

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВОГО КАБЕЛЯ ПО СПЕКТРУ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ В РАДИОЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ*

А.В. Коржов
г. Челябинск, ЮУрГУ

EXPERIMENTAL ESTIMATE OF POSSIBILITY TO CONTROL THE POWER CABLE ISOLATION CONDITION BY MEANS OF SPECTRUM OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE IN RADIO-FREQUENCY BANDWIDTH

A.V. Korzhov
Chelyabinsk, SUSU

Приведены результаты экспериментальных исследований на действующих электроустановках интенсивности и спектрального состава радиопомех в заземляющем проводнике силового кабеля напряжением 6 кВ. Теоретически оценена мощность, выделяемая в изоляции силового кабеля от действия магнитной составляющей электромагнитного поля на токи утечки в изоляции.

Ключевые слова: силовая кабельная линия, ресурс, электрическое поле, магнитное поле, кабельная изоляция.

The article gives the results of experimental research at operating electrical installations of emission intensity and spectral distribution of radio frequency interference in bounding conductor of power cable with voltage of 6 kV. The power produced in isolation of the power cable due to effect of magnetic component of electromagnetic field upon leakage current in isolation is estimated theoretically.

Keywords: power cable line, resource, electric field, magnetic field, cable isolation.

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 изоля-

ции в условиях эксплуатации силовых кабелей [2].

Частичные разряды, происходящие во включениях в изоляции, например в газовых включениях или по водным тринидам, генерируют импульсные электрические сигналы. Данные сигналы распространяются по электрически связанным цепям и излучаются в виде электромагнитных волн в окружающую среду. Вопрос зависимости частотных характеристик сигналов частичных разрядов от дефектов в изоляции является дискуссионным. Как правило, частичные разряды в бумажно-масляной изоляции имеют короткую длительность и как следствие широкий частотный диапазон, перекрывающий практически все частоты до 1 ГГц.

Электропроводность технических диэлектриков обусловлена наличием небольшого числа свободных зарядов, связанных с наличием примесей, либо продуктов окисления, возникающих в результате нагрева и старения изоляции в процессе эксплуатации. В режиме холостого хода при пере-

*Исследования проведены с применением оборудования лаборатории электромагнитной совместимости Южно-Уральского государственного университета, приобретённого в рамках национального проекта «Образование».

менном напряжении сила, действующая на данные заряды, определяется интенсивностью электрического поля. В нагрузочных режимах работы силового электрического кабеля при протекании по жилам переменного тока на заряды в диэлектрике действуют электрическое и магнитное поля, обусловленные данным током. Результат их совместного действия, как известно, определяется результирующей силой, которую иногда также называют силой Лоренца [3]:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q(\vec{v}\vec{B}), \quad (1)$$

где $\vec{F}$ – результирующая сила; q – алгебраическая величина движущегося заряда; $\vec{E}$ – напряжённость электрического поля; $\vec{v}$ – скорость движения заряда; $\vec{B}$ – магнитная индукция поля, в котором движется заряд.

Для экспериментальной оценки влияния электромагнитного поля на интенсивность и спектральный состав утечек в изоляции кабеля в радиочастотном диапазоне нами были проведены исследования на действующих кабелях в городских электрических сетях. Исследования проводились в ячейках 6 кВ трансформаторных подстанций на заземляющем проводнике, идущем от оболочки силового кабеля (рис. 1). Использовалось поверенное оборудование: измерительный приёмник для измерения различного рода электромагнитных помех ESPI 3 RODE&SCHWARZ в диапазоне до 3 ГГц; антенна магнитная активная EMCO 6507, диапазон частот 1 кГц – 30 МГц; антенна электрическая активная, EMCO 3301 B, диапазон частот 1 кГц – 30 МГц; измеритель и анализатор электрического и магнитного полей EFA-300 NARDA в диапазоне частот 1 – 32000 Гц; поглощающие клещи MDS-21, предназначенные для измерения мощности промышленных радиопомех в сетях электропитания в радиочастотном диапазоне. Поглощающие клещи, охватывающие провод, содержат ферритовые поглотители энергии радиопомех. Спектрограммы снимались многократно при различном состоянии силового кабеля:

кабель отключен; кабель под напряжением без нагрузки; кабель под напряжением и нагрузкой.

