

КРИТЕРИИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ШИНОПРОВОДОВ

В. М. Иванов¹, А. В. Лановая², А. В. Кобелев¹, А. Н. Кагдин¹

*Кафедра «Электроэнергетика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия (1);
кафедра «Математика и информатика», ЧОУВО «Московский университет
имени С. Ю. Витте», г. Москва (2), Россия; IVM-tstu@mail.ru*

Ключевые слова: долговечность шинопроводов; критическая плотность тока; термическая диффузия; уравнение Пуассона; электродинамические усилия.

Аннотация: Предложены критерии надежности шинопроводов, работающих в условиях повышенной концентрации электромагнитного поля. Показано, что как механический, так и тепловой критерии определяют механизмы разрушения проводников и связаны с параметрами тока.

Механический критерий. При взаимодействии тока с магнитным полем возникают электродинамические усилия $\sigma = j_0 H_0$, где j_0 – плотность тока, А/м²; H_0 – напряженность магнитного поля, А/м, действующие на кромку криволинейной неоднородности. Согласно экспериментам по электромагнитному моделированию, плотность тока на кромке увеличивается пропорционально токовой интенсивности и его максимальное значение зависит от формы геометрической неоднородности [1]. Значения токовой интенсивности определяют коэффициенты усиления плотности тока в данной локальной области по сравнению с плотностью тока вдали отверстия $j = I/hb$, где I – сила тока, А; b , h – ширина и толщина пластины соответственно, м.

Напряженность магнитного поля на кромке неоднородности оценим из уравнения Пуассона для векторного потенциала A , определяя сначала индукцию B магнитного поля тока

$$\nabla^2 A = -\mu_0 \mu \sigma E, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; μ – относительная магнитная проницаемость; E – напряженность электрического поля, В/м.

Дифференциальное уравнение (1) для плоской пластины решается в цилиндрических координатах, где переменной является радиус кривизны r геометрической неоднородности

$$\frac{d^2 A}{dr^2} = -\mu_0 \mu \sigma \frac{k}{r}, \quad (2)$$

где k – коэффициент токовой интенсивности.

Обозначим при этом $\mu_0\mu\sigma k = c$, тогда уравнение Пуассона примет вид

$$\frac{d^2 A}{dr^2} + c \frac{1}{r} = 0. \quad (3)$$

При граничных условиях, $r \rightarrow \infty$, $A = 0$ и $r = R$, $\operatorname{div} A = 0$ получим

$$A = \frac{\mu_0\mu\sigma k}{R} r. \quad (4)$$

Для нахождения индукции B возьмем операцию ротора над векторным потенциалом A по координате z , ортогональной плоскости проводника

$$\operatorname{rot}_z A = -\frac{1}{r} \frac{dA}{d\varphi} = B \quad (5)$$

и принимая во внимание (4), окончательно получим

$$B = \frac{\mu_0\mu I}{\pi R}. \quad (6)$$

Тогда напряженность поля на кромке геометрической неоднородности с радиусом кривизны R равна

$$H_0 = \frac{B}{\mu_0\mu} = \frac{I}{\pi R}. \quad (7)$$

Учитывая выражение (7), найдем напряжения деформирования

$$\sigma = \frac{0,64 I^2}{R h b}. \quad (8)$$

Примем за критерий разрушения стенок геометрической неоднородности достижение напряжения σ до предела текучести материала σ_T . Тогда критическое значение плотности тока, при котором начинается разрушение по электродинамическому механизму, определяется по формуле

$$j_{\text{кр}} = 1,25 \sqrt{\frac{\sigma_T R}{h b}}. \quad (9)$$

Например, для медной пластины шириной $b = 10^{-1}$ м и толщиной $h = 10^{-3}$ м с отверстием радиуса $R = 0,5 \cdot 10^{-2}$ м и $\sigma_T = 2,5 \cdot 10^8$ Па критическое значение плотности тока $j_{\text{кр}} = 1,4 \cdot 10^7$ А/м² [2].

Тепловой критерий. Вероятный процесс разрушения в зоне геометрических неоднородностей с изменяющимся радиусом кривизны был рассмотрен по электродинамическому механизму, то есть взаимодействию протекающего тока и собственного магнитного поля, а критерием разрушения проводника принимали электродинамические напряжения, сравнимые с пределом текучести металла.

Кроме чисто механического воздействия на кромки неоднородностей ток, обтекая их, неравномерно нагревает их стенки из-за неравномерной токовой интенсивности вокруг области. Возникает неоднородное температурное поле, линии изотерм которого выражаются зависимостью [3]

$$T = \frac{\sigma E^2}{\rho C} t, \quad (10)$$

где ρ , C – удельные плотность, кг/м³ и теплоемкость, Дж/кг-град соответственно; t – время, соизмеримое с характерным временем термической диффузии, с

$$\tau = \frac{R^2}{\chi},$$

где χ – коэффициент температуропроводности.

