

J. C. FERNANDEZ¹, H. L. SOIBELZON²

(1) Laboratorio de Electroóptica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires Paseo Colón 850, 2º.P., (1063) Buenos Aires, Argentina. jcfernan@fi.uba.ar

(2) Depto. de Electrotecnia, Grupo GEA. Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. Paseo Colón 850, (1063) Buenos Aires, Argentina

THE SURFACE ELECTRIC FIELD OF CATENARY HIGH VOLTAGE OVERHEAD TRANSMISSION LINES

Abstract. Most of the interference created by high voltage lines arises from the corona effect due to high electric fields (also called surface gradients) on the surface of the conductors of the line. Common methods for the calculation of electric fields created by power transmission lines assume straight horizontal lines parallel to a flat ground. The influence of the sag due to the line weight is neglected or modelled by introducing an “effective” height for the horizontal line in between the maximum and the minimum heights of the line. In this work we compare values of the surface fields created by horizontal lines and catenary lines. We find that for pronounced sags there are large differences between values of electric field predicted by the exact calculation and the horizontal line approximation, and a better estimate arises from placing the horizontal line near the minimum catenary height.

Introduction

The calculation and measurement of fields generated by high voltage power transmission lines has been a major concern in the past years, as the continuous increase in human population, with a trend to concentrate in large cities, has created an unprecedented demand of electric power and accelerated the construction of high voltage transmission lines near or over populated areas.[1 - 5]

An important issue is the corona effect [6] created by UHV and EHV transmission lines, which are the common choice as of lately. Large fields and appropriate atmospheric conditions may cause power loss, radio and TV interference and audible noise [1], [6].

In this case the important number is the electric field on the surface of the conductors

(surface gradient), which may be influenced by the shape of the line.

Several publications have been made to calculate and measure the electric and magnetic fields created by power transmission lines. Most assume horizontal straight lines parallel to a flat ground, and the sag due to the line weight is neglected or introduced by taking an “effective” or “average” height in between the maximum and the minimum heights of the line [1], [7]:

$$H_{av} = H - 2/3 S$$

where H is the maximum height and S the sag.

One publication [8] calculates the magnetic field of a catenary line and reports that differences as large as 40% are found between the exact calculation and the values obtained from the straight line located at maximum height. Field distribution also var-

ies along the span, contrary to the constant value produced by the straight line. This calculation was made for a line with a distance of 100 m between poles, maximum height of 13 m and a sag of 2m, that is, where the sag is quite less pronounced than in UHV or EHV transmission lines.

In this paper we shall calculate the electric field generated by a catenary line and compare the results with fields generated by a straight horizontal line, in order to estimate the effects introduced by the sag.

Catenary geometry

Figure 1 depicts the basic catenary geometry for a single-conductor line, where H is the maximum height on the extremes of the line, h is the minimum height at midspan (hence the sag is $S = H - h$) and L is the span length.

This geometry is described by:

$$z' = z(x') = h + 2\alpha \sinh^2\left(\frac{x'}{2\alpha}\right) \quad (1)$$

where α is the solution of the transcendental equation:

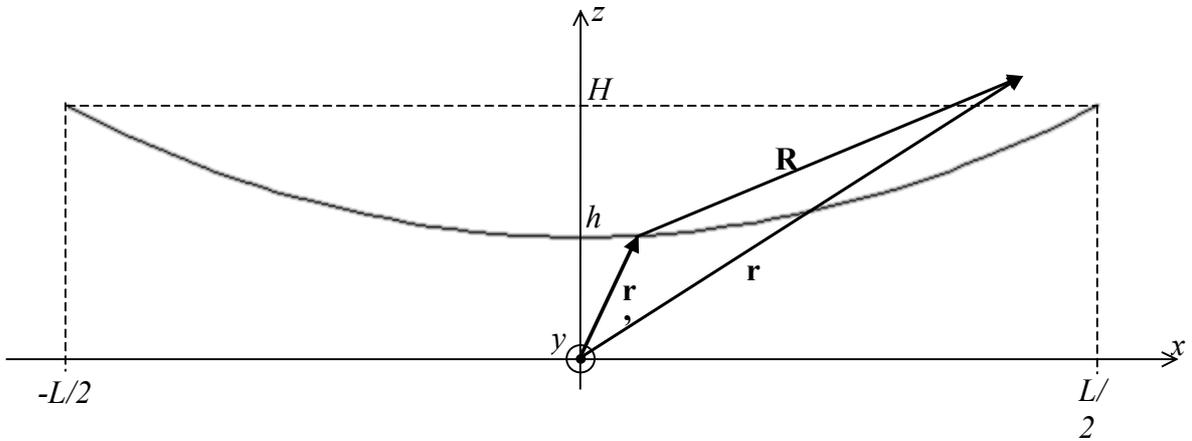


Figure 1 – Basic catenary geometry

$$2\frac{H-h}{L}u = \sinh^2(u) \text{ with } u = \frac{L}{4\alpha}.$$

The parameter α is also associated with the mechanical parameters of the line: $\alpha = T_h / w$ where T_h is the conductor tension at midspan and w is the weight per unit length of the line.

Electric field of catenary

The electric field created by a catenary single conductor line, as described by (1), placed in air far from any other body can be obtained from:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{C(\mathbf{r}')} \lambda(\mathbf{r}') \frac{\mathbf{R}}{R^3} dl'$$

where $\epsilon_0 \cong 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ is the free space constant, and $\lambda(\mathbf{r}')$ the lineal charge density which depends on the electric voltage of the

conductor. The integral is calculated on the curve $C(\mathbf{r}')$ defining the catenary, and $R = |\mathbf{R}| = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$, where \mathbf{r}' is the position of a point on the curve and \mathbf{r} the position of the point in space where the field is to be calculated (Figure 1).

When this single conductor line is placed over a flat ground of homogeneous properties (i.e., permittivity ϵ and resistivity ρ) an image line specularly symmetric respect of the air-ground interface plane has to be introduced to take into account the boundary conditions of the electric field and electric currents in the conductive ground.

The former expression then becomes:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{C_1(\mathbf{r}')} \lambda(\mathbf{r}') \frac{\mathbf{R}_1}{R_1^3} dl'_1 - \frac{\kappa}{4\pi\epsilon_0} \int_{C_2(\mathbf{r}')} \lambda(\mathbf{r}') \frac{\mathbf{R}_2}{R_2^3} dl'_2 \quad z \geq 0 \quad (2a)$$

with:

$$\kappa = \frac{\varepsilon_{eqr} - 1}{\varepsilon_{eqr} + 1} \quad \varepsilon_{eqr} = \varepsilon_{2r} - \frac{i}{2\pi f \varepsilon_0 \rho} \quad (2b)$$

f being the frequency in Hz of the line voltage.

κ is a complex factor due to the fact that the equivalent permittivity of the conductive ground is complex. The field on the air over ground is calculated by the superposition of the field created by the real catenary line $C_1(\mathbf{r}')$ plus the field created by the image underground line $C_2(\mathbf{r}')$. In these equations:

$$R_1 = |\mathbf{R}_1|, \quad \mathbf{R}_1 = (x - x')\hat{\mathbf{x}} + (y - y'_0)\hat{\mathbf{y}} + (z - z')\hat{\mathbf{z}}$$

$$R_2 = |\mathbf{R}_2|, \quad \mathbf{R}_2 = (x - x')\hat{\mathbf{x}} + (y - y'_0)\hat{\mathbf{y}} + (z + z')\hat{\mathbf{z}}$$

where $z' = z(x')$ is given by Eq. (1) and y'_0 is the constant position of the single conductor line on the y axis. This parameter allows to incorporate more catenary conductors to model the n-phase line by superposition.

At industrial frequencies the imaginary part of (2b) is five or six orders of magnitude larger than the real part, and $\kappa \rightarrow 1$, the classical result of the method of images.

Eqs. (2) give the electric field created by a single conductor of vanishing radius. When a cylindrical conductor of finite radius a is considered, the position of the image line is shifted towards the ground: $t = \sqrt{z^2 - a^2}$.

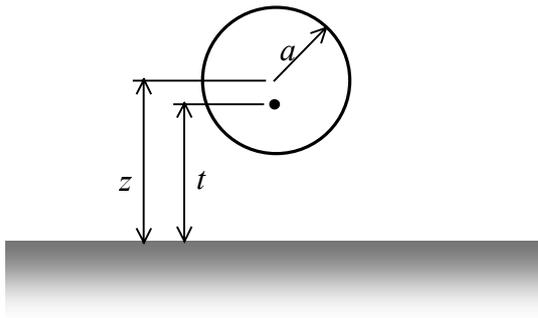


Figure 2 – Image line

As $z \gg a$ for overhead lines, we may safely replace the real conductors by a geometrical catenary line located in their axes to calculate the electric field.

In case that the line is made up with more than one conductor, the charges induced on each one are calculated through the potential coefficients [9]. In our case it is

enough to use the voltage of the single conductor line to obtain $\lambda(\mathbf{r}')$:

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \left[\int_{C_1(\mathbf{r}')} \frac{\lambda(\mathbf{r}')}{R_1} dl'_1 - \int_{C_2(\mathbf{r}')} \frac{\lambda(\mathbf{r}')}{R_2} dl'_2 \right] \quad z \geq 0$$

We assume for this calculation that the charge is constant along the line.

$$\text{For } x = 0, y = y'_0, z = h - a \Rightarrow V = V_0$$

Using the expression of the catenary and manipulating the integrands we get,

$$\lambda = \frac{2\pi\varepsilon_0 V_0}{I_1 - I_2} \quad (3a)$$

with:

$$I_1 = \int_0^{L/4\alpha} \frac{\cosh(2u) du}{\sqrt{u^2 + \left[a/2\alpha + \sinh^2(u) \right]^2}} \quad (3b)$$

$$I_2 = \int_0^{L/4\alpha} \frac{\cosh(2u) du}{\sqrt{u^2 + \left[(2h - a)/2\alpha + \sinh^2(u) \right]^2}}$$

$V_0 = |V_0|e^{i\varphi}$ is the voltage of the conductor. A phase angle φ may be introduced to accommodate n-phase lines. Thus the charge density is generally a complex quantity.

Having calculated the charge density, the electric field at any point above ground is:

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \frac{\lambda\alpha}{2\pi\varepsilon_0} [I_3 - I_4] \quad z \geq 0$$

with:

$$I_3 = \int_{-u_0}^{u_0} \frac{[(x - 2\alpha u)\hat{\mathbf{x}} + (y - y'_0)\hat{\mathbf{y}} + (z - z')\hat{\mathbf{z}}] \cosh(2u) du}{\left[(x - 2\alpha u)^2 + (y - y'_0)^2 + (z - z')^2 \right]^{3/2}}$$

$$I_4 = \int_{-u_0}^{u_0} \frac{[(x - 2\alpha u)\hat{\mathbf{x}} + (y - y'_0)\hat{\mathbf{y}} + (z + z')\hat{\mathbf{z}}] \cosh(2u) du}{\left[(x - 2\alpha u)^2 + (y - y'_0)^2 + (z + z')^2 \right]^{3/2}}$$

$$z' = h + 2\alpha \sinh^2(u) \quad u_0 = L/4\alpha$$

These integrals, as those in the expression of the charge density have to be calculated by numerical methods.

