

Электротехника

УДК 681.3.06

ВЫБОР ДОПУСТИМЫХ РАССТОЯНИЙ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ПО МАГНИТНЫМ ПОЛЯМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ПРОВОДОВ В ОФИСНЫХ И ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

В.А. Беспалов, М.В. Смирнов, А.В. Салтыков, В.М. Салтыков

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

На основании предложенного метода расчета суммарных значений напряженностей магнитного поля от токов промышленной частоты в двухфазных проводах (кабелях) систем электроснабжения приведены выражения для определения допустимых расстояний до чувствительных к магнитным полям объектов с позиции обеспечения условий электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: система электроснабжения, напряженность магнитного поля промышленной частоты, электромагнитная совместимость.

Системы электроснабжения (СЭС) в силу разнообразия уровней напряжения, токов, конфигурации проводов и кабелей, способов прокладки, расстояний до чувствительных объектов являются источниками разнообразных электромагнитных полей, не только в значительной степени определяющих электромагнитную обстановку в офисных, жилых и производственных помещениях, но и приводящих к нарушению условий электромагнитной совместимости (ЭМС). Следует отметить, что в СЭС офисных и жилых помещений с напряжением 0,22...0,38 кВ напряженности электрического поля промышленной частоты E , В/м, как правило, не превышают нормируемых значений [1] как для персонала, так и для технических средств (ТС). При этом токи промышленной частоты в СЭС офисных и жилых помещений могут достигать 800 А, т. е. создавать значительные по уровням напряженности магнитного поля промышленной частоты, которые в офисных и жилых помещениях ограничиваются (нормируются) требованиями [2, 3].

Наиболее распространенными источниками напряженности магнитных полей промышленной частоты \dot{H} , А/м, в электрических сетях офисных и жилых помещений являются однофазные токи \dot{I}_ϕ двухжильных (А, N) проводов (кабелей).

Для расчета напряженностей магнитного поля вокруг однофазного провода (А, N) целесообразно использовать геометрическую модель, показанную на рис. 1.

В представленной на рис. 1 расчетной модели двухжильного провода в качестве контрольных принимаются точки i по окружности вектора $R_{0,i}$ от центральной точ-

Владимир Александрович Беспалов, аспирант.

Максим Викторович Смирнов, магистрант.

Александр Валентинович Салтыков (к.т.н.), доцент.

Валентин Михайлович Салтыков (д.т.н., проф.), профессор.

ки провода 0 , совмещенной с началом системы прямоугольных координат X, Y .

Напряженности магнитного поля \dot{H} , А/м, от жил проводов будем определять в плоскости, перпендикулярной вектору $R_{0,i}$, т. е. по касательной.

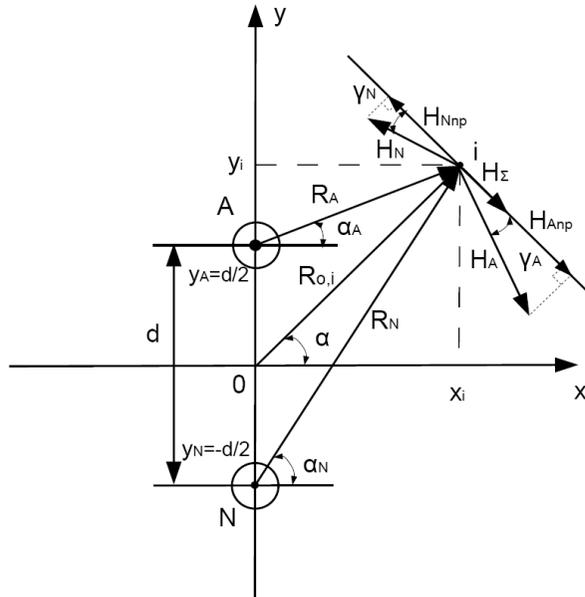


Рис. 1. Геометрическая модель для расчета напряженностей магнитного поля вокруг однофазного двухжильного провода (A, N)

Задаем расстояние d , м, между центрами токоведущих жил однофазного провода A (фаза) и N (нейтраль), а также задаем их координаты относительно центра прямоугольной системы.