При выполнении условия $t \leq \tau$ процесс изменения температуры можно считать адиабатическим, а температуру в окрестности геометрической неоднородности определить через протекающий ток

$$T = \frac{I}{h^2 \sigma \rho C r^2} t. \quad (11)$$

При отсутствии термической диффузии на пороге значений при $t = \tau$ температура вычисляем по формуле

$$T = \frac{I^2 R^2}{h^2 \sigma \rho C \chi r^2}. \quad (12)$$

В этом случае критическая плотность тока, достаточная для плавления стенок геометрических неоднородностей, определяется из последнего выражения (при $r = R$ и $T = T_{\text{пл}}$) следующим образом

$$j_{\text{кр}} = \frac{1}{b} \sqrt{T_{\text{пл}} \sigma \rho C \chi}. \quad (13)$$

Например, для той же медной пластины с отверстием того же радиуса и при значениях физических констант: $T_{\text{пл}} = 1083$ °C; $\rho = 8930$ кг/м³; $\sigma = 0,59 \cdot 10^8$ См/м; $C = 24,5$ Дж/моль·град; $\chi = 7 \cdot 10^{-5}$ м²/с

По формуле (13) получим значение плотности тока, при которой наступает начало плавления кромки отверстия $j_{\text{кр}} = 10^8$ А/м² [4]. Сравнивая критические плотности тока по механическому и тепловому механизмам разрушения медной пластины с отверстием, получим семикратное превышение параметров тока при тепловом разрушении по сравнению с электродинамическим. В действительности добиться бездиффузионного, токового теплового нагрева проводника довольно сложно из-за отличной теплопроводности материала проводника, и условие нагрева без тепловой диффузии практически выполнимо при очень коротких импульсах тока. При этом его амплитуда должна на несколько порядков быть выше средней по проводнику. Такие жесткие режимы возможны при несимметричных коротких замыканиях и ударах молнии. В других рабочих режимах и в режимах коммутаций следует, прежде всего, проверять проводники на прочность по механическому критерию разрушения.

На практике в процессе эксплуатации токоведущих шин с изменяющейся геометрией распределение плотности тока неравномерное. Понятие токовой интенсивности учитывает данное неравномерное распределение и является коэффициентом усиления средней плотности тока по проводнику. Поэтому, зная наибольшую токовую интенсивность на различных геометрических неоднородностях и критические значения плотности тока при различных видах разрушения, можно оценить надежность и долговечность шинопроводов с точки зрения сохранения их сплошности.

Список литературы

1. Иванов, В. М. Управление разрушением плоских проводников электромагнитным полем / В. М. Иванов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2003. – Т. 8, № 4. – С. 689–690.

2. Разрушение дефектных проводников с током в магнитном поле / А. В. Лановая [и др.] // Изв. РАН. Сер. : Физ. – 2008. – Т. 72, № 9. – С. 1341 – 1343.

3. Механизмы разрушения проводника с трещиной электромагнитным полем / В. М. Иванов [и др.] // Тез. докл. IV Евраз. науч.-практ. конф. «Прочность неоднородных структур», 8 – 10 апр. – М., 2008. – С. 35.

4. О концентрации энергии на отверстиях в плоском проводнике с током / А. В. Иванова [и др.] // Вестн. Тамб. университета. Сер. : Естеств. и техн. науки. – 2000. – Т. 5, № 2–3. – С. 328 – 330.

Reliability Criteria for Busbars against Electromagnetic Destruction

V. M. Ivanov¹, A. V. Lanovaya², A. V. Kobelev¹, A. N. Kagdin¹

*Department of Electrical Power Engineering, TSTU, Tambov, Russia (1);
Department of Mathematics and Informatics, Witte Moscow University, Moscow (2),
Russia; IVM-tstu@mail.ru*

Keywords: critical current density; durability of busbars; electrodynamic forces; Poisson's equation; thermal diffusion.

Abstract: The paper offers reliability criteria of for busbars, working in high concentration of electromagnetic field. Both mechanical and thermal criteria determine destruction mechanisms of conductors, and they are connected with the current parameters.

References

1. Ivanov V.M. [Control of destruction of flat conductors by the electromagnetic field], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2003, vol. 8, no. 4, pp. 689-690. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Lanovaya A.V., Ivanov V.M., Lozenkov A.A., Pluzhnikova T.N. [Destruction of defective conductors with a current in a magnetic field], *Izvestiya RAN. Ser. : Fizicheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences : Physics], 2008, vol. 72, no. 9, pp. 1341-1343. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Ivanov V.M., Lanovaya A.V., Lozenkov A.A., Pluzhnikova T.N. *Tez. dokl. IV Evraz. nauch.-prakt. konf. "Prochnost' neodnorodnykh struktur"* [Abstracts of the IV Eurasian scientific-practical conference "The strength of inhomogeneous structures"], 8-10 April, Moscow, 2008, P. 35. (In Russ.)

4. Ivanova A.V., Puchkov N.P., Ivanov V.M., Baryshev G.A. [Energy Concentration On The Hole In The Flat Conductor Under Power], *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya : Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Tambov University Reports. Series : Natural and Technical Sciences], 2000, vol. 5, no. 2–3, pp. 328-330. (In Russ., abstract in Eng.)

Kriterien der Sicherheit der elektromagnetischen Zerstörung der Schienenleitungen

Zusammenfassung: Es sind die Kriterien der Sicherheit der Schienenleitungen, die unter den Bedingungen der erhöhten Konzentration des elektromagnetischen Feldes funktionieren, angeboten. Es ist gezeigt, dass wie die mechanischen als auch die thermischen Kriterien die Mechanismen der Zerstörung der Leiter bestimmen und sie sind mit den Parametern des Stromes verbunden.

Critères de la fiabilité de la validation électromagnétique des canalisations

Résumé: Sont proposés les critères de la fiabilité des canalisations fonctionnant dans les conditions de la concentration élevée du champ électromagnétique. Est montré que les critères mécaniques et thermiques définissent les mécanismes de la destruction des conducteurs et sont liés à des paramètres du courant.

Авторы: *Иванов Владимир Михайлович* – кандидат физико-математических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; *Лановая Анна Владимировна* – кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой «Математика и информатика», ЧОУВО «Московский университет имени С. Ю. Витте», г. Москва, Россия; *Кобелев Александр Викторович* – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электроэнергетика»; *Кагдин Алексей Николаевич* – аспирант кафедры «Электроэнергетика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Федоров Виктор Александрович* – доктор физико-математических наук, профессор института математики, естествознания и информационных технологий, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», г. Тамбов, Россия.