Comparison with straight horizontal lines

Applying the same method used for a catenary single conductor line we can calculate the electric field created by a horizontal single conductor line located at a height z_0 above the ground:

$$V(\mathbf{r}) = \frac{\lambda_0}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad z \geq 0$$

with:

$$R_1 = |\mathbf{R}_1| \quad \mathbf{R}_1 = (y - y'_0)\hat{\mathbf{y}} + (z - z_0)\hat{\mathbf{z}}$$

$$R_2 = |\mathbf{R}_2| \quad \mathbf{R}_2 = (y - y'_0)\hat{\mathbf{y}} + (z + z_0)\hat{\mathbf{z}}$$

$$\text{We get: } \lambda_0 = \frac{4\pi\epsilon_0 V_0}{\ln\left(\frac{z_0 + t}{z_0 - t}\right)} \cong \frac{2\pi\epsilon_0 V_0}{\ln\left(\frac{2z_0}{a}\right)}$$

where we have used $t = \sqrt{z_0^2 - a^2}$ and $a \ll z_0$. The field created by the straight single conductor lines is:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{\lambda_0}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{\mathbf{R}_1}{R_1^2} - \frac{\mathbf{R}_2}{R_2^2} \right) \quad z \geq 0$$

We shall compare both calculation schemes for HV real lines in Argentina with characteristics described in Table 1:

Table 1 – Power line characteristics

	V_0 (kV)	L (m)	H (m)	H (m)	S (m)	H_{av} (m)
I	500	465	25.65	8.50	17.15	14.22
II	132	250	12.32	7.01	5.31	8.78

In both cases the conductor radius is taken to be $a = 1.25 \text{ cm}$.

Table 2 presents the catenary coefficient α , the charge densities for the catenary and the straight line at $z_0 = H_{av}$ and the height h_0 of the straight line for $\lambda_0 = \lambda$:

Table 2 – Line model parameters

	α (m)	λ ($\mu\text{C}/\text{m}$)	λ_0 ($\mu\text{C}/\text{m}$)	h_0 (m)
I	1578.83	3.85	3.6	8.59
II	1472.16	1.04	1.01	7.04

h_0 is slightly larger than the minimum height.

For visual comparison, we plot the surface electric field on the lowest point along the line for Line I:

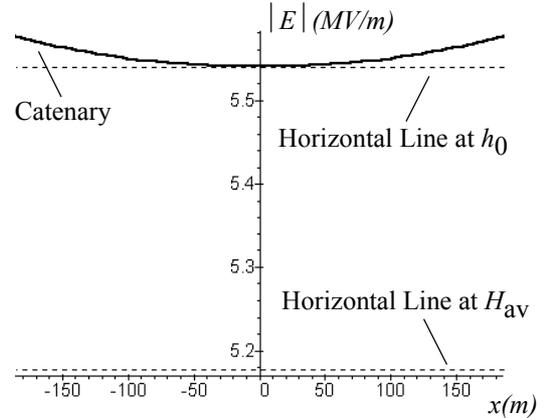


Figure 3 – Electric Field along the line (Line I)

The maximum electric field on the catenary line conductor surface occurs at the extremes. The values for both example lines and the horizontal line approximations at H_{av} and h_0 are presented in Table 3:

Table 3 – Maxima Surface Electric Fields

	Catenary	H.L. H_{av}	H.L. h_0	error %
I	5.61	5.18	5.54	-7.7
II	1.508	1.46	1.504	-3.2

Values in this table are in (MV/m). The line at H_{av} yields a larger error (tabulated) and the error increases with the sag.

The electric field exactly under the horizontal line is vertical and constant, with values shown in Table 3. In the case of the catenary line there is a longitudinal component which is about one order of magnitude smaller than the vertical component and varies almost linearly with x . In summary, the field magnitudes for the catenary and the horizontal line at h_0 are coincident at midspan and differ about 1% at the extremes.

Graphs and comparisons for Line II are similar and are not included here because of lack of space.

Conclusions

The electric field on the conductor surface of a catenary line over conductive ground has been compared with the electric

field created by a straight line at a height H_{av} commonly taken in the literature to calculate the fields. For a HV transmission line with a pronounced sag we find that there are large differences in the maximum electric field value and the exact calculation has to be used in order to get good values of the field. These differences decrease when the sag is smaller, but in any case a better choice seems to be a

straight line at or slightly above the minimum height of the catenary.

Acknowledgement

This work was partially supported by Research Grants I042 and I045 from the University of Buenos Aires.

References

- [1] M.Nanya Kumari, O.Rajesh Kumar, P.V. V.Nambu-diri, K.N.Srinivasan, "Computation of Electrical Environmental Effects of Transmission Lines", 11th Int. Symp. on High Voltage Eng., London, 1999.
- [2] T.Keikko, J.Isokorpi, L.Korpinen, "Practical problems in calculating electric fields of Transmission Lines", 11th Int. Symp. on High Voltage Eng., London, 1999.
- [3] R.Olsen and P.Wong, "Characteristics of Electromagnetic Fields in the Vicinity of Electric Power Lines", IEEE Trans., Vol. PWRD-7, pp.2046-2055, Oct.1992.
- [4] T.Takuma and T.Kawamoto, "Recent Developments in Electric Field Calculation", IEEE Trans., Vol. MAG-33, pp.1155-1160, Mar.1997.
- [5] H.L.Soibelzon and L.F.Ferreira, "Recommendations for Numerical Limits and Operator Position during the Measurement of Electric and Magnetic Fields", 4th. European Symp. on EMC, Brugge, Sept. 2000.
- [6] Chapters 4-7 in "Transmission Line Reference Book – 345 KV and above", 2nd. Ed., Palo Alto, 1982.
- [7] L.Dellera and E.Garbagnati, "Lightning Stroke Simulation by means of the Leader Progression Model", Part II, IEEE Trans., Vol. PWD 5, No.4, pp.2023-2029, Nov. 1990.
- [8] A.V.Mamishhev, R.D.Nevels, B.D.Russell, "Effects of Conductor Sag on Spatial Distribution of Power Line Magnetic Field", IEEE Trans., Vol. PWD 11, No.3, pp.1571-1576, July 1996.
- [9] D.W.Deno and L.E.Zaffanella, "Field effects of Overhead Transmission Lines and Stations", in "Transmission Line Reference Book – 345 KV and above", 2nd. Ed., Palo Alto, 1982.

*Н. В. КОРОВКИН¹, Е. Е. СЕЛИНА¹, П. ЗВОЯКЕР², Ф. РАШИДИ²,
М. ЯНОЗ², А. КОРДЬЕ³, П. ОСАН³, Д. ВАЛТЕРС³*

¹)Санкт-Петербургский Государственный Технический Университет, Россия,

²)Swiss Federal Institute of Technology of Lausanne, Switzerland,

³)ALCATEL, Submarine Networks Division.

ПОДАВЛЕНИЕ ПОМЕХ В СИСТЕМЕ ПИТАНИЯ ПОДВОДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Реферат. Рассмотрена типичная конструкция системы передачи данных на большие расстояния с помощью подводных оптических кабелей. Показано, что наблюдаемые сбои в передаче информации могут быть связаны с неблагоприятной электромагнитной обстановкой в зонах расположения оконечных подстанций кабеля. Рассмотрены возможные пути проникновения помех в систему питания промежуточных оптических усилителей и предложены меры по подавлению этих помех.

1. Введение

Линии оптической связи прокладываются на расстояния до нескольких тысяч километров. Для устойчивой работы столь длинных оптических линий необходимы промежуточные усилители оптического

сигнала. Поэтому на обоих концах линии кроме источников собственно телекоммуникационных сигналов устанавливаются источники электромагнитной энергии с напряжением порядка ± 10 кВ обеспечивающие питание промежуточных усили-

телей. Важно, что передача информационных оптических сигналов и питание промежуточных усилителей осуществляется по и тому же одному кабелю, имеющему вследствие этого достаточно сложную как в механическом, так и в электротехническом смысле конструкцию.

Оптический кабель представляет собой стальную трубку, внутри которой расположены оптические волокна, по которым и осуществляется связь. Вокруг стальной трубы расположено несколько повивов стальной проволоки, обеспечивающие как механическую прочность провешиваемого на большие (до 7000м) глубины кабеля, так и передачу постоянного тока питания промежуточных усилителей. Вблизи берега кабель может дополнительно укрепляться стальной броней, обеспечивающей ему неуязвимость в зонах активного рыболовства. Варианты исполнения оптических кабелей многообразны. Могут использоваться как неэкранированные, так и экранированные кабели, возможно применение различных типов кабелей на различных участках трассы в зависимости от конкретных условий прокладки (рельеф дна, форсирование при подходе к побережью болот, рек и т. д.).

Источники электромагнитной энергии (системы питания) оптических телекоммуникационных линий должны обеспечивать в промежуточных усилителях, расположенных на линии, постоянный ток порядка 1А по всей длине трассы. Энергетическое оборудование системы питания расположено на обоих концах оптической линии на специальных подстанциях, находящихся, как правило, в городах вблизи берега океана. Поэтому только 10-50 км линий оптической связи укладываются по поверхности земли. Расстояние между промежуточными усилителями, расположенными по всей трассе, составляет 50-300 км и они представляют собой довольно сложные электронные устройства.

Жесткие требования к устойчивости оптической связи практически в производственных условиях внешней электромагнитной обстановки ставят как весьма ак-

туальную задачу исследования возможных путей проникновения электромагнитных помех в систему питания подводных оптических линий связи, а также задачи оценки возможных уровней помех и разработки средств защиты от них.

Перечисленные задачи являются типичными задачами электромагнитной совместимости. Следует отметить, что практическая история развития данной прикладной проблемы типична для большинства задач ЭМС. На стадии проектирования разработчики принимали меры, обеспечивающие устойчивость работы каждого элемента системы в отдельности. Так, например, даже при увеличении напряжения на промежуточных усилителях в несколько раз от номинального или уменьшении в несколько раз тока усилителей оптическая связь не прерывается. Система заземления подстанции, осуществляющей питание оптической линии, удовлетворяет требованиям отсутствия контуров замыкания помехи и сконструирована таким образом, чтобы минимизировать увеличение потенциала земли подстанции при протекании тока короткого замыкания. Однако, комплексный характер неблагоприятной внешней электромагнитной обстановки, включающей и проникновение помех через экранирующие металлоконструкции, и наводки в длинных линиях, и наводки в заземлителях приводит к необходимости решать проблемы ЭМС уже в условиях эксплуатации.

Как показывает опыт эксплуатации подводных оптических кабелей, аварийные ситуации, приводящие к сбоям в передаче информации, случаются до нескольких раз в год. Поэтому распространено мнение о том, что оптические линии связи не подвержены действию электромагнитных помех, в общем случае, не верно.

2. Виды помех

Проанализируем основные причины возникновения помех [1] в той части кабеля, по которой осуществляется питание промежуточных усилителей оптических

линий связи. Опасным для устойчивой работы промежуточных усилителей и, соответственно, для прерывания оптической связи являются длительные (до нескольких миллисекунд) провалы тока питания усилителей. В связи с этим будем рассматривать только относительно низко-частотные источники помех. Помехи в кабеле могут быть вызваны:

- флуктуациями геомагнитного поля земли;

- электромагнитным полем высоковольтных линий, расположенных в непосредственной близости от той части трассы оптического кабеля, которая проходит по поверхности земли;

- влиянием токов короткого замыкания силовых подстанций имеющих общую или близко расположенную с подстанцией оптического кабеля систему заземления;

- электромагнитным полем и токами, возникающими при ударах молнии в зоне прокладки оптического кабеля.

Напряженность геомагнитного поля мала (не более 1В/км), но его действие может наблюдаться практически по всей трассе оптической линии, поэтому его влияние может быть опасным. Однако, благодаря тому, что частоты флуктуации геомагнитного поля земли весьма низки, системы регулирования амплитуды питающего напряжения на оконечных подстанциях успевают компенсировать влияние этого типа электромагнитных помех, которые в связи с этим не будут рассматриваться далее. Слабо изучен к настоящему времени и не имеет удовлетворительного количественного описания также механизм перехвата оптическим кабелем тока молнии. Этот механизм проникновения помехи также не будет рассматриваться в настоящей работе, хотя предлагаемые далее методы защиты кабеля будут оказывать подавляющее действие и на этот тип помех.

Таким образом, будем рассматривать индукционные помехи от высоковольтных линий и гальванические через общие системы заземления.