Отдельные результаты исследований на одном из кабелей марки ААШв сечением 3х120 мм² и длиной 660 м приведены на спектрограммах рис. 2–5.

Анализ экспериментальных спектрограмм (рис. 2–5) показал изменение мощности помех, снятых с заземляющего проводника КЛ, обусловленных как внешними источниками, так и утечками в изоляции (спектром частичных разрядов) от действия электрического и магнитного полей. Так, отмечается всплеск на частотах 9–20 МГц при включении кабеля под напряжение, кроме того наблюдается всплеск на 162 МГц. При нагрузке на кабеле в 40 А проявляются всплески на 460 и 591 МГц. Проводя анализ спектрограмм необходимо учитывать естественный шум, обусловленный радио- и телевизионными станциями, сотовую связь (она ярко проявляется на спектрограммах рис. 2–5 в районе 900 МГц). Практически во всех снятых спектрограммах наблюдалась разница спектров при включении кабеля под напряжение на холостом ходу и подключении кабеля под нагрузку.

Предположим, что в исходном состоянии к жилам кабеля приложено напряжение, но нагрузка отсутствует. Тогда под действием напряжённости поля на заряд будет действовать сила, определяемая равенством:

$$F_E = Eq. \quad (2)$$

Под действием этой силы свободные заряды в изоляции кабеля начинают перемещаться вдоль силовых линий напряжённости поля. Направления перемещения зарядов можно представить в виде элементарных проводников, по которым протекает ток утечки I_y .

Если по жилам кабеля протекает ток нагрузки, создающий вращающийся магнитный поток, то на элементарный проводник с током утечки будет действовать сила Ампера, определяемая равенством [3]:

$$F_A = Bl_y I_y, \quad (3)$$

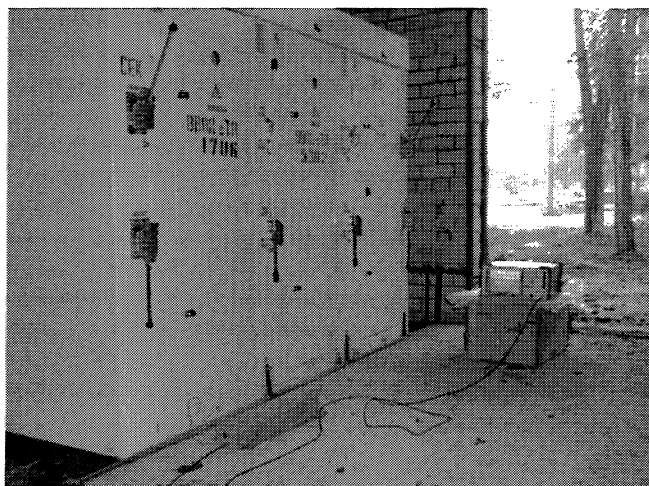


Рис. 1. Схема экспериментальных исследований

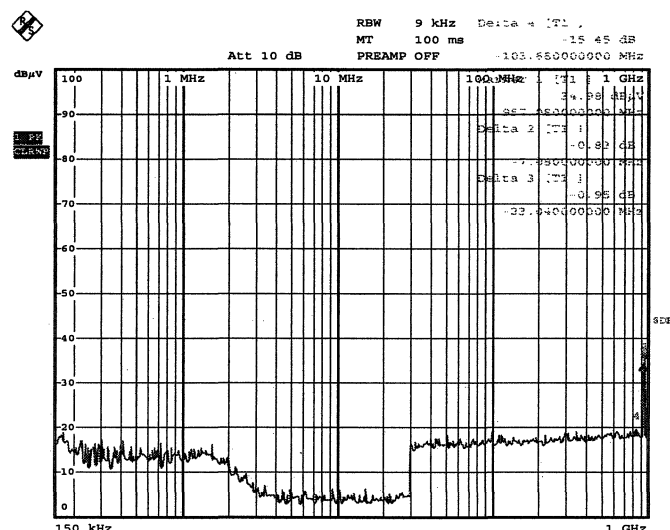


Рис. 2. Спектрограмма № 1, фон в ТП, наводки на клещах (клещи без провода)