В частности для расчетной геометрической модели координаты жил проводов определяются выражениями:

– для жилы A однофазного провода

$$X_A = 0; Y_A = \frac{d}{2}; \quad (1)$$

– для жилы N однофазного провода

$$X_N = 0; Y_N = -\frac{d}{2}. \quad (2)$$

Задаем координаты контрольной точки i , применяя выражения

$$X_i = R \cdot \cos \alpha; Y_i = R \cdot \sin \alpha, \quad (3)$$

где α – угол между положительным направлением оси X и вектором R .

Заданные координаты позволяют определять векторы R_A и R_N , т. е. расстояния от центров токоведущих жил фазного провода R_A и нулевого провода (нейтрали) R_N до контрольной точки окружающего пространства по выражениям:

$$R_{A,i} = \sqrt{(x_i - x_A)^2 + (y_i - y_A)^2}; \quad (4)$$

$$R_{N,i} = \sqrt{(x_i - x_N)^2 + (y_i - y_N)^2}. \quad (5)$$

При известных (измеренных) значениях тока I_A и I_N в проводах и полученных значениях расстояний от центров проводов $R_{A,i}$ и $R_{N,i}$ до контрольной точки на основании закона полного тока [4] определяются значения напряженности магнитного поля в контрольной точке от токов в проводах A и N :

$$\dot{H}_{A,i} = \frac{I_A}{2 \cdot \pi \cdot R_{A,i}}, \text{ А/м}; \quad (6)$$

$$\dot{H}_{N,i} = \frac{I_N}{2 \cdot \pi \cdot R_{N,i}}, \text{ А/м}. \quad (7)$$

Для последующего анализа целесообразным является приведение полученных значений напряженностей магнитного поля (6), (7) в плоскость касательной к вектору $R_{0,i}$ в виде проекций \dot{H}_{Anp} и \dot{H}_{Nnp} :

$$\dot{H}_A = \dot{H}_{Anp} = \dot{H}_{A,i} \cdot \cos \gamma_A; \quad (8)$$

$$\dot{H}_N = \dot{H}_{N,np} = \dot{H}_{N,i} \cdot \cos \gamma_N, \quad (9)$$

где $\gamma_A = (\alpha - \alpha_A)$ – угол между вектором напряженности магнитного поля \dot{H}_A и его проекцией на плоскость касательной вектора $R_{0,i}$; α – угол между вектором $R_{0,i}$ и положительным направлением оси X ; $\alpha_A = \arcsin \left[\frac{(y_i - y_A)}{R_{A,i}} \right]$ – угол между вектором $R_{A,i}$ (4) и положительным направлением оси X ; $\gamma_N = (\alpha - \alpha_N)$ – угол между вектором напряженности магнитного поля \dot{H}_N и его проекцией на плоскость касательной вектора $R_{0,i}$; $\alpha_N = \arcsin \left[\frac{(y_i - y_N)}{R_{N,i}} \right]$ – угол между вектором $R_{N,i}$ (5) и положительным направлением оси X .

Результирующее значение напряженности магнитного поля \dot{H}_Σ , А/м, в контрольной точке i окружающего пространства по окружности вектора $R_{0,i}$ от центральной точки провода 0 , совмещенной с началом системы прямоугольных координат X, Y , в плоскости, перпендикулярной вектору $R_{0,i}$, будет определяться по выражению

$$\dot{H}_\Sigma = \dot{H}_A + \dot{H}_N. \quad (10)$$

На основании представленных выражений была разработана методика расчета как значений напряженностей магнитного поля от отдельных проводов с током \dot{H}_A , \dot{H}_N , так и результирующих (суммарных) значений \dot{H}_Σ в окружающем пространстве (в контрольных точках).

С использованием выражений (6...10) были определены мгновенные значения напряженностей магнитного поля в контрольной точке i от тока в фазном проводе $A - \dot{H}_A$, от тока в нулевом проводе $N - \dot{H}_N$, а также их суммарные (результирующие

щие) значения \dot{H}_Σ по окружности от геометрического центра однофазного провода, которые на интервале периода промышленной частоты (0,02 с) показаны на рис. 2.