Отметим, что гальванический механизм проникновения помехи в большей степени, чем электромагнитный, определяется конструктивными особенностями конкретного проекта. Но и в этом случае можно говорить о типичных путях проникновения помехи:

- через землю подстанции в заземленный экран оптического кабеля и затем, за счет переходного сопротивления, в сам кабель;

- через систему заземлителей, расположенных по трассе и осуществляющих замыкание накоротко контуров с низким сопротивлением, используемых для уменьшения индукционной помехи, а также через заземления дополнительных экранов и металлоконструкций.

3. Подавление помех

В качестве способов устранения гальванических помех можно предложить следующие. Для уменьшения влияния токов короткого замыкания возможны два решения. Первое – установка полосового фильтра с полосой пропускания 48-52 Гц (при рабочей частоте 50 Гц). Место установки фильтра зависит от проекта, но общей рекомендацией может быть установка его как можно ближе к подстанции, а также перед удаленной землей. Второе решение связано с разделением контуров, по которым протекают токи короткого замыкания. С этой целью можно использовать дополнительный кабель в качестве земли системы питания оптического кабеля и расположить его в непосредственной близости от основного кабеля. При этом заземление этого дополнительного кабеля следует выполнить возможно дальше от рабочих заземлений силовых подстанций. Отметим, что это решение не обеспечивает защиты от тока молнии, так как он может быть перехвачен этим дополнительно созданным контуром заземления.

С целью уменьшения индуктивной помехи от высоковольтных линий эффективны такие традиционные методы, как применение экранов и замкнутых накоротко контуров, проложенных в той же

плоскости, что и основной кабель, и максимально близко к нему.

Рассмотрим, влияние на оптический кабель двух факторов: электромагнитного поля, создаваемого высоковольтными линиями, и тока короткого замыкания в земле, на примере типичной системы питания оптической кабельной линии. Исследуем также эффективность предложенных средств защиты от помех. В рассматриваемой системе, на наземном участке линии в качестве обратного провода вместо земли используется дополнительная многожильная экранированная кабельная линия, проложенная в непосредственной близости от оптического кабеля. Будем называть эту линию – «земля системы», в отличие от «земли подстанции», на которую замкнута система заземления подстанции. Этот кабель заземлен через удаленную землю на берегу океана. Для уменьшения индуктированной помехи на наземном участке кабеля проложен также дополнительный низкоомный кабель с медной жилой, который замкнут на землю в шести точках по трассе. На ближайшем к подстанции участке длиной 4 км в непосредственной близости от высоковольтных линий, ближайшая из которых расположена на расстоянии 0,5 м, оптический кабель заключен в цилиндрический стальной экран толщиной 4 мм. Оптический кабель проложен по участку суши до берега океана длиной 11 км. Постоянный ток замыкается по стальным проводам оптического кабеля, жиле кабеля, играющего роль земли системы питания, и затем по земле и воде. Будем считать, что первый от подстанции промежуточный усилитель установлен на расстоянии 25 км от берега океана, а последующие – на расстоянии 50 км по всей трассе. Всего таких усилителей в рассматриваемом примере 45. Цель исследования состоит в том, чтобы определить величину тока, наведенного в номинальном режиме в первых десяти от подстанции усилителях.

Переходный процесс в рассматриваемой системе был рассчитан с помощью программы ЕМТР [2]. В схеме замещения

системы источник синусоидального тока с амплитудой 3000 А и частотой 50 Гц моделировал ток короткого замыкания, приходящего из системы заземления силовой подстанции, имеющей общую землю с подстанцией оптической связи. Проведенные теоретические и экспериментальные оценки показали, что амплитудное значение синусоидального напряжения, наведенного в линии электромагнитным полем, созданным током в высоковольтных линиях, можно принять равной 500 В.

Будем считать, что в номинальном режиме постоянный ток в системе питания промежуточного усилителя равен 1 А. Сопоставление результатов расчета помех в рассматриваемой системе выполним для тока ближайшего к подстанции усилителя. При отсутствии в системе экрана и короткозамкнутого дополнительного медного кабеля максимальное значение помехи от тока короткого замыкания в земле равно 9 А и от наведенного напряжения 4,8 А. При этом затухание помехи составляет в течение первого периода колебаний порядка 2,2 дБ и 1,3 дБ в течение последующих периодов колебаний для помех от тока короткого замыкания. Для помехи от наведенного напряжения соответствующие значения затухания равны 0,8 дБ и 0,9 дБ. Такое значение тока помехи условно опасно для питания промежуточных усилителей и приведет к сбоям в оптической связи.

При использовании стального экрана на первом 4 км участке трассы значение тока, наведенного в первом усилителе, уменьшается. Если дополнительный медный кабель проложен вне экрана, то максимальное значение помехи от тока короткого замыкания составляет 7,2 А и от наведенного напряжения 3 А. Если дополнительный медный кабель проложен внутри экрана, то максимальное значение помехи от тока короткого замыкания составляет 3,7 А и от наведенного напряжения 2,8 А. С введением экрана затухание помехи на первых десяти периодах практически отсутствует. Сравнивая полученные результаты можно сделать вывод, что

экранирование кабельной линии питания оптического кабеля приводит к уменьшению помехи в 1.25 раза для помехи от тока короткого замыкания и в 1.6 раза для помехи от наведенного напряжения.

Дополнительный медный кабель практически не влияет на уменьшение помехи от наведенного напряжения и приводит к уменьшению ее значения почти в 2 раза для помех от тока короткого замыкания. Отметим, что такое снижение уровня помех недостаточно для обеспечения стабильной связи.

В результате установки высокодобротного полосового фильтра с полосой пропускания 47-53 Гц максимальное значение снижается наведенного тока в первом усилителе до 1,5 А даже без использования экрана и дополнительного медного кабеля. При использовании дополни-

тельно экрана и медного кабеля помеха не превышает 1,1 А. Можно отметить также существенное затухание помехи в результате использования фильтра. Затухание на первом периоде колебаний составило 1,9 дБ для системы без экрана и 2,5 дБ в системе с экраном.

Таким образом, помехи в цепи питания промежуточных усилителей сигнала могут служить причиной сбоя при передаче сигналов связи, при этом помеха может передаваться в цепь питания, как гальваническим путем, так и через электромагнитное поле. Применение фильтров может решить проблему надежности связи даже без использования дополнительных дорогостоящих экранов и короткозамкнутых контуров медного кабеля.

Литература

1. F.M.Tesche, M.Ianoz, T.Karlsson, "EMC analysis method and computational models". Wiley, 1997.
2. "Alternative Transients Program Rule Book", Katolische Universitaet Leuven EMTP Center, Leuven, 1992.

О. А. Глухов¹, Н. В. Коровкин², Ю. М. Балагула²

¹)Марийский государственный технический университет,

²)Санкт-Петербургский государственный технический университет

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ИХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Реферат. В статье дается обоснование метода пороговой обработки случайного импульсного излучения ЧР и описание прибора, реализующего данную методику измерения. Излагаются результаты вычислительного эксперимента для проверки предположения о степенном законе распределения размеров газовых включений.

1. Введение

При оценке качества высоковольтной изоляции большое внимание уделяется частичным разрядам (ЧР), так как они определяют темпы электрического старения изоляции и являются наиболее частой причиной её повреждения[1,2]. Оперативное диагностирование качества изоляции и своевременное обнаружение мест повреждений в эксплуатационных условиях весьма актуально для широко распростра-

ненного электрооборудования 6-35 кВ. Решение этих проблем возможно при определении значимых параметров электромагнитного излучения ЧР, применении специализированной измерительной аппаратуры и корректной интерпретации результатов.

Разряд ЧР создает в электрооборудовании волновой переходной процесс с широким спектром, сопровождающийся излучением электромагнитной энергии. Параметры излучения зависят не только

от заряда частичной емкости, но и от dU/dt , dI/dt , амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) элементов объекта, их геометрических размеров и связи с пространством. Параметры принимаемого сигнала зависят от еще большего количества факторов. Это предопределяет возможность оценки качества изоляции только по динамике относительных изменений периодически измеряемых параметров импульсного электромагнитного излучения ЧР при возможно большей детерминированности условий измерений.

2. Обоснование методики

При приеме случайного импульсного излучения ЧР целесообразно применить пороговую обработку, после которой наблюдаемый процесс можно рассматривать как поток случайных событий $X(t)$ с интенсивностью $\lambda = n/t$, n - среднее количество ЧР за время наблюдения t . Теоретическое распределение вероятностей превышения установленного порога основано на анализе среднего числа пересечений фиксированного уровня ξ_0 вещественным случайным процессом $X(t)$, что близко к известной задаче о выбросах в [3, 4]. Основным является предположение о дифференцируемости процесса и статистической независимости плотности вероятности p для значений процесса и его производной в один и тот же момент времени $p(x, x') = p(x) \cdot p(x')$. Для стационарного гауссова процесса со статистически независимой производной среднее число положительных выбросов на уровне ξ_0 в единицу времени [4]:

$$n(x_0) = \frac{\sigma(x')}{2\pi \cdot \sigma(x)} \cdot \exp\left(-\frac{\xi_0^2}{2 \cdot \sigma^2(x)}\right), \quad (1)$$

где $\sigma^2(x)$ - дисперсия случайного процесса, $\sigma^2(x')$ - дисперсия производной процесса. Дисперсии $\sigma^2(x)$, $\sigma^2(x')$ можно выразить через односторонний энергетический спектр $F(\omega)$:

$$\sigma^2(x') = \int_0^{\infty} \omega^2 F(\omega) d\omega,$$

$$\sigma^2(x) = \int_0^{\infty} F(\omega) d\omega \quad (2)$$

Излучение ЧР имеет достаточно широкий спектр, поэтому сигнал можно представить белым шумом с ограниченным спектром в полосе частот $\Delta\omega$ (спектр ограничивается полосой пропускания $\Delta\omega$ входных цепей средства измерений) с дисперсией сигнала: $\sigma^2 = F \cdot \Delta\omega$. Эта идеализированная математическая модель позволяет существенно упростить описание реальных процессов. После подстановки (2) в (1) и преобразований получим выражение, связывающее интенсивность потока (среднюю частоту возникновения) с порогом обнаружения:

$$\lambda(\xi) = \frac{\Delta f}{K} \cdot \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3)$$

где $\lambda(\xi)$ – интенсивность потока на уровне ξ , $\Delta f = \omega/2\pi$ – полоса пропускания приемника, K – коэффициент, значение которого определяется крутизной ската АЧХ измерительного тракта. Выражение (3) доказывает необходимость применения приемника с широкой полосой пропускания при измерении пиковой амплитуды случайного импульсного излучения ЧР. Близость экспериментальных данных к нормальному распределению $\lambda = f(\xi) \Rightarrow \lambda \sim \Phi(\xi)$ свидетельствует о большом количестве (десятки - сотни) не имеющих корреляции друг с другом включений с ЧР, параметры каждого из которых статистически независимы.

3. Компьютерное моделирование

Изложенный подход, как и другие существующие методики оценки качества изоляции по характеристикам ЧР, традиционно основывается на предположении, что размеры газовых включений в диэлектрике распределены по нормальному закону [6,7]. Однако ряд исследований [8] позволяет предположить, что более адек-

ватным является степенной закон распределения вида

$$N \sim d^{-H}, \quad (4)$$

где N – число включений размером d , H – показатель степени, характеризующий распределение включений по размерам ($0 < H < 1$).

Чтобы оценить влияние степенного закона распределения размеров включений на вид экспериментальной зависимости $\lambda = f(\xi)$, построим простейшую статистическую модель ЧР.

Для простоты будем рассматривать ЧР в диэлектрике, расположенном между обкладками конденсатора. Предположим, что все включения представляют собой прямоугольники, вытянутые вдоль силовых линий поля, имеющие различную длину d и одинаковую площадь основания s , причем суммарная площадь оснований включений равна площади обкладки конденсатора. Кроме того, пусть включения расположены так, что проекции включений на горизонтальную ось не пересекаются. На рис. 1 включения для наглядности показаны в увеличенном масштабе.