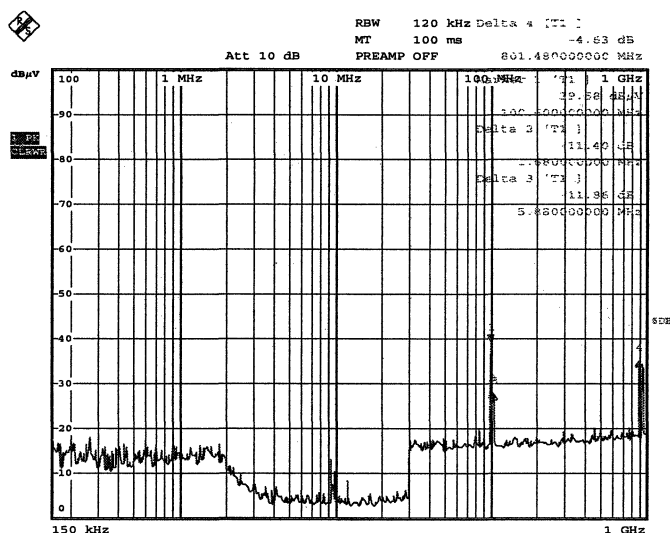


Рис. 3. Спектрограмма № 2, КЛ без напряжения

где l_3 – длина элементарного проводника, равная расстоянию между жилами.

Вторая составляющая силы Лоренца (1), действующая на каждый заряд со стороны магнитного поля, и сила Ампера, действующая на элементарные проводники с током утечки, имеют одинаковую природу, так как упомянутые токи представляют собой направленное движение зарядов, на которые воздействует магнитное поле, обусловленное током нагрузки.

Для оценки степени разрушающего воздействия, связанного с воздействием на свободные заряды магнитного поля от тока нагрузки, рассмотрим сравнение по выделяемым активным мощностям как основополагающим в развитии пробоя диэлектрика и характеризующим рассеивание энергии электрического и магнитного полей в диэлектрике. Рассчитаем и проанализируем количественные выражения выделяемых активных мощностей за счёт воздействия кругового вращающе-

гося магнитного поля на свободные заряды в диэлектрике и за счёт электропроводности и диэлектрических потерь, обусловленных электрическим полем.

Ток утечки между двумя жилами кабеля, протекающий под действием номинального линейного напряжения, можно рассчитать:

$$I_{уф} = U_{ном} \omega C_{\phi}, \quad (4)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота.

Тогда сила Ампера, действующая на элементарные проводники, по которым протекает ток утечки, обусловленный линейным напряжением между двумя соседними жилами, составит

$$F_{А\phi} = B l_3 I_{уф}. \quad (5)$$

Определим мощность, выделяемую при совершении работы по перемещению свободных зарядов (элементарных проводников с токами утечки) под действием магнитного поля.