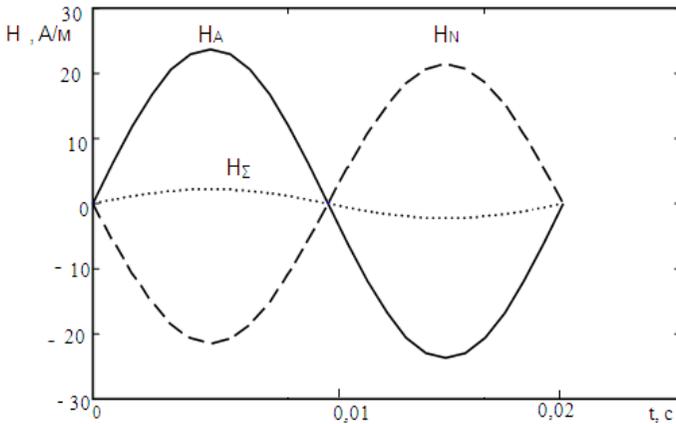


Рис. 2. Мгновенные значения напряженностей магнитного поля от тока $I_\Delta = 10 A$ двухжильного однофазного провода в контрольной точке i на расстоянии $R_{0,i} = 0,1 m$ от центральной точки провода θ (по оси y на рис. 1)

Из рис. 2 следует, что для синусоидального тока напряженности магнитного поля от жил провода и их суммарные мгновенные значения сохраняют синусоидальный характер.

На основании выражений (6...9) был выполнен расчет действующих значений суммарных напряженностей магнитного поля $H_{\Delta\Sigma}$ для ряда контрольных точек, удаленных в окружающем пространстве по окружности от центра провода. Для наглядности результаты расчетов представлены в виде круговой диаграммы. В частности, круговая диаграмма (в соответствии с геометрической моделью расположения двухжильного провода по осям координат прямоугольной системы, рис. 3) изменения действующих значений суммарной напряженности магнитного поля $H_{\Delta\Sigma}$, А/м, в окружающем пространстве вокруг однофазного двухжильного провода с током $I_\Delta = 10 A$, при $d = 0,01 m$, для расстояний $R_{0,i} = 0,1; 0,2; 0,3$ м показана на рис. 4.

Из рис. 4 следует, что наибольшие значения напряженности магнитного поля $H_{\Delta\Sigma}$, А/м, в пространстве вокруг однофазного двухжильного провода присутствуют в контрольных точках вдоль оси расположения жил провода (на рис. 4 – по оси X).

В итоге получено выражение для определения максимального действующего значения суммарной напряженности магнитного поля $H_{\Delta\Sigma \max}$, А/м, от однофазного двухжильного провода в окружающем пространстве с учетом: величины тока I_Δ , А; расстояния между контрольной точкой пространства и центром провода $R_{0,i}$, м; расстояния между жилами провода d , м, которое имеет следующий вид:

$$H_{\Delta\Sigma \max} = \frac{0,159 \cdot I_\Delta \cdot d}{R_{0,i}^2}, \text{ А/м.} \quad (11)$$

Выражение (11) можно также привести к общепринятому виду

$$H_{\partial\Sigma \max} = \frac{I_{\partial} \cdot d}{2 \cdot \pi \cdot R_{0,i}^2}, \text{ А/м.} \quad (12)$$

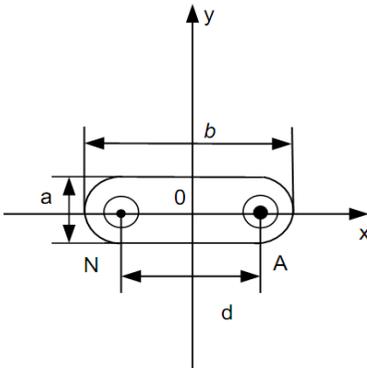


Рис. 3. Геометрическая модель расположения двухжильного провода по осям координат прямоугольной системы