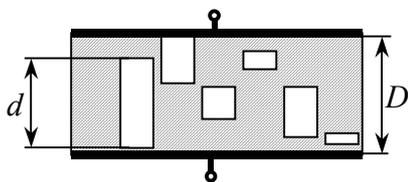


Рис. 1

Простейшая схема замещения, описывающая процессы в цепи с конденсатором при наличии ЧР имеет вид (рис. 2) [6]:

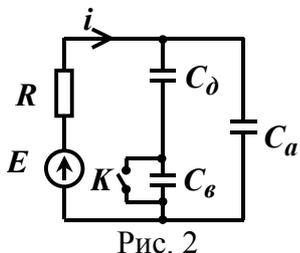


Рис. 2

C_e – емкость включения; C_d – емкость элемента диэлектрика, соединенного последовательно с включением; C_a – емкость остальной части диэлектрика с

включениями; R – сопротивление внешней цепи; E – внешний источник э.д.с.

Пробой включения моделируется закорачиванием конденсатора C_e с помощью ключа K , то есть напряжение погасания ЧР принимается равным нулю. Рассчитав переходный процесс при замыкании ключа K , получим выражение для максимума тока во внешней цепи:

$$I_0 = \frac{E}{R} \frac{C_d^2}{(C_e + C_d)(C_d + C_a)}. \quad (5)$$

Вычислительный эксперимент на основе данной модели строится следующим образом:

- создается массив размеров включений d_j с заданным законом распределения (4), общее число включений порядка $10^4 \div 10^5$;

- исходя из допущений, что в каждый момент времени происходит пробой только одного включения и вероятность пробоя не зависит ни от размера включения d_j , ни от величины E , номер j включения с ЧР выбирается с помощью случайных чисел, имеющих равномерное распределение;

- для данного d_j рассчитываются емкости по следующим формулам (рис. 3):

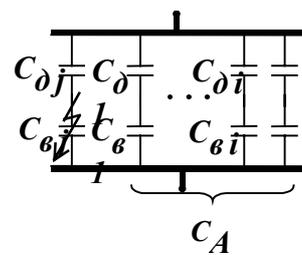


Рис. 3

$$C_e = \frac{\epsilon_e s}{d_j}; \quad C_d = \frac{\epsilon_d s}{D - d_j};$$

$$C_a = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{i=M} \frac{s}{\frac{D}{\epsilon_d} + d_i \left(\frac{1}{\epsilon_e} - \frac{1}{\epsilon_d} \right)}; \quad (6)$$

где ϵ_d и ϵ_e – диэлектрические проницаемости диэлектрика и газа во включении; D – расстояние между обкладками конденсатора, M – общее число включений;

- по формуле (5) находится ток I_0 .

Исследовались выборки $I_0(t)$ с числом импульсов $10^4 \div 10^5$. Фрагмент такой выборки приведен на рис. 4.

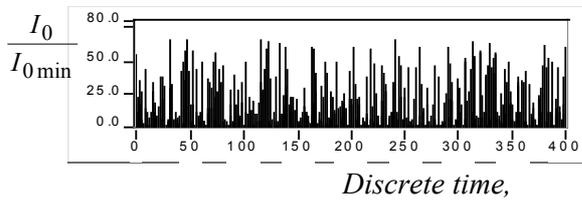


Рис. 4.

Гистограммы, полученные в результате процедуры пороговой обработки временного ряда $I_0(t)$ имеют вид степенной функции с шумовыми искажениями (рис. 5). Чтобы определить показатель степени этой функции, построим ее в билогарифмическом масштабе и определим угловой коэффициент интерполирующей прямой (рис. 6). Вычисления показывают, что этот коэффициент равен показателю степени в соотношении (4), то есть H .

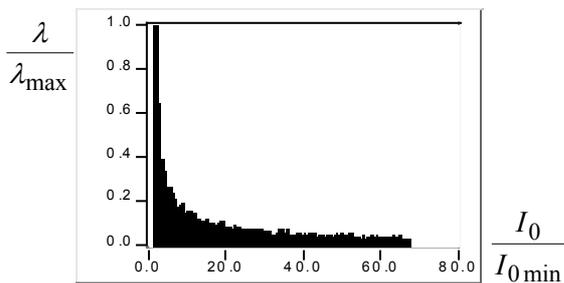


Рис. 5

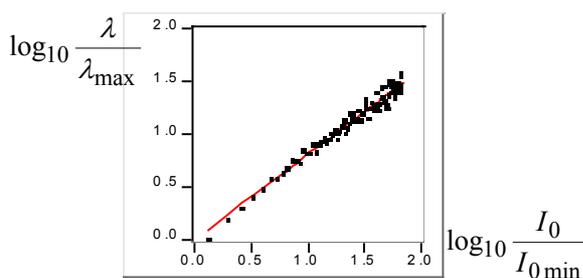


Рис. 6

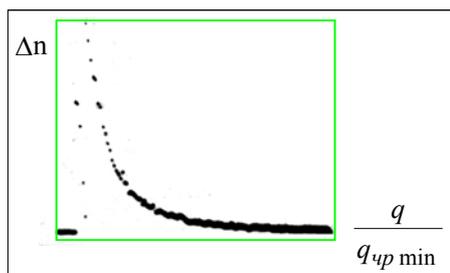


Рис. 7

Точность определения показателя возрастает при приближении H к 1 (При $H=0.9$ погрешность составляет порядка 5%, при $H=0.2-20\%$). Зависимости вида (4) были также получены экспериментально при исследовании амплитудных спектров ЧР слюдобумажноэпоксидных конденсаторов (рис. 7)[7].

4. Прибор для оценки качества изоляции

Разработанный метод оценки качества изоляции по излучению ЧР основан на определении зависимости средней интенсивности потока импульсных сигналов от порога обнаружения $\lambda = f(\xi)$ и наблюдения динамики её изменения при проведении периодических измерений. Практическая реализация заключается в получении экспериментальной зависимости $\lambda = f(\xi)$ при последовательном уменьшении порога обнаружения ξ . специализированного средства измерений. Фактическая зависимость имеет ломаный характер с выраженным "насыщением" при малом пороге, так как с ростом количества обнаруженных источников сигнала n , вероятность взаимного наложения этих сигналов возрастает и

$$\lambda_{изм} < \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (7)$$

При отсутствии совпадения во времени сигналов от включений с ЧР, измеренное значение интенсивности $\lambda_{изм} = \sum \lambda_i$. В итоге получается график кусочно-линейной аппроксимации экспериментальной зависимости $\lambda_{изм} = f(\xi)$, характер которого в большинстве случаев позволяет провести и выделить в качестве диагностических следующие параметры:

- крутизна наклона отрезков аппроксимирующих прямых;
- количество интервалов, необходимых для линейной аппроксимации;
- количественные значения координат точек перегиба;
- показатель степени H .

Отклонения от зависимости (4) в виде выраженных ступенек кривой $\lambda_{изм} = f(\xi)$

являются важным диагностическим признаком для оценки ЧР во включениях изоляции. Разработанный метод оценки ЧР по их импульсному излучению имеет следующие достоинства:

- измерения проводятся в любой точке сети в реальных условиях эксплуатации;
- не требуются устройства подключения, влияющие на адекватность результатов измерений.
- трудоемкость работ незначительна, нет проблемы обеспечения электробезопасности при проведении измерений.

Все это позволяет оперативно проводить измерения во множестве точек и получать большое количество экспериментальных данных за ограниченное время, а сами измерения включать в процедуру периодических осмотров электрооборудования [5].

Эффективность рассмотренного метода диагностирования во многом зависит от параметров измерительной аппаратуры, которая должна обеспечить оптимальный прием в заданной полосе пропускания. Выходной сигнал линейного измерительного тракта (до детектора) с частотным коэффициентом передачи $K(\omega)$ -определяется выражением:

$$U_{вых}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U_{вх}(t) * h(t) e^{-j\omega t} dt = S(\omega) \cdot K(\omega) \quad (8)$$

где $S(\omega)$ – спектральная плотность воздействующего на цепь сигнала. Из выражения (8) следует, что амплитуда измеряемого сигнала будет максимальна, если АЧХ линейной части измерительного тракта «перекрывает» спектр воздействующего излучения. Достоверность измерений амплитуды пиков случайного излучения ЧР будет наибольшей при широкой частотной полосе пропускания измерительного приемника. Длительности импульсов ЧР оцениваются в единицы, десятки наносекунд [1, 2], поэтому верхняя частота измерительного приемника может быть ограничена значением в несколько ГГц.

Выбор нижней частоты зависит от геометрических размеров излучателей – элементов высоковольтного электрооборудования и спектра помех при измерениях. С ростом частоты спектральная плотность помех уменьшается, причем огибающая спектра излучения ЧР является более пологой, чем у мешающих излучений. Исходя из практики измерений, нижняя частота полосы пропускания измерительного приемника может быть рекомендована порядка 150–200 МГц.

Импульсы излучения ЧР имеют значительную скважность, поэтому сигнал, пропорциональный усредненной на интервале ΔT амплитуде, много меньше максимальной амплитуды:

$$\frac{1}{\Delta T} \int_t^{t+\Delta T} U(t) dt \ll U_{max}(t) \quad (9)$$

Эффективное обнаружение таких сигналов возможно при применении пикового детектирования, при времени наблюдения $\Delta T \gg 1/\lambda$. В полной мере преимущества пиковой обработки излучения ЧР проявляются при непосредственном детектировании принимаемого сигнала, а не выходного отклика на него цепей измерительного устройства, как это сделано в измерительных приемниках и анализаторах спектра, основанных на супергетеродинном приеме.

Проведенные исследования и рассмотренные методы оценки параметров ЧР были реализованы при разработке приемника – индикатора импульсных электромагнитных полей [5], структурная схема которого имеет вид: антенна (датчик) - широкополосный усилитель - пиковый детектор – ФНЧ – пороговое устройство - АЦП –формирователь – счетчик (см. рис. 8).

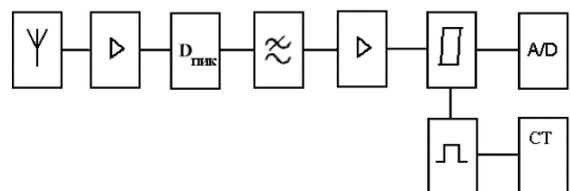


Рис. 8



Рис. 9

Опытный образец прибора ЭЛМИН-3 на рис. 9 имеет широкую полосу пропускания 150-1000 МГц; чувствительность по входу, оцениваемую по спектральной плотности, не хуже 0,2 мкВ/МГц; измери-

тель интенсивности потока импульсов; переключаемый порог обнаружения. Цифровая индикация, звуковая сигнализация, малые габариты обеспечивают удобство эксплуатации. Экспериментальные исследования, выполненные с применением этого прибора, подтвердили правильность основных подходов к оценке ЧР.

Литература

1. В.В.Базуткин, В.П.Ларионов, Ю.С.Пинталь Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах. - М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. П.М.Сви Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. - М.: Энергоатомиздат, 1992.
3. С.М.Рытов Введение в статистическую радиофизику. Ч. 1. - М.: Наука, 1976.
4. С.И.Баскаков Радиотехнические цепи и сигналы. М: Выс. шк., 1983.
5. О.А.Глухов, Е.А.Иванов, В.А.Глухов Особенности измерения электромагнитных полей случайных импульсных процессов в судовых ЭЭС. – Изв. СПбГЭТУ. Сб. научн. тр., вып. 509, СПб.: 1997.
6. Г.С.Кучинский Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, 1979.
7. А.В.Беспрозванных Диагностика высоковольтной твердой изоляции конденсаторного типа по характеристикам ЧР. Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. - Харьков, 1987.
8. Е.Федер Фракталы.- Москва: Мир, 1991.

M. GASTALDI, F. PARASILITI, A. PRUDENZI

Electrical Engineering Dept., University of L'Aquila

IEC STD. 61000-3-2 HARMONIC CURRENT EMISSION LIMITS: A REVIEW BASED ON MONITORING RESULTS.