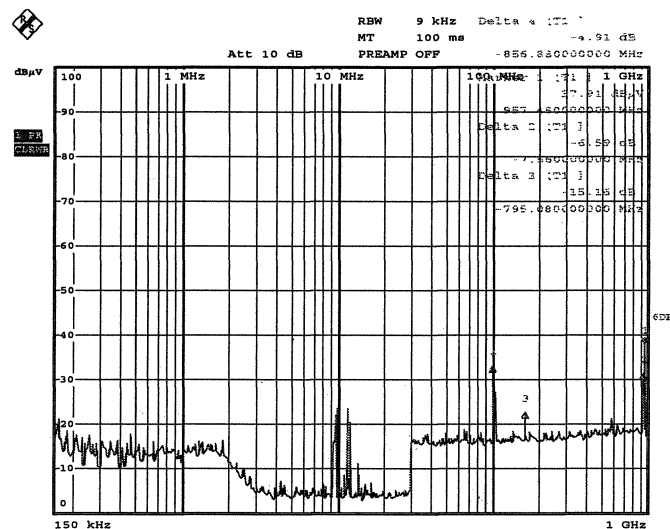


Рис. 4. Спектрограмма № 3, КЛ под напряжением без нагрузки

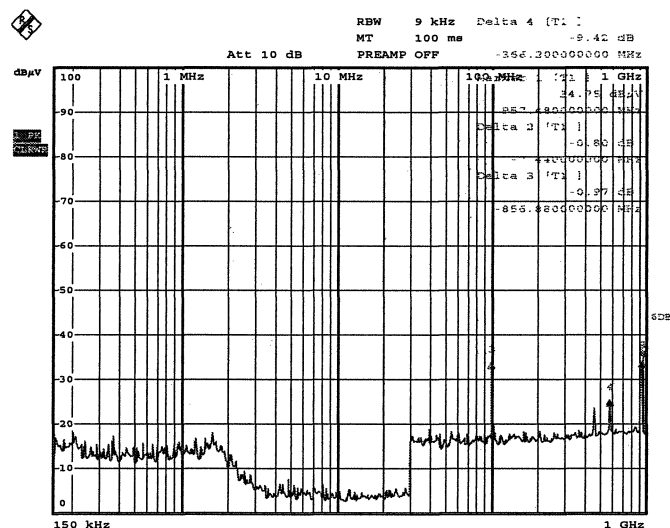


Рис. 5. Спектрограмма № 4, КЛ под напряжением, нагрузка 40 А

Так как токи утечки протекают вдоль силовых линий напряжённости электрического поля, то длина элементарного проводника с током утечки равна толщине изоляции. Вектор магнитной индукции при этом перпендикулярен вектору напряжённости поля и направлению протекания тока утечки. Сила по перемещению зарядов направлена по правилу левой руки, то есть вдоль оси кабеля. Для определения данной мощности можно провести аналогию с определением электромагнитной мощности при вращательном движении ротора электрической машины, определяемой по рекомендациям [4]:

$$P_{\text{эм}} = \omega M_{\text{эм}}, \quad (6)$$

где ω – угловая скорость вращения ротора; $M_{\text{эм}}$ – электромагнитный момент.

Значение электромагнитного момента определяется произведением силы Ампера F_A , действующей на проводники обмотки ротора, на радиус ротора:

$$M_{\text{эм}} = F_A \frac{D_p}{2}, \quad (7)$$

где D_p – диаметр ротора.

Тогда выражение электромагнитной мощности можно представить в виде

$$P_{\text{эм}} = \pi f F_A D_p. \quad (8)$$

Таким образом, мощность, выделяемая при совершении работы по перемещению свободных зарядов под действием магнитного поля, равна произведению длины перемещения, частоты сети и силы, воздействующей на заряды.

Поскольку перемещение зарядов осуществляется вдоль длины кабеля под действием силы Ампера, то

$$P_A = I_{\text{ж}} f F_A. \quad (9)$$

Мощность, выделяемая активной составляющей тока утечки в промежутках между жилами, можно рассчитать по формуле:

$$P_{\text{Еф}} = U I_{\text{yf}} \operatorname{tg} \delta. \quad (10)$$

Таким образом, наличие нагрузки в жилах кабеля приводит к созданию кругового вращающегося магнитного поля, вызывающего магнитные потери в оболочке кабеля и к дополнительному воздействию на изоляцию.

Разрушающее воздействие на диэлектрик магнитного поля, вероятно, схоже и соизмеримо с действием электрического поля и, следовательно, связано с усилением электрохимических процессов, приводящих к изменениям в структуре диэлектрика и развитию пробоя. Наличие магнитного поля увеличивает износ изоляции в рабочих режимах на несколько процентов по сравнению с износом от действия электрического поля [1]. При этом, за время действия устройств релейной защиты при протекании токов двух и трёхфазного короткого замыкания, кабель будет испытывать разрушающее воздействие от магнитного поля, соизмеримое с действием электрического поля. Изгиб кабеля или наличие реактивной составляющей нагрузки кабеля приведёт к изменению взаимного

расположения вектора напряжённости электрического поля и вектора магнитной индукции, что повлияет на изменение значений токов утечки как между фазами, так и между жилами и оболочкой и изменит соотношение разрушающего воздействия на изоляцию электрического и магнитного полей.