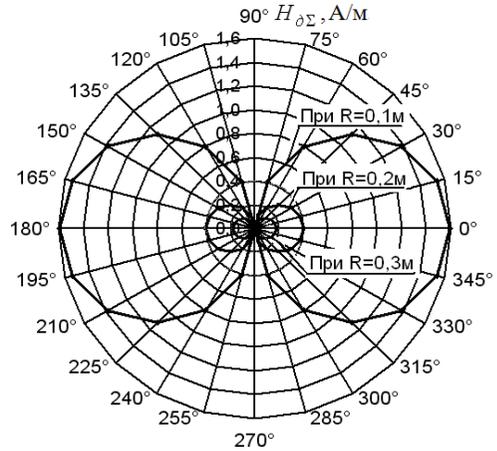


Рис. 4. Круговая диаграмма изменения действующих значений напряженности магнитного поля $H_{\partial\Sigma}$, А/м, в пространстве вокруг однофазного двухжильного провода с током $I_{\partial} = 10\text{А}$ на расстоянии $R = 0,1; 0,2; 0,3$ м до контрольной точки

Для большинства конструкций проводников систем электроснабжения, особенно выполненных в виде кабелей, при их прокладке трудно определить внутреннее расположение проводников (жил), что приводит к неопределенности значений создаваемых ими напряженностей магнитного поля промышленной частоты по отношению к заданным контрольным точкам в окружающем пространстве. В условиях неопределенности положения проводников с током (жил) в конструкциях проводов (кабелей) и неравномерного характера изменения напряженности магнитного поля вокруг них для последующего анализа значений напряженностей магнитного поля в окружающем пространстве представляется целесообразным использование методов теории вероятностей [5].

Получено, что независимо от места расположения контрольной точки i (от угла α относительно оси X) в окружающем пространстве в плоскости сечения однофазного двухжильного провода (A, N) для действующих значений суммарной напряженности магнитного поля промышленной частоты $H_{\partial\Sigma, 2\text{жс}}$, А/м, случайный характер их распределения подчиняется одностороннему закону арксинуса

$$w_{2\text{жс}}(H_{\partial\Sigma}) = \begin{cases} \frac{2}{\pi \cdot \sqrt{H_{\partial\Sigma, \max}^2 - H_{\partial\Sigma}^2}} & \text{при } 0 \leq H_{\partial\Sigma} \leq H_{\partial\Sigma, \max} \\ 0 & \text{при } H_{\partial\Sigma} > H_{\partial\Sigma, \max} \end{cases}, \quad (13)$$

а числовые характеристики распределения $H_{\partial\Sigma, 2\text{жс}}$ определяются выражениями:

– математическое ожидание:

$$m_{2\text{жс}}(H_{\partial\Sigma}) = \frac{2}{\pi} \cdot H_{\partial\Sigma, \max} = 0,637 \frac{I_{\partial} \cdot d}{2 \cdot \pi \cdot R_{0,i}^2}, \text{ А/м;} \quad (14)$$

– среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma_{2жс}(H_{\partial\Sigma}) = \sqrt{D(H_{\partial\Sigma})} = 0,308 \cdot H_{\partial\Sigma, \max} = 0,308 \frac{I_{\partial} \cdot d}{2 \cdot \pi \cdot R_{0,i}^2} \cdot \text{А/м}, \quad (15)$$

где I_{∂} – действующее значение тока, А; d – расстояния между жилами провода, м; $R_{0,i}$ – расстояния между контрольной точкой i пространства и центром провода 0 (см. рис. 1), м.

При этом с позиции выполнения условий электромагнитной совместимости (ЭМС) по принятым для офисных и жилых помещений нормируемым требованиям представляется целесообразным определять расстояния, при которых заданные условия будут выполняться.

В частности, при известных конструктивных характеристиках проводов (кабелей) допустимые расстояния $R_{0,i, \text{дон}}$, м, до контролируемого (нормируемого) объекта для обеспечения нормируемых значений напряженности магнитного поля промышленной частоты 50 Гц могут быть определены по аналитическим выражениям.