Abstract. The paper deals with the harmonic emission limits provided by International Electrotechnical Commission (IEC) Std. 61000-3-2 for appliances with current absorption less than or equal to 16 Amps. To this aim attention is focussed on personal computers (PC) as a sample of the wide non-linear appliance class D as regulated by the Standard. Results of some laboratory tests on a PC supplied from the low voltage (LV) grid show that although IEC limits are provided for nominal load however lower loading conditions produce higher specific (mA/W) harmonic contents. This problem is carried out by means of an experimental layout providing harmonic monitoring of a PC supplied from a system with variable impedance.

I. INTRODUCTION

The ever increasing penetration of single-phase power electronics-based appliances into the different segments of end-use demands the establishment of adequate harmonic current limits.

In this field IEC Std. 61000-3-2 settles the harmonic current emission limits for non-linear (NL) appliances rated 16 Amps and below. Most of NL appliances in such ab-

sorption range take part of the class identified by the Std. as class D (Information Technology Equipment) [1].

The IEC Std. substantially differs from the earlier IEEE Std. 519-92 [2] which does not stipulate a limit on the harmonic current emission from the individual NL equipment loads, irrespective of their characteristics or topology. The IEC Std. thus attributes the principal burden of complying with emission

limits to the individual appliance manufacturer.

IEC proposes emission limits be tested for appliances in ideal conditions of supply that are not duplicated in practice: voltage source nearly perfectly sinusoidal with a small internal impedance; nominal absorption from NL appliance.

It is well known that the NL appliance harmonic impact on distribution networks is highly influenced by the characteristics of both the upstream system (in terms of short-circuit impedance or current at the point of common coupling (PCC)) and the non-linear loading conditions (non-linear load amount at the PCC).

The IEEE Std. 519-92 and the current revision drafts account for such variables by introducing the ratio I_{sc}/I_l between short circuit current value at the PCC (I_{sc}) and the fundamental load current (I_l) drawn from PCC. At I_{sc}/I_l variation the effect of NL appliances on the grid can significantly vary, since such a ratio acts as an indicator of the stiffness of the supply system at PCC [3,4].

In the paper, the effects on PC's current harmonic spectra of both load levels different from nominal and attenuation due to system impedance have been assessed through testing conducted on a PC supplied from a generic PCC. The experimental activity has employed a custom monitoring equipment that allows continuous harmonic quantities recording.

Finally, the obtained results are discussed with reference to possible improvements to be included in the next revision of the IEC Std. 61000-3-2.

II. EMISSION LIMITS FROM IEC STD. 61000-3-2

The IEC 61000-3-2 classifies the concerned appliances in four classes: A-D. For each class harmonic current emission limits are given for up to the 39th order. The class D includes appliances with input current with an assigned "special waveshape" and an active input power of $P \leq 600$ W.

The "special waveshape" of class D is the one typically drawn by single-phase

power electronic-based loads employing diode bridge rectifiers with bulk capacitances. Personal computers are among the most widespread equipment taking part of class D. In particular, the harmonic current limits provided for this class are listed in Table I.

Table I. Harmonic emission limits provided for class D.

Harmonic order n	Maximum admissible current (mA/W)	Maximum admissible current (A)
3	3.4	2.3
5	1.9	1.14
7	1.0	0.77
9	0.5	0.4
11	0.35	0.33
$13 \leq n \leq 39$ (odd harmonics)	$3.85/n$	$0.15 \cdot 15/n$

The IEC 61000-3-2 provides also, in Annexes, the main requirements for testing individual appliance harmonic emissions for class D:

- a nearly perfect sinusoidal voltage source with a small internal impedance
- appliance operation at nominal load.

The current value drawn at nominal load will be assumed as $I_{nominal}$.

III. PC OPERATION IN PRACTICAL SYSTEMS

During typical operation PC's power supply characteristics are different from those provided by the IEC testing procedures for the following main considerations.

PC is typically supplied from an ordinary outlet connected to the LV grid through a system impedance that is higher than that provided by IEC.

The harmonic currents produced by PC interact with the upstream system impedance thus determining harmonic voltage drops giving origin to voltage distortion.

Furthermore, the voltage waveshape available at the outlet in practical systems is not perfectly sinusoidal but it is affected by a "background" (no-load) voltage total harmonic distortion ($VTHD_0$) typically in the range 1-3%.

The resulting voltage distortion affects the PC's harmonic current absorption by causing not neglectable attenuation effects, as discussed further.

The PC's power supplies are typically under-utilised with respect to their nominal rating since they are manufactured to supply even the more complex configuration of internal devices. Therefore, PC operates with a current absorption (I_{actual}) typically less than the nominal one (I_{nominal}). The bulk capacitance equipping single-phase diode bridges is designed for nominal load and when the PC's demand is lower the conduction angle of the diodes is shorter, thus giving origin to narrower current pulses. This fact determines that loading conditions different from nominal ones cause a higher harmonic current content for the PC.

Some laboratory tests whose results are shown in Table II evidence how significantly loading conditions affect harmonic current production from PC's power supply.

Table II. Harmonic currents monitored for a PC's power supply connected to a LV outlet ($I_{\text{sc}} = 163 \text{ A}$, $\phi = 10^\circ$).

Harmonic order	Current (A) (P=200 W)	Current (A) (P=75 W)	Current/W (mA/W) (P=200 W)	Current/W (mA/W) (P=75 W)
3	0.981	0.418	3.806	3.891
5	0.655	0.322	2.539	3.002
7	0.425	0.206	1.648	1.922
9	0.367	0.089	1.423	0.830
11	0.305	0.005	1.184	0.046
13	0.178	0.051	0.691	0.474
15	0.083	0.059	0.321	0.553
17	0.062	0.044	0.239	0.408
19	0.037	0.018	0.145	0.171

Table II reports the harmonic current values both in Amps and in mA/W as monitored for a PC's power supply in two different loading conditions: operation at rated nominal active power (200 W), and operation at actual demand relevant to a typical con-

figuration absorption (75 W). The power demand relevant to the above mentioned loading conditions was, respectively, of 264 and 107 W. The harmonic current values expressed in mA/W in Table II have been calculated with reference to these latter values. In the Table both the short-circuit current value (I_{sc}) and the system impedance angle ($\phi = \arctg(X/R)$) as recorded at the LV outlet in no-load conditions are reported.

The results in Table II show that the specific harmonic current absorption in mA/W increases with load decreasing with respect to the nominal value.

In the Table it is also evident that the harmonic current emission limits expressed in mA/W in Table I for nominal load are largely exceeded by the PC monitored during practical operation.

IV. HARMONIC MONITORING ACTIVITY

In order to investigate more in depth how loading levels and attenuation phenomena affect harmonic current spectrum in practical systems, some PCs have been tested in laboratory with the experimental layout reported in Fig. 1.

The testing activity provided harmonic monitoring of a PC supplied from a PCC whose impedance was gradually changed in order to perform a parametrical analysis of PC's harmonic content versus I_{sc}/I_l ratio [5,6].

The variable R and L components of Fig. 1 have been introduced in order to produce the above mentioned changes of the system impedance.

The measurements were taken at the lab's premises and have provided a continuous monitoring activity of harmonic quantities for every session. To this aim a custom monitoring equipment has been used [5-7].

Current and voltage harmonics (magnitude and phase angle) of order up to 40th have been continuously monitored at the PCC.

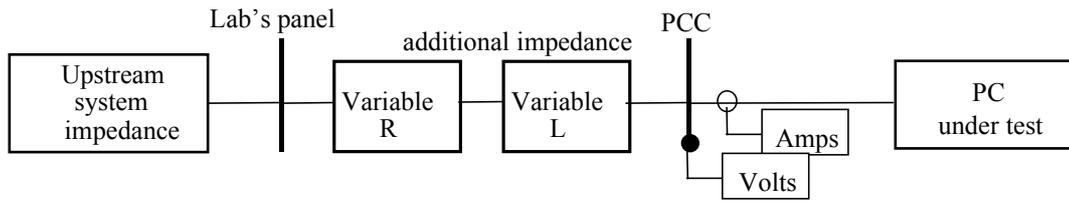


Fig. 1. Lab monitoring activity layout

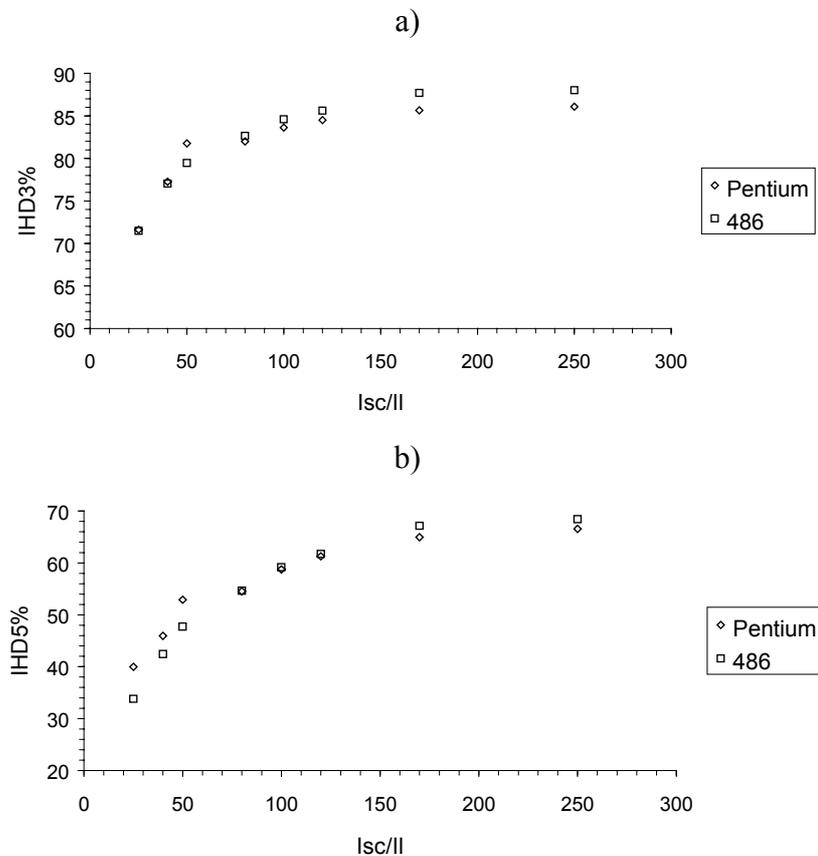
V. ATTENUATION EFFECTS

As above mentioned at a PCC supplying a NL load there exists an interaction of voltage and current distortion primarily due to the system impedance. This effect has been defined attenuation since it produces, as main consequence, the harmonic current magnitudes reduction with the voltage harmonic distortion increase at the PCC [3,4]. Therefore, as the PCC voltage becomes more distorted either current individual harmonic distortion (IHD) for each harmonic order or, thus, current total harmonic distortion index (ITHD) decrease. Even this effect can be attributed to the power supplier diodes conduc-

tion angle variation. With distortion the supply voltage wavelshape tends to become more flattened thus giving origin to larger conduction angles of the diodes with the consequence of more flattened current pulses.

The attenuation effects have been artificially reproduced in some monitoring sessions conducted respectively on a Pentium PC and a 486 PC with the measurement layout of Fig. 1.

The Figs. 2 a)-c) report average values of the scatter plots obtained by monitoring harmonic currents at the PCC for various I_{sc}/I_l values.