Для оценки возможности контроля состояния изоляции, используя метод регистрации спектра электромагнитного поля, дистанционным способом оценивалось электромагнитное поле непосредственно в трансформаторной подстанции и на удалении в 10 м от неё. Измерения проводились над сборными шинами, делая попытку установить суммарные импульсы частичных разрядов всех отходящих силовых кабелей данной трансформаторной подстанции, некоторые результаты приведены на рис. 6–8.

На рис. 8–9 представлены спектрограммы над кабельной линией (типа ААБл 3х150 мм²) и дефектной муфтой (типа ЗСТП – 10/120-240), смонтированной на данном кабеле, при токе в 40 А.

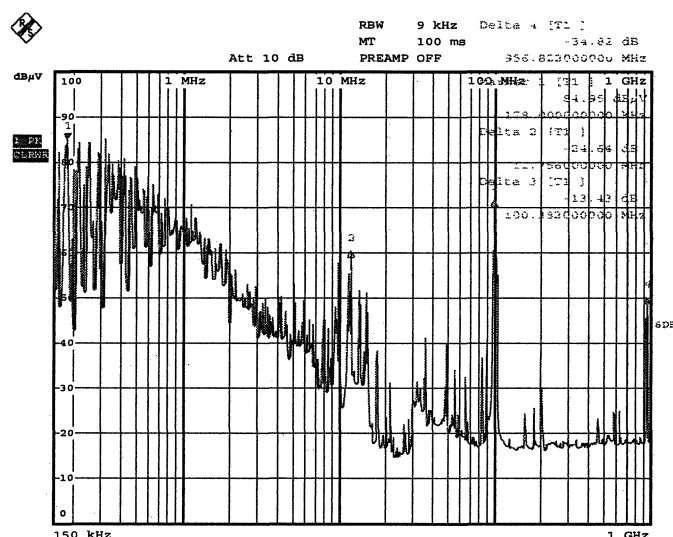


Рис. 6. Спектрограмма электрического поля на улице

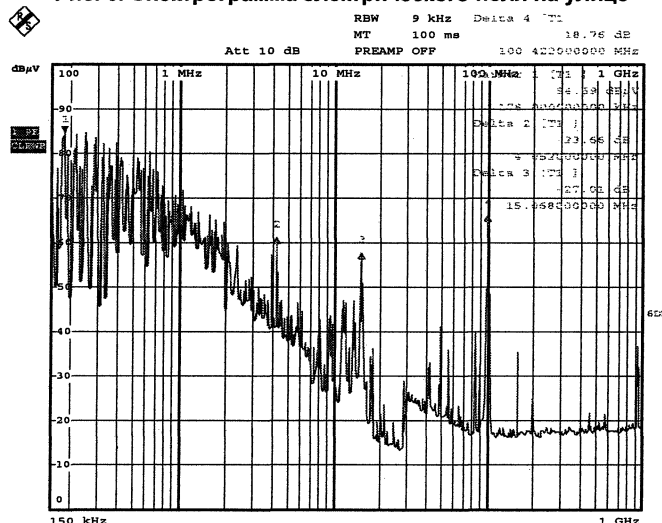


Рис. 7. Спектрограмма электрического поля над сборными шинами 6 кВ в трансформаторной подстанции