Для одиночных однофазных двухжильных (А, N) проводов (кабелей) – по выражениям:

1) для персонала офисных помещений при $H_{50\text{Гц}, \text{ОП}, \text{дон}} \leq 4 \text{ А/м}$, [2]:

– по максимальным значениям:

$$R_{0,i} \geq \sqrt{\frac{I_{\partial} \cdot d}{2 \cdot \pi \cdot H_{\partial\Sigma, \max, 2жс, \text{дон}} = 4 \text{ А/м}}} = 0,2\sqrt{I_{\partial} \cdot d} \text{ , м}; \quad (16)$$

– по значению математического ожидания:

$$R_{0,i} \geq \sqrt{\frac{0,637 \cdot I_{\partial} \cdot d}{2 \cdot \pi \cdot m_{2жс, \text{дон}}(H_{\partial\Sigma}) = 4 \text{ А/м}}} = 0,16\sqrt{I_{\partial} \cdot d} \text{ , м}; \quad (17)$$

2) для технических средств офисных помещений при $H_{50\text{Гц}, \text{ТС}, \text{дон}} \leq 3 \text{ А/м}$, [3]:

– по максимальным значениям:

$$R_{0,i} \geq \sqrt{\frac{I_{\partial} \cdot d}{2 \cdot \pi \cdot H_{\partial\Sigma, \max, 2жс, \text{дон}} = 3 \text{ А/м}}} = 0,23\sqrt{I_{\partial} \cdot d} \text{ , м}; \quad (18)$$

– по значению математического ожидания:

$$R_{0,i} \geq \sqrt{\frac{0,637 \cdot I_{\partial} \cdot d}{2 \cdot \pi \cdot m_{2жс, \text{дон}}(H_{\partial\Sigma}) = 3 \text{ А/м}}} = 0,18\sqrt{I_{\partial} \cdot d} \text{ , м}; \quad (19)$$

3) для электронно-лучевых трубок (ЭЛТ) ВДТ при $H_{50\text{Гц}, \text{ЭЛТ}, \text{дон}} \leq 1 \text{ А/м}$, [3]:

– по максимальным значениям:

$$R_{0,i} \geq \sqrt{\frac{I_{\partial} \cdot d}{2 \cdot \pi \cdot H_{\partial\Sigma, \max, 2жс, \text{дон}} = 1 \text{ А/м}}} = 0,4\sqrt{I_{\partial} \cdot d} \text{ , м}; \quad (20)$$

– по значению математического ожидания:

$$R_{0,i} \geq \sqrt{\frac{0,637 \cdot I_{\partial} \cdot d}{2 \cdot \pi \cdot m_{2жс, \text{дон}}(H_{\partial\Sigma}) = 1 \text{ А/м}}} = 0,32\sqrt{I_{\partial} \cdot d} \text{ , м}. \quad (21)$$

Для ряда конструкций одиночных однофазных двухжильных (А, N) проводов (кабелей) с учетом их сечений (расстояний между жилами) и допустимых для них токов условия ЭМС по магнитным полям промышленной частоты в виде выбора до-

пустимых расстояний до контролируемого (нормируемого) объекта $R_{0,i,доп}$, м, приведены в таблице.

Допустимые расстояния $R_{0,i,доп}$, м, до контролируемого (нормируемого) объекта при выполнении условий ЭМС по магнитным полям промышленной частоты $H_{50Гц,доп}$, А/м, для двухжильных проводов (кабелей)