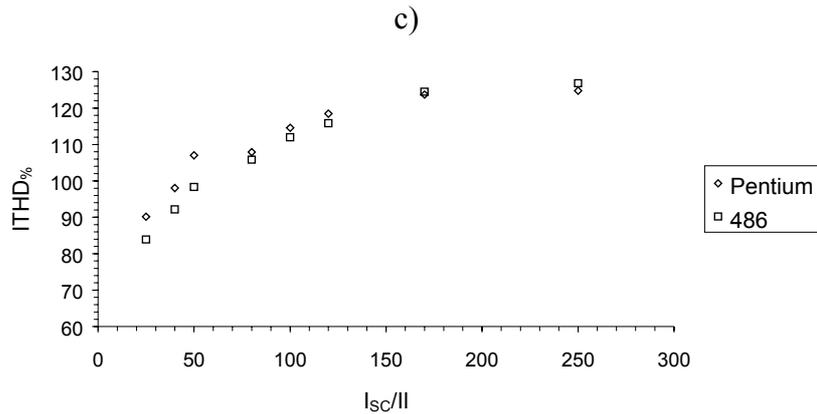


Fig. 2. Attenuation effects for harmonic currents drawn by a PC vs. I_{sc}/II :
a) 3rd, b) 5th, c) ITHD (in percent of fundamental)

The figures report only the 3rd and 5th harmonics jointly with current total harmonic distortion index (ITHD). Analogous trends have been obtained for the further odd main harmonic orders (7th, 9th, etc.).

The figures show clearly how large can be attenuation of the PC's harmonic current at system impedance increase (I_{sc} decrease).

The tests giving results reported in Table II have been repeated for the same PC but connected to a PCC with a system impedance significantly higher ($I_{sc}=48$ A, $\phi=60^\circ$).

The results are reported in Table III. The results evidence how attenuation effects can amplify the loading level effects mentioned in § III.

Table III. Harmonic currents monitored for a PC's power supply connected to a LV outlet ($I_{sc}=48$ A, $\phi=60^\circ$).

Harmonic order	Current (A) (P=200 W)	Current (A) (P=75 W)	Current/W (mA/W) (P=200 W)	Current/W (mA/W) (P=75 W)
3	0.829	0.347	3.227	3.246
5	0.437	0.231	1.700	2.159
7	0.134	0.116	0.523	1.082
9	0.105	0.071	0.407	0.668
11	0.086	0.065	0.335	0.610
13	0.042	0.048	0.164	0.448
15	0.048	0.054	0.188	0.504
17	0.034	0.052	0.131	0.489
19	0.029	0.053	0.114	0.499

As above mentioned, the IEC Std. testing procedure is applied to NL appliance at nominal load.

The results of Figs. 2 show that in practical systems, where the supply voltage is affected by a certain level of VTHD, attenuation effects must be expected. In presence of such effects the nominal loading conditions of appliance is less conservative in terms of harmonic current content.

The compliance with emission limits set for nominal conditions, therefore, seems a less conservative action which brings underestimate possible negative effects of harmonic current flows within distribution networks.

Therefore, a PC's power supplier manufactured with characteristics complying with IEC emission limits, in typical practical conditions produces specific harmonic currents (mA/W) well exceeding limits.

VI. CONCLUSIONS

The IEC Std. 61000-3-2 provides harmonic current limits for conditions that are not duplicated in practical systems.

Some lab tests performed on a PC operating in practical conditions show that the IEC limits result not conservative for limiting harmonic current flows from NL appliances in practical systems.

Therefore, in a revision activity of the IEC Std. 61000-3-2, both loading levels and attenuation effects occurring in practical systems should be considered for assessing testing procedures.

References

- [1] IEC Std. 61000-3-2 (1995). Electromagnetic Compatibility. Part 3: Limits. Section 2: Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase. Genève 1995.
- [2] IEEE Std. 519 (1992). IEEE recommended practices and requirements for harmonic control of electrical power systems. IEEE, New York, 1993.
- [3] A. Mansoor, W.M. Grady, A.H. Chowdhury, M.J. Samotyj, "An investigation of harmonics attenuation and diversity among distributed single-phase power electronics loads," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, no. 1, Jan. 1995.
- [4] A. Mansoor, W.M. Grady, P.T. Staats, R.S. Thallam, M.T. Doyle, M.J. Samotyj, "Predicting the net harmonic currents produced by large number of distributed single-phase computer loads," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, no. 4, Oct. 1995.
- [5] A. Capasso, R. Lamedica, A. Prudenzi, "Experimental characterization of personal computers harmonic impact on power quality," Computer Standards & Interfaces 21 (1999) pp. 321-333.
- [6] A. Capasso, R. Lamedica, A. Prudenzi, "Cellular phone battery chargers impact on voltage quality," Proc. of IEEE PES Summer General Meeting, Seattle, July 16-20, 2000.
- [7] R. Lamedica, C. Sorbillo, A. Prudenzi, "The continuous harmonic monitoring of single-phase electronic appliances: desktop pc and printers," Proc. of IEEE ICHQP 9-th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Orlando FL, Oct. 1-4, 2000.

М. В. МАТВЕЕВ¹, М. К. КОСТИН²

¹ООО ЭЗОП, ²АО ВНИИЭ

ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ НА ЭНЕРГООБЪЕКТАХ

Аннотация Рассматриваются проблемы контроля электромагнитной обстановки (ЭМО) на объектах электроэнергетики и предприятиях с высокой энерговооруженностью (электротранспорт, нефте- и газоперекачивающие станции, алюминиевое производство, тяжелая промышленность). Такой контроль следует проводить перед внедрением цифровых систем защиты, автоматики, управления, сигнализации и связи. На существующих объектах рекомендуется применять методы на базе натуральных измерений. Для проектируемых объектов должны использоваться расчетные методы с последующей экспериментальной проверкой в ходе пусковых испытаний.

1. Введение

Одной из основных сложностей на пути внедрения на энергообъектах цифровой аппаратуры защиты, автоматики, управления, сигнализации и связи является необходимость обеспечения ее электромагнитной совместимости (ЭМС) с жесткой электромагнитной обстановкой (ЭМО). Острота проблемы объясняется сравнительно низкой помехоустойчивостью цифровой аппаратуры – с одной стороны, и слабым вниманием к проблеме ЭМС при проектировании многих объектов – с другой.

Не следует, однако, считать, что проблема ЭМС является непреодолимым барьером на пути внедрения современной цифровой аппаратуры на энергообъектах.

Существует обширный опыт ее успешного решения, как за рубежом, так и в нашей стране. Однако для этого требуются усилия, как производителей аппаратуры, так и организаций, осуществляющих эксплуатацию и реконструкцию энергообъектов.

2. Характеристики электромагнитной обстановки

ЭМО на энергообъектах определяется, как правило, следующими факторами [1]:

Потенциалы на элементах заземляющего устройства (ЗУ) при коротких замыканиях и грозových разрядах.

Наводки на информационные цепи и цепи питания при грозovém разряде.

Импульсные поля и помехи при коммутациях силового электрооборудования.

Высокочастотные импульсные поля и помехи при коммутациях электрооборудования малой мощности (реле, контакторы, щетки электродвигателей и т.п.).

Низкочастотные электрические и магнитные поля при штатных и аварийных режимах работы силового электрооборудования.

Провалы, прерывания и выбросы напряжения питания при коммутации мощных потребителей и авариях.

Высокочастотные поля от мощных полупроводниковых выпрямителей и конверторов, а также различных радиопередатчиков, включая портативные радиостанции.

Электростатический разряд.

Набор параметров, контролируемых в ходе оценки ЭМО, должен позволять прогнозировать уровни основных видов помех. Ниже мы рассмотрим и обобщим результаты работ по оценке электромагнитной обстановки, выполненных за последнее десятилетие на более чем 100 энергообъектах России.

3. Оценка эксплуатационного состояния заземляющего устройства.

Результаты проверки эксплуатационного состояния ЗУ с точки зрения ЭМС должны позволять выполнить оценку следующих величин:

- максимальных значений потенциалов точек ЗУ,
- максимальных значений разностей потенциалов между точками ЗУ,
- при коротких замыканиях и (желательно) грозových разрядах.

В литературе и нормативной документации для оценки состояния ЗУ обычно используется понятие сопротивления растеканию, или просто сопротивления ЗУ. Смысл понятия сопротивления растеканию с точки зрения ЭМС очень прост. Рассмотрим, например, кабель связи, соединяющий рассматриваемый объект с удаленным узлом связи. При коротком

замыкании с возвратом тока в энергосистему к кабелю будет приложен потенциал, близкий к произведению сопротивления растеканию на ток КЗ. Согласно ПУЭ, этот потенциал может достигать 5–10 кВ.

Не меньшее значение имеют перепады потенциала в пределах единого ЗУ. Ясно, что перепады потенциалов в пределах ЗУ будут воздействовать на кабели управления и сигнализации, проходящие по территории объекта. Для характеристики перепадов потенциала в пределах ЗУ традиционно используются понятия напряжения шага и напряжения прикосновения. Эти понятия введены из соображений электробезопасности персонала и не учитывают специфики ЭМС.

На практике часто используется метод, заключающийся в прогрузке током от генератора аппаратов и конструкций, присоединенных к ЗУ объекта. Второй полюс источника присоединяется к некоторой опорной точке в пределах ЗУ. Обычно в качестве такой точки выбирается нейтраль одного из трансформаторов. В этом случае можно говорить, что моделируется КЗ в пределах объекта с возвратом тока к нейтрали собственного трансформатора. Измеряется потенциал прогружаемого аппарата (конструкции) относительно удаленной земли. Частное от деления потенциала на ток называют сопротивлением основания аппарата (конструкции).

Легко понять, что при измерениях сопротивлений растеканию и сопротивлений оснований имитируются два предельных случая коротких замыканий: а) с полным возвратом тока в систему и б) с полным возвратом тока к нейтрали одного из собственных трансформаторов объекта.

В таблице приводится фрагмент результатов измерений сопротивлений оснований на подстанции КС-220 Смоленскэнерго. В качестве нормы сопротивления основания выбрано значение 0,1 Ом.

Таблица. Результаты измерения сопротивлений оснований на ПС КС-220

Точка измерения	Ток I, А	Напр-е относительно РЩ Урщ, В	Напр-е относительно зонда Uзонд, В	Сопротивление основания Rосн, Ом	Аварийный потенциал Uав, В
Портал 4 2СШ	8	50,00	50,00	6,25	62500
Длинный концевой портал	74	3,80	3,20	0,04	513
ШР-110 №2 ВЛ-154	72	4,20	4,20	0,06	583
ШР-110 №1 ВЛ-154 ф.А	70	6,20	5,80	0,08	885
Портал 4 1 СШ	73	4,20	3,80	0,05	575
ШР-110 №1 ВЛ-154 ф.В	3	50,00	50,00	16,67	до 110 кВ
ШР-110 №1 ВЛ-154 ф.С	70	6,00	5,80	0,08	857

Значение сопротивления растеканию: $R = 0,21 \text{ Ом}$

Из таблицы видно, что некоторые электроаппараты и конструкции имеют повышенное сопротивление основания, что свидетельствует об их неудовлетворительной связи с ЗУ объекта. Потенциалы таких аппаратов (конструкций) относительно релейного щита, куда подходит большая часть вторичных кабелей, могут составлять десятки и даже сотни кВ (см. предпоследнюю строку таблицы). Отметим, что в то же время сопротивление растеканию ЗУ невелико. Аналогичная картина наблюдается и на большинстве других обследованных энергообъектов.

Основной причиной подобных недостатков является коррозия заземлителей, приводящая к уменьшению их эффективного поперечного сечения и даже полному разрыву отдельных металлических связей. Свою лепту вносят также некачественная сварка и недостатки проекта

Расчетное определение потенциалов на элементах ЗУ требует учета ряда факторов:

- влияния неравномерности распределения потенциала по ЗУ на величины токов, стекающих с его элементов,
- активной и реактивной составляющих импедансов отдельных заземлителей,
- влияния поля провода с током КЗ на распределение токов в элементах ЗУ,
- реальной схемы ЗУ,
- реальных сечений заземлителей,
- реальных параметров почвы с учетом сезонных изменений,

– при грозовом разряде нужно использовать аппарат гармонического анализа и учитывать нелинейность характеристик грунта.

Результаты пробных расчетов показывают, что учет перечисленных факторов позволяет обеспечить приемлемую точность определения потенциалов. Относительно правдоподобная информация о сечениях заземлителей имеется лишь для новых объектов, где влияние коррозии еще незначительно. Известны, однако, случаи повышения сопротивлений оснований из-за некачественной сварки. Поэтому даже для новых объектов проведение натуральных измерений необходимо.