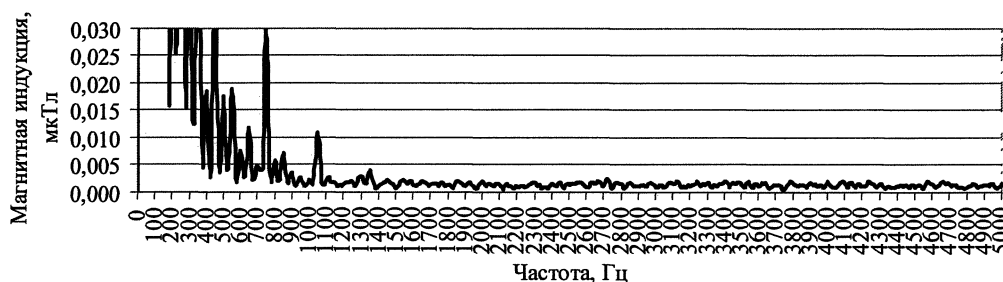


Рис. 8. Спектрограмма магнитного поля над кабелем в диапазоне частот 5–5000 Гц

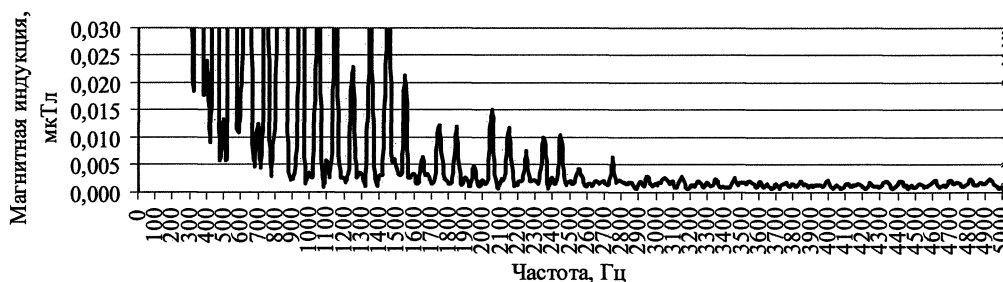


Рис. 9. Спектрограмма магнитного поля над муфтой в диапазоне частот 5–5000 Гц

Анализ спектрограмм рис. 6–7 показал, что использование методик оценки ресурса изоляции силового кабеля по спектру электромагнитного излучения при контроле непосредственно на трансформаторной подстанции, а не над местом дефекта рис. 8–9, затруднено ввиду короткой длительности импульса помех от разрядов в изоляции, внешних и внутренних помех в электрической сети, затухания сигналов в длинных сетях. Отсутствуют статистические массивы данных, определяющие связь спектра электромагнитного поля с видом дефекта в изоляции.

Выводы

1. Проведенные экспериментальные исследования показали, что электромагнитная обстановка вблизи силовых кабелей напряжением 6–10 кВ определяется широкополосным излучением: от гармоник частоты электропитания и от утечки по изоляции КЛ.

2. Теоретические и экспериментальные исследования показали необходимость учёта совместного воздействия переменного электрического и магнитного полей на процессы, происходящие в изоляции силового кабеля.

3. Необходимо проведение дальнейших ресурсных исследований по определению влияния

магнитной составляющей электромагнитного поля на состояние изоляции силового кабеля.

4. Предполагается продолжить исследования по выявлению связи между интенсивностью и спектральным составом внешнего электромагнитного поля силового кабеля и возможными дефектами изоляции. Указанные массивы должны включать в себя следующие данные: физические характеристики спектрального состава в широком диапазоне частот магнитного и электрического полей; составляющие векторов напряжённости поля по координатам x, y, z .

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*. – 2009. – № 1. – С. 46–53.
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. – С. 40–47.
3. Яворский, Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Наука, 1979.
4. Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978.

Поступила в редакцию 10.12.2008 г.

Коржов Антон Вениаминович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы» Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Область научных интересов: электромагнитные процессы в кабельных сетях, оценка остаточного ресурса изоляции силовых кабелей. Контактный телефон: 8-(351) 267-92-46.

Korzhov Anton Veniaminovich. Candidate of technical sciences, associate professor of the Electrical Power Stations, Networks and Systems department of South Ural State University, Chelyabinsk. Scientific interests: electromagnetic processes in cable set, estimation of the remaining resource of power cables insulation. Contact telephone: 007-(351) 267-92-46.