Сечение жилы провода (кабеля) S , мм ²	Расстояние между центрами проводов d , м	Номинальный ток $I_{д,ном}$, А	Допустимые расстояния до контролируемого (нормируемого) объекта при ЭМС, $R_{0,i,доп}$, м					
			Для ОП по ГН 2.1.8/2.2.4.2262-07 при $H_{50Гц,ОП,доп} \leq 4А/м$		Для ТС и ЭЛТ по ГОСТ Р 51317.6.1-2006			
					при $H_{50Гц,ТС,доп} \leq 3А/м$		при $H_{50Гц,ЭЛТ,доп} \leq 1А/м$	
			для $H_{д\Sigma,т,2ж}$	для $m_{2ж}(H_{д\Sigma})$	для $H_{д\Sigma,т,2ж}$	для $m_{2ж}(H_{д\Sigma})$	для $H_{д\Sigma,т,2ж}$	для $m_{2ж}(H_{д\Sigma})$
		$R_{0,i,доп}$, м	$R_{0,i,доп}$, м	$R_{0,i,доп}$, м	$R_{0,i,доп}$, м	$R_{0,i,доп}$, м	$R_{0,i,доп}$, м	
2,5	0,00276	30	0,057	0,046	0,066	0,052	0,115	0,09
4	0,00324	41	0,073	0,058	0,084	0,066	0,146	0,116
6	0,00373	50	0,086	0,069	0,099	0,078	0,173	0,138
10	0,00555	80	0,133	0,107	0,153	0,120	0,266	0,213
16	0,0065	100	0,162	0,130	0,186	0,146	0,324	0,259
25	0,0076	140	0,206	0,165	0,237	0,185	0,412	0,330
35	0,0086	170	0,242	0,194	0,278	0,218	0,484	0,387
50	0,0120	215	0,322	0,258	0,370	0,290	0,644	0,515
70	0,01365	270	0,384	0,307	0,442	0,346	0,768	0,614
95	0,01555	330	0,453	0,362	0,521	0,408	0,906	0,725
120	0,0177	385	0,522	0,418	0,600	0,470	1,044	0,835
150	0,0197	440	0,589	0,471	0,677	0,530	1,178	0,942
185	0,0203	510	0,644	0,515	0,740	0,579	1,287	1,030
240	0,0214	605	0,720	0,576	0,828	0,648	1,440	1,152
300	0,0235	695	0,808	0,646	0,929	0,727	1,616	1,293
400	0,0265	830	0,938	0,750	1,079	0,844	1,876	1,500

Полученные аналитические выражения (17 – 21) и результаты расчетов, показанные в таблице, позволяют оценивать условия ЭМС для обслуживающего персонала и технических средств по магнитным полям промышленной частоты с учетом допустимых расстояний в пространстве вокруг одиночных однофазных двухжильных (А, N) проводов или кабелей СЭС офисных (производственных), жилых помещений и учитывать их при анализе существующей электромагнитной обстановки в помещениях и при проектировании СЭС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Салтыков В.М., Копичникова И.В.* Исследования электромагнитной обстановки в системе электропитания офисного здания // Технологии ЭМС. – 2011. – № 1 [36].
2. *ГН 2.1.8/2.2.4.2262-07.* Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой 50 Гц в помещениях жилых, общественных зданий и на селитебных территориях. Утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 21 августа 2007 года. № 60.
3. *ГОСТ Р 51317.6.1 – 2006.* Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым электропотреблением. Требования и методы испытаний. – М.: Издательство стандартов, 2006.
4. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учебник. – 10-е изд., стереотип. – М.: Гардарики, 2003.
5. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Наука, 1989.

Статья поступила в редакцию 14 января 2013 г.

CHOICE OF ADMISSIBLE DISTANCES WITH EMC IN MAGNETIC FIELDS OF INDUSTRIAL FREQUENCY SINGLE PHASE WIRE IN DOMESTIC AND OFFICE

V.A. Bepalov, M.V. Smirnov, V.M. Saltykov, A.V. Saltykov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

Based on the proposed method of calculating the total value of the magnetic field of industrial frequency currents in two phase wires (cables) electrical systems are expressions for the permissible distances to sensitive to the magnetic fields of objects from a position of conditions ensuring electromagnetic compatibility.

Keywords: *power system, the magnetic field of industrial frequency, electromagnetic compatibility.*

Vladimir A. Bepalov, Postgraduate Student.
Maksim V. Smirnov, Graduate Student.
Valentin M. Saltykov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Alexander V. Saltykov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.