4. Помехи при грозовых разрядах.

Существующие методы оценки потенциалов на элементах ЗУ и помех во вторичных кабелях носят приближенный характер. Так, использование специальных генераторов импульсов для имитации грозовых разрядов неточно из-за влияния поля провода с током на распределение тока в земле и заземлителях. Ограничения расчетных методов рассмотрены выше. Поэтому до последнего времени при оценке грозозащиты в основном проверялось выполнение требований существующей нормативной документации (см. например [2]), основанных на эмпирических данных и расчетах. Обследование энергообъектов показывает, что часто имеют место грубые нарушения существующих

требований. Например, расстояние от элементов грозозащиты до кабельных каналов часто составляет менее 1 м, причем в некоторых случаях молниеотводы заземляются прямо на металлоконструкции кабельных каналов.

5. Импульсные помехи при коммутациях силового электрооборудования.

Результаты измерений показывают, что наиболее опасным источником коммутационных помех на энергообъектах является работа разъединителей. Примерный вид помехи при работе разъединителя показан на рисунке.

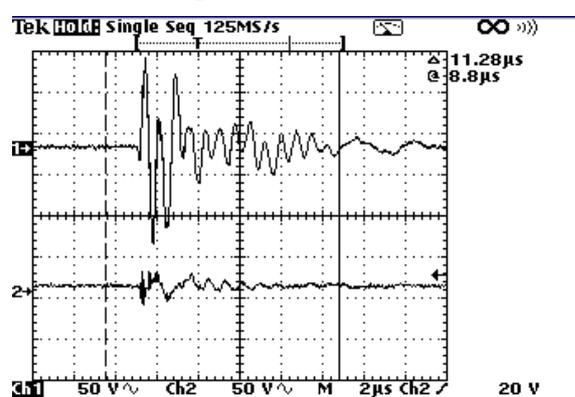


Рисунок. Помеха при работе разъединителя: масштаб по амплитуде – 50 В/дел., развертка – 2 мкс/дел.

Для измерения импульсных помех при работе разъединителей использовался осциллограф с максимальной частотой дискретизации 1 ГГц. Это обеспечило хорошую повторяемость результатов при многократных коммутациях одного и того же разъединителя. При использовании низкочастотных осциллографов наблюдается разброс результатов по причине потери отдельных максимумов кривой.

Максимальные зафиксированные уровни помех при работе разъединителей составляют более 5 кВ. Типичные значения намного меньше – порядка нескольких сотен В. Частоты – от сотен кГц до десятков МГц.

6. Импульсные помехи при работе электромеханических устройств.

В процессе измерения коммутационных помех от разъединителей были зафиксированы импульсные помехи при срабатывании электромеханических устройств типа реле, контакторов, приводов выключателей и т.п. Из-за своего высокочастотного характера (сотни МГц), такие помехи легко проникают через индуктивные и емкостные связи. Поэтому их можно обнаружить практически в любых цепях, включая цепи межмашинного обмена цифровой информацией. Амплитуда таких помех сравнительно невысока (сотни вольт), однако сама возможность появления заметных помех в коротких цепях, проходящих внутри помещений, вызывает определенные опасения.

7. Низкочастотные электрические и магнитные поля от силового электрооборудования.

Обычно силовое электрооборудование создает помехи на промышленной частоте и ее гармониках. Исключением можно считать работу мощных полупроводниковых выпрямительных и преобразовательных устройств, создающих также и высокочастотные помехи.

Обычно низкочастотные электрические и магнитные поля не представляют серьезной угрозы для микропроцессорной аппаратуры. Исключением являются, пожалуй, лишь экраны на базе ЭЛТ. Кроме того, есть данные о негативном влиянии таких полей на здоровье персонала [3].

Для измерения полей при нормальной работе объекта могут использоваться существующие приборы (например, ИПМ, ИПЭ). Поля при КЗ определяются расчетным путем. При этом рекомендуется учитывать искажение поля за счет влияния земли с учетом конечной проводимости последней.

Остальные помехи, упомянутые в пункте 2, не являются специфическими для энергообъектов. Методы их контроля хорошо известны и потому здесь не рассматриваются.

Разумеется, оценка ЭМО не является самоцелью. Полученные данные служат основой для разработки защитных мероприятий. Однако эти вопросы выходят за рамки настоящей статьи.

Выводы.

Для оценки электромагнитной обстановки на энергообъектах следует, в первую очередь, применять методы, основанные на натуральных измерениях. Эффективное использование расчетных методов для уже существующих объектов требует зна-

ния геометрии ЗУ и эффективных поперечных сечений заземлителей. Определение реальной схемы ЗУ, в принципе, возможно. Однако определение эффективных поперечных сечений заземлителей без масштабного вскрытия грунта пока недоступно. Для своевременного отслеживания изменений ЭМО необходимо проведение периодического контроля ЭМО на объектах (раз в 3—5 лет) и внеочередного — при реконструкциях.

Литература

1. Guide on EMC in Power Plants and Substations. CIGRE Publ. 124, 1997
2. РД 34.20.116-93 «Методические указания по защите вторичных цепей электрических станций и подстанций от импульсных помех», готовится новая редакция. М.: РАО «ЕЭС России»
3. Электромагнитное загрязнение окружающей среды и здоровье населения России. М.: «Российская ассоциация общественного здоровья», 1997.

Л. М. ГОРШУНОВ, К. Н. ДАНИЛЕНКО, В. Н. САРЫЛОВ

Государственное унитарное предприятие научно-исследовательский институт импульсной техники

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Abstract: The problems of providing of electromagnetic compatibility and functional safety for safety-related systems of Nuclear Power Plants are discussed in present paper

Анализ инцидентов на действующих атомных станциях показал, что недостаточное внимание к проблеме обеспечения электромагнитной совместимости может привести к отказам оборудования по общей причине, способствуя тем самым несанкционированным остановам или разгрузкам энергоблоков атомных станций (АС).

Электромагнитные воздействия природного и техногенного характера могут оказывать негативное влияние на функциональную безопасность управляющих систем безопасности (УСБ) и приводить к опасным последствиям:

- недостаточная помехоустойчивость систем регулирования возбуждения элект-

рогенераторов приводит к колебаниям электрической мощности энергоблоков АС до 150 МВт, приближаясь к аварийным уставкам, при производстве регламентных переключений разъединителей на ОРУ;

- недостаточная помехоустойчивость оборудования противоаварийной автоматики может способствовать отключению энергоблоков АС от энергосистемы при однофазных замыканиях на «землю»;

- недостаточная помехоустойчивость систем контроля нейтронного потока к магнитным полям в соседних кабелях может приводить к искажению реальной картины распределения энерговыделения в активной зоне реактора или запаса реак-

тивности поглотителей нейтронов, что приводит к дезинформации оператора и его неадекватным действиям;

- недостаточная помехоустойчивость оборудования управляющих систем безопасности (УСБ) к воздействию излучений, создаваемых устройствами радиосвязи, или к грозовым разрядам приводит к ложным формированиям сигналов аварийной защиты или сигналов на извлечение поглотителей нейтронов из активной зоны ядерных реакторов.

В связи с этим обеспечению электромагнитной совместимости оборудования, изделий и технологий (ОИТ) для ядерных установок, радиационных источников и пунктов хранения следует уделять большое внимание.

На этапах создания и всего жизненного цикла ОИТ должны выполняться требования обеспечения функциональной безопасности: нарушение функций ОИТ в условиях обеспечения регламентируемых требований обеспечения безопасности ядерных установок и атомных станций.

На этапах сертификации испытания ОИТ следует проводить в различных рабочих и аварийных режимах для выявления возможных отказов, нарушающих функциональную безопасность ОИТ:

- «отказов на требование» - невыполнению требуемых действий при возникновении необходимости в них (например, отказ на ввод поглотителей нейтронов в активную зону ядерного реактора при возникновении аварийной ситуации);

- «отказов, сопровождаемых несанкционированными действиями» - выполнению операций, которые не должны выполняться в данный момент (например, несанкционированное извлечение поглотителей нейтронов из активной зоны ядерного реактора);

- «отказов, сопровождаемых нарушениями нормального функционирования» - отклонениями от нормального выполнения операций (например, отказ процесса разгрузки энергоблока или снижения мощности ядерного реактора).

1. Этапы создания и жизненного цикла ОИТ

1.1. Функциональная безопасность

При рассмотрении вопросов электромагнитной совместимости и функциональной безопасности в процессе разработки, проектирования и эксплуатации оборудования для ядерно-опасных объектов основной задачей является оценка возможных последствий, вносящих вклад в общий риск при электромагнитных воздействиях и осуществление разработки, изготовления, монтажа и наладки оборудования «для АЭС» таким образом, чтобы исключить вклад этих явлений (или, хотя бы, свести его к допустимому) в общий риск.

Для обеспечения функциональной безопасности необходимо уделять внимание проблеме обеспечения электромагнитной совместимости на всех стадиях жизненного цикла оборудования, выпускаемого для ядерно-опасных объектов: от его разработки до вывода из эксплуатации

Алгоритм достижения функциональной безопасности оборудования УСБ по требованиям электромагнитной совместимости должен заключаться в следующем:

- Постулирование недопустимых для безопасности АС событий (отказ на требование; отказ, сопровождаемый несанкционированными действиями; отказ, сопровождаемый нарушением нормального функционирования).

- Оценка электромагнитной обстановки в местах размещения УСБ и формирование требований устойчивости к электромагнитным воздействиям с учетом назначения и влияния УСБ на безопасность АС.

- Использование технических средств и мер для предотвращения проникновения и распространения электромагнитных воздействий: снижение риска в процессе разработки и проектирования УСБ.

К таким средствам и мерам относятся: технические средства и меры защиты, такие как разрядники, экранирование, заземление, фильтрация, методы прокладки

электрических цепей, конструирование печатных плат, использование готовых узлов со знаком СЕ, использование карт проверки, использование компьютерных средств проектирования;

- разработка структуры технических средств, позволяющей снизить вероятность опасных отказов, вызванных электромагнитными воздействиями (например, дублирование с избыточностью, выполненное с использованием различных принципов или технологий);

- разработка программного обеспечения, позволяющего снизить вероятность опасных отказов, вызванных электромагнитными воздействиями;

- анализ надежности (например, анализ дерева отказов) в части нарушений функционирования, вызванных электромагнитными воздействиями;

- отказ от использования компонентов и схем с заведомо повышенной восприимчивостью к электромагнитным воздействиям;

- проведение экспертизы схемных и проектных решений в части обеспечения электромагнитной совместимости;

- проведение периодических заводских испытаний компонентов, разработанных схем и изготовленных узлов и блоков на соответствие требованиям обеспечения электромагнитной совместимости и функциональной безопасности, регламентированным российскими и международными стандартами.

1.2. Программа обеспечения качества

Система качества должна предусматривать обязательное использование процедур создания изделий и контроля обеспечения электромагнитной совместимости на этапах создания изделий:

- Внедрение процедур, обеспечивающих поставку компонентов и их монтаж в строгом соответствии со спецификацией и схемами.

- Использование процедур контроля качества изготовления узлов и схем.

- Проведение заводских испытаний узлов и схем по требованиям электромаг-

нитной совместимости, разработка корректирующих мероприятий и доработка узлов и схем.

1.3 Системное проектирование

В процессе проектирования должны предусматриваться мероприятия:

- Определение групп исполнения помещений размещения систем, влияющих на безопасность, в зависимости от назначения и влияния на безопасность используемого оборудования.

- Минимизация длины кабелей и оптимизация внутренних связей комплектующего оборудования.

- Назначение типов помехозащищенных кабелей и соединителей, а также способов их заделки.

- Физическое разделение силовых и слаботочных кабелей, разделение трасс кабелей питания.

- назначение ограничений на физическое размещение оборудования УСБ по отношению к другому оборудованию.

- Назначение требований к параметрам сети электропитания (высшие гармоники, частота, динамические изменения).

