4. Анализ полученных результатов исследования изменения интенсивности ЧР в изоляции КЛ показывает, что режим работы кабеля, качество напряжения в питающей сети влияют на составляющие спектрального состава тока утечки и их величины, характеристики и интенсивности частичных разрядов, а значит и на физические процессы, происходящие в изоляции силовых кабелей. Данный факт доказывает выдвинутую нами гипотезу о необходимости совместного учёта электрической и магнитной составляющей собственного электромагнитного поля кабеля на физико-химические процессы, происходящие в изоляции кабеля.

5. Предприятия, обслуживающие КЛ 6(10) кВ, в большинстве случаев оснащены испытательными высоковольтными лабораториями, например, типа АИП-70. Данные лаборатории имеют возможность измерять ток утечки на отключенном кабеле при различных уровнях испытываемого постоянного напряжения. По нашему мнению, постоянное измерение тока утечки через изоляцию и сопротивления изоляции является одним из наиболее доступных методов диагностики на практике, хотя персонал, эксплуатирующий КЛ, не пользуется данной возможностью, не ведёт статистики измерений по каждому отдельному кабелю. Необходимо классифицировать измерения данных параметров как возможный неразрушающий способ диагностики и продолжить разработку методов контроля указанных величин. Техническим руководителям предприятий, эксплуатирующих силовые кабели, важно понимать, что при желании отказаться от испытаний повышенным выпрямленным напряжением, ввиду их неэффективности, нельзя отказываться от диагностики. В данном случае должны вводиться неразрушающие способы диагностики (например контроль интенсивности ЧР), аппаратура для которых требует определённых материальных затрат.

Таблица 5

Характеристики ЧР в изоляции КЛ марки ААШв 3×185 мм², 775 м в различных режимах работы

Характеристики ЧР в положительный и отрицательный полупериод	[+]&[-]	[+]	[-]
КЛ под напряжением, без нагрузки			
Амплитуда (Q02), мВ	74	69	53
Интенсивность (PDI), мВт	0,7	0,2	0,5
Кол-во импульсов	2405	395	2010
КЛ под нагрузкой 50 А			
Амплитуда (Q02), мВ	108	87	94
Интенсивность (PDI), мВт	2,5	1,1	1,3
Кол-во импульсов	5144	1663	3481

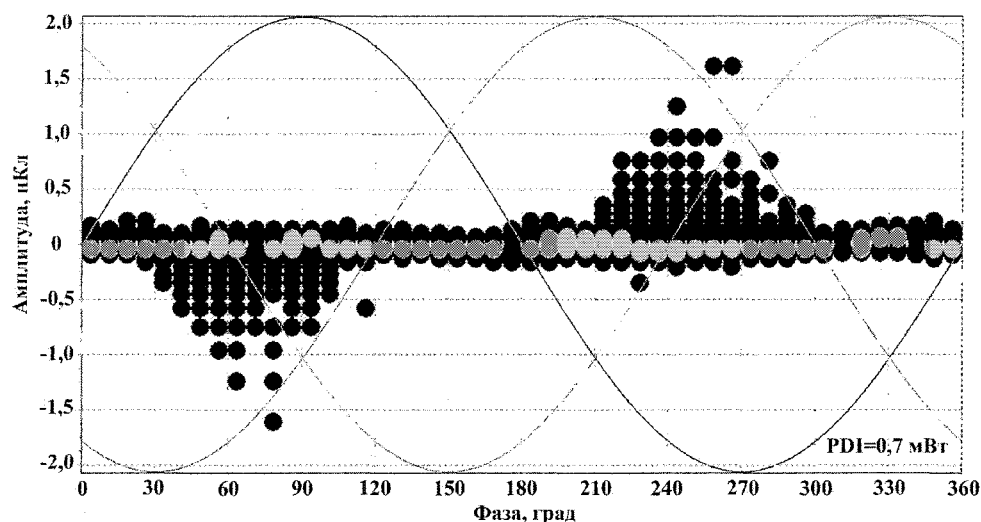


Рис. 6. Диаграмма распределения ЧР по фазе и амплитуде
(замер на КЛ марки ААШв 3×185 мм², 775 м; КЛ под напряжением, без нагрузки)

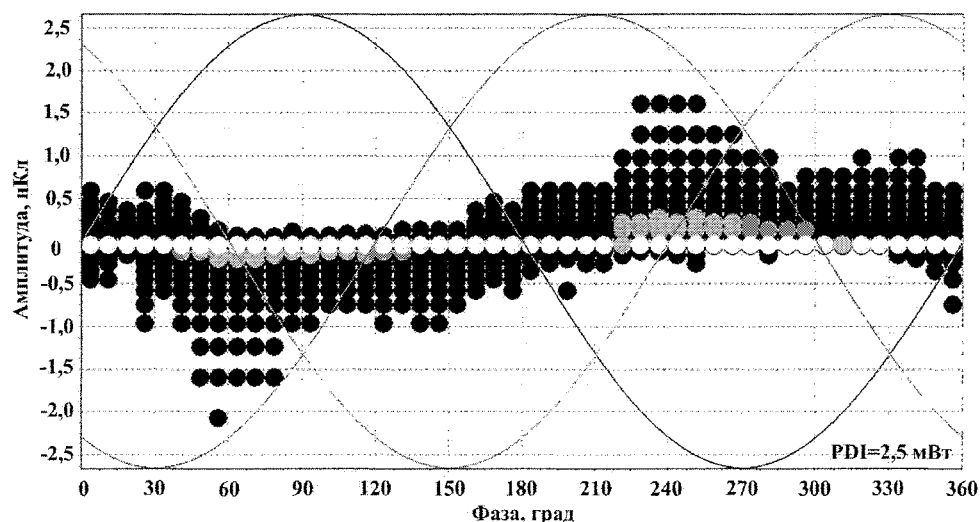


Рис. 7. Диаграмма распределения ЧР по фазе и амплитуде
(замер на КЛ марки ААШв 3×185 мм², 775 м; КЛ под нагрузкой 50 А;
характерно старение изоляции фазы В)

Литература

1. Коржов, А.В. Действие магнитного поля кабеля 6–10 кВ на собственную изоляцию / А.В. Коржов, А.И. Сидоров, Е.В. Томашева // *Электричество*. – М., 2009. – № 1.

2. Математическая модель повреждаемости изоляции силовых кабельных линий городских электрических сетей / А.В. Коржов, А.И. Сидоров, Е.Ю. Юрченко, А.Б. Николаевский. – *Электрические станции*. – 2008. – № 8.

Поступила в редакцию 25.06.2010 г.

Коржов Антон Вениаминович. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов – электромагнитные процессы в кабельных сетях, оценка состояния изоляции силовых кабелей в условиях эксплуатации городских электрических сетей. Контактный телефон: 8 (351) 267-92-46.

Korzhov Anton Veniaminovich. Candidate of technical sciences, reader of the electrical engineering department of South Ural State University, Chelyabinsk. The field of scientific interests is electromagnetic processes in cable set, estimation of the remaining resource of insulation of power cables. Contact telephone: 8 (351) 267-92-46.