- Назначение требований к заземлению и экранированию оборудования УСБ.

- Измерение параметров электромагнитной обстановки.

- испытания представительных образцов ОИТ в составе систем УСБ по требованиям электромагнитной совместимости и функциональной безопасности.

1.4. Анализ влияния на безопасность

Анализ влияния на безопасность АС заключается в:

- Анализе надежности функционирования оборудования УСБ.

- Оценке корректности реализации требований функциональной безопасности.

- Проведении испытаний УСБ на устойчивость к регламентированным электромагнитным воздействиям.

- Проведении испытаний УСБ на устойчивость к завышенным значениям электромагнитных воздействий для опре-

деления оперативного запаса по устойчивости.

- Проведении количественной оценки частоты отказов оборудования УСБ.

- Анализе влияния отказов по фактору электромагнитной совместимости на безопасность АС.

1.5. Эксплуатация сложных систем

Известно, что устойчивость электронных компонентов и узлов к электромагнитным воздействиям резко снижается при их старении как в процессе длительной эксплуатации, так и при длительном хранении. В связи с этим, для поддержания электромагнитной совместимости на заданном уровне рекомендуется:

- Вводить ограничения на использование технических средств, которые могут привести к нарушениям функциональной безопасности УСБ (например, мобильные средства радиосвязи).

- Соблюдать предписанные методы замены компонентов и узлов схем при восстановительном ремонте оборудования во избежание ухудшения помехоустойчивости УСБ.

- Производить периодическую замену компонентов, узлов или блоков с ухудшенными характеристиками устойчивости к электромагнитным воздействиям.

- Проводить испытания оборудования УСБ на устойчивость к электромагнитным воздействиям при регламентных ремонтных работах не реже 1 раза в 2 года.

- Проводить испытания оборудования УСБ на устойчивость к регламентированным электромагнитным воздействиям после модернизации, усовершенствования, реконструкции, расконсервации и длительного хранения для оценки ресурсных характеристик оборудования АС.

2. Этапы сертификации

С учетом этапа 1 собственно процесс получения сертификата соответствия ОИТ требованиям электромагнитной совместимости и функциональной безопасности состоит из:

- разработки технической документации на ОИТ с учетом обеспечения требо-

ваний по ЭМС и функциональной безопасности;

- проведения в процессе разработки и изготовления ОИТ исследований и заводских испытаний, подтверждающих обеспечение требований нормативной документации по ЭМС и функциональной безопасности;

- проведения сертификационных испытаний ОИТ в аккредитованных испытательных центрах в установленном в Системе сертификации ОИТ порядке в соответствии с действующими российскими и международными стандартами, методиками и процедурами для подтверждения соответствия характеристик ОИТ требованиям, предъявляемым к оборудованию для АЭС и других ядерных установок с выпуском протоколов испытаний;

- предъявления на экспертизу в Орган по сертификации ОИТ, или по его представлению в сертификационный экспертный центр, протоколов испытаний и технической документации на ОИТ для принятия решения и выдаче сертификата соответствия и лицензии на применение знака соответствия ОИТ;

- инспекционного контроля в процессе производства ОИТ для подтверждения действия сертификата соответствия или продления срока его действия.

При экспертизе документов и результатов испытаний анализируется соответствие сертифицируемых ОИТ установленным требованиям обеспечения электромагнитной совместимости и влияние ОИТ на безопасность ядерных установок, радиационных источников и пунктов хранения.

По результатам проведенной экспертизы СЭЦ по поручению ОС принимает участие в разработке корректирующих мероприятий по доработке ОИТ и контролирует их выполнение с последующей экспертизой результатов доработки по обеспечению соответствия ОИТ установленным требованиям ЭМС и влияния на безопасность ядерных установок.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ Э.Д.С ОСНОВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Abstract. The article deals with voltage spectral characteristics in electric circuits of basic components and devices as EMI sources. The classification and functional depends of output EMF spectrum envelopes are given.

Острота проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС), как возможности совместного функционирования в реальных условиях эксплуатации мощного силового электрооборудования и маломощных систем управления и автоматики автоматизированных электроприводов (АЭП), по мере развития их элементной базы остается в области повышенного внимания. Это связано со следующими тенденциями:

значительно возрос уровень электромагнитных помех (ЭМП) вследствие энергонасыщенности производственных процессов. Установленная мощность силовой части электропривода в районе расположения его элементов, как возможных рецепторов электромагнитных помех, увеличилась до $5 \cdot 10^7$ Вт;

В то же время огромные темпы технологического прогресса привели к появлению новых типов устройств, изменению элементной базы, миниатюризации электронных компонентов. Мощность сигналов управления элементами АЭП уменьшилась до 10^{-10} Вт. Но снижение мощностей сигналов управления острее отразилось на электромагнитной совместимости. Соотношение мощностей силовых цепей и цепей информационных каналов достигло уровня $5 \cdot 10^{17}$. Уровни непреднамеренных электромагнитных помех стали оказываться соизмеримыми с полезными сигналами и вызывать изменения статических и динамических характеристик отдельных элементов и всей системы управления, а в

ряде случаев приводить к ее полной неработоспособности.

Основными задачами, подлежащими разрешению при обеспечении ЭМС АЭП являются:

Определение наиболее опасных видов внешних помех, путей их проникновения;

Выбор или разработка приборов для измерения помех и восприимчивости;

Проведение статистических экспериментальных исследований электромагнитной обстановки на типовых объектах;

Разработка эффективных и экономичных способов обеспечения ЭМС.

Выполнение требований по ЭМС обусловливается следующими положениями:

- все электромагнитные помехи объясняются основными законами физики. ЭМП всегда порождаются в электрических цепях;

- реальная задача по снижению взаимных влияний в системах автоматизированного электропривода заключается в уменьшении сотен возможных комбинаций ЭМП до поддающегося контролю числа;

- даже при хороших проектировании и монтаже системы ЭМП, как исключение из правил, могут все-таки проявляться;

- от влияния ЭМП легко избавиться, если найти их основную причину;

- соблюдение требований ЭМС при проектировании систем часто зависит от того, учтены ли причины и источники помех, которые могут возникнуть позднее. Бывает, что одни и те же методы, используемые для учета ЭМС, хороши для одно-

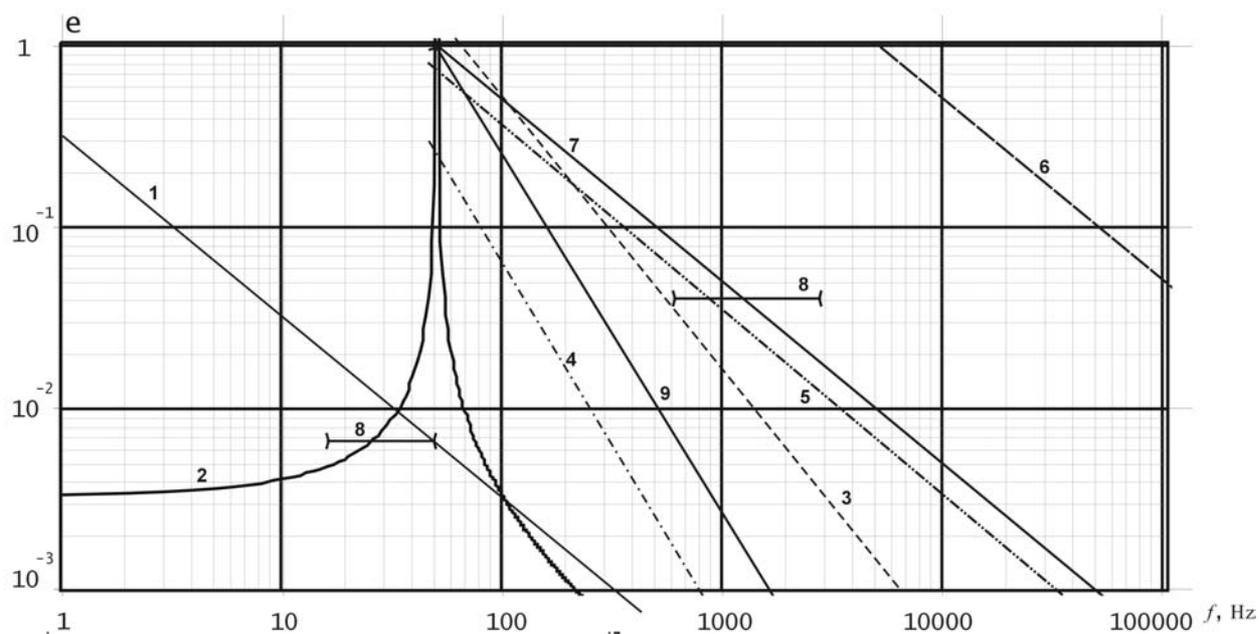
го проекта и совершенно неприемлемы для другого;

ЭМС включает в себе элемент вероятности. Каждая система и ее местоположение отличаются друг от друга. Важно не заблуждаться относительно применения одних и тех же методов учета ЭМС в разных местах установки системы.

При недостаточном внимании на ЭМС в период проектирования, приходится за-

ниматься этой проблемой во время монтажа и наладки, что приводит к существенному ограничению параметров, или к ужесточению режимов работы.

При решении проблем ЭМС в первую очередь следует обратить внимание на возможные источники электромагнитных помех в АЭП



Аппроксимированные огибающие спектров ЭДС на выходе источников ЭМП автоматизированного электропривода.

1 - импульс постоянной ЭДС; 2 - импульс переменной ЭДС; 3 - широтно-импульсные преобразователи постоянного тока; 4 - неуправляемые вентильные преобразователи; 5 - управляемые вентильные преобразователи; 6 - преобразователи частоты с широтно-импульсной модуляцией; 7 - преобразователи частоты с непосредственной связью; 8 - электрические машины постоянного тока; 9 - электрические машины переменного тока.

Так, анализ спектральных характеристик выходных ЭДС основных элементов АЭП, как возможных источников ЭМП, позволяет выделить из их числа три группы:

Источники ЭМП с непрерывным спектром выходных ЭДС;

Источники с дискретным спектром гармонических помех, спектр выходных ЭДС которых неизменен по частоте, а относительный уровень гармоник либо постоянен, либо однозначно определяется режимом работы самого источника;

Источники гармонических помех, спектр выходных ЭДС которых меняется

по частоте и по амплитуде в зависимости от режимов работы источника.

Указанные группы источников ЭМП неравнозначны как по уровню спектра выходной ЭДС в различном частотном диапазоне, так и степени влияния создаваемых ими помех на работу схем управления электроприводом.

При обеспечении ЭМС элементов и систем управления электропривода целесообразно исходить из условия, что каждый элемент или устройство как источник ЭМП работает в наихудшем с позиций генерирования помех режиме. Тогда ожидаемый уровень ЭМП в схемах управле-

ния электроприводом будет максимально возможным, а принятые меры по обеспечению ЭМС в указанных условиях будут гарантией работоспособности электропривода в любых его эксплуатационных режимах. Учитывая это, реальные спектральные характеристики выходных ЭДС всех групп источников ЭМП целесообразно аппроксимировать по максимальному уровню спектров. Огибающие спектров могут иметь более простые аналити-

ческие соотношения, определяющие зависимость относительного уровня помех от частоты.

Подобная аппроксимация спектров выходных ЭДС основных элементов АЭП позволяет сосредоточить основное внимание на область частот ЭМП до 10^5 Гц и аргументировать последовательность воздействий при обеспечении ЭМС элементов АЭП.

Литература

1. Мацин И.П. Исследование и обеспечение внутрисистемной электромагнитной совместимости вентильного электропривода прокатных станов. – Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. – Челябинск, 1987.
2. Д.Р.Ж. Уайт. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. М.: «Сов.Радио», 1977.
3. Хабигер Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике. М.: Энергоатомиздат, 1995.
4. Бадалов А.Л., Михайлов А.С. Нормы на параметры электромагнитной совместимости РЭС: Справочник.-М.: Радио и связь, 1990.