

## Электротехника

УДК 681.3.06

### ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВОКРУГ СИЛОВЫХ ЧЕТЫРЕХЖИЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ ИЛИ ПРОВОДОВ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ И ОФИСНЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

*В.А. Беспалов, А.В. Салтыков, В.М. Салтыков, А.Н. Стройкин*

Самарский государственный технический университет  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244  
E-mail: anadis88@mail.ru

*Показан характер изменения суммарных значений напряженностей магнитного поля промышленной частоты в виде круговых диаграмм и расчетных выражений их максимальных значений вокруг силовых трехфазных четырехжильных кабелей (проводов) систем электроснабжения для симметричного и неполнофазных режимов нагрузки.*

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

В системах электроснабжения (СЭС) производственных и офисных помещений с напряжением 0,4 кВ для передачи и распределения электроэнергии характерным является использование трехфазных четырехжильных с нейтральной фазой кабелей или проводов при питании группы однофазных электроприемников, создающих симметричные или несимметричные режимы нагрузки, и, следовательно, рабочих токов, являющихся источниками магнитных полей промышленной частоты.

Для расчета напряженности магнитного поля вокруг трехфазного четырехжильного кабеля или провода ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $N$ ) целесообразно использовать геометрическую модель, показанную на рис. 1.

В представленной на рис. 1 расчетной модели трехфазного четырехжильного провода в качестве контрольных принимаются точки  $i$  по окружности вектора  $R_{0,i}$  от центральной точки провода  $O$ , совмещенной с началом системы прямоугольных координат  $X, Y$ .

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

Задаем расстояние  $d$ , м, между центрами токоведущих жил трехфазного четы-

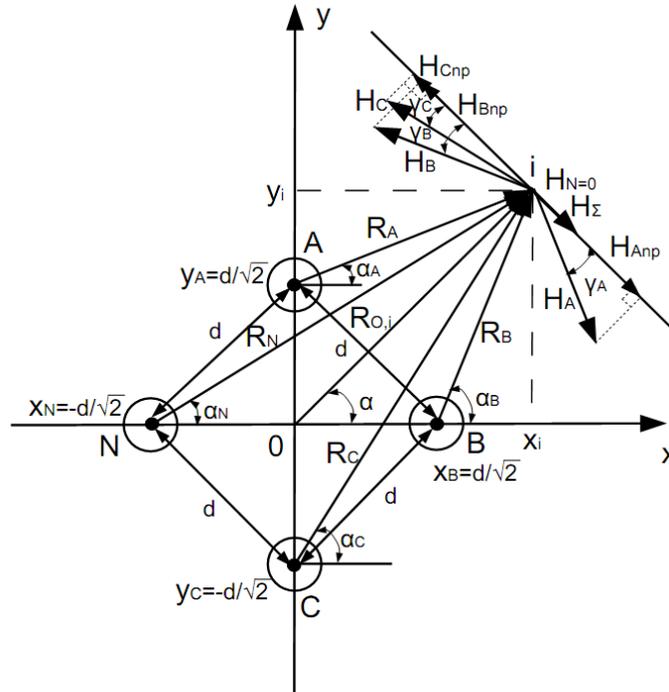
---

*Владимир Александрович Беспалов, аспирант.  
Александр Валентинович Салтыков (к.т.н.), доцент кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы».*

*Валентин Михайлович Салтыков (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электромеханика и автомобильное оборудование».*

*Алексей Николаевич Стройкин, аспирант.*

рехжильного кабеля (провода)  $A, B, C$  (фазные проводники) и  $N$  (нейтральный проводник), а также их координаты относительно центра прямоугольной системы.



Р и с. 1. Геометрическая модель для расчета напряженностей магнитного поля вокруг трехфазного четырехжильного кабеля или провода (для жил  $A, B, C, N$ , расположенных по квадрату)

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

– для фазного проводника  $A$  трехфазного провода:

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

– для фазного проводника  $B$  трехфазного провода:

$$X_B = 0; Y_B = \frac{d}{\sqrt{2}}; \quad (2)$$

– для фазного проводника  $C$  трехфазного провода:

$$X_C = -\frac{d}{\sqrt{2}}; Y_C = 0; \quad (3)$$

– для нейтрального проводника  $N$  однофазного провода:

$$X_N = 0; Y_N = -\frac{d}{\sqrt{2}}. \quad (4)$$

Задаем координаты контрольной точки  $i$ , применяя выражения:

$$X_i = R \cos \alpha ; Y_i = R \sin \alpha ; \quad (5)$$

где  $\alpha$  – угол между положительным направлением оси  $X$  и вектором  $R$ .

Заданные координаты позволяют определять векторы  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_C$  и  $R_N$ , т. е. расстояния от центров токоведущих жил фазных проводников и нулевого проводника (нейтрали) до контрольной точки окружающего пространства, по выражениям:

$$R_{A,i} = \sqrt{(x_i - x_A)^2 + (y_i - y_A)^2} ; \quad (6)$$

$$R_{B,i} = \sqrt{(x_i - x_B)^2 + (y_i - y_B)^2} ; \quad (7)$$

$$R_{C,i} = \sqrt{(x_i - x_C)^2 + (y_i - y_C)^2} ; \quad (8)$$

$$R_{N,i} = \sqrt{(x_i - x_N)^2 + (y_i - y_N)^2} . \quad (9)$$

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

$$\dot{H}_{A,i} = \frac{\dot{I}_A}{2\pi R_{A,i}} , \text{ А/м}; \quad (10)$$

$$\dot{H}_{B,i} = \frac{\dot{I}_B}{2\pi R_{B,i}} , \text{ А/м}; \quad (11)$$

$$\dot{H}_{C,i} = \frac{\dot{I}_C}{2\pi R_{C,i}} , \text{ А/м}; \quad (12)$$

$$\dot{H}_{N,i} = \frac{\dot{I}_N}{2\pi R_{N,i}} , \text{ А/м}, \quad (13)$$

где  $i_A = I_{Am} \sin(\omega t + \varphi_A)$  – ток в проводнике фазы  $A$ ;  $i_B = I_{Bm} \sin(\omega t + \varphi_B)$  – ток в проводнике фазы  $B$ ;  $i_C = I_{Cm} \sin(\omega t + \varphi_C)$  – ток в проводнике фазы  $C$ .

Для последующего анализа целесообразным является приведение полученных значений напряженностей магнитного поля (10...13) в плоскость касательной к вектору  $R_{0,i}$  в виде проекций  $\dot{H}_{A\gamma}$ ,  $\dot{H}_{B\gamma}$ ,  $\dot{H}_{C\gamma}$  и  $\dot{H}_{N\gamma}$ :

$$\dot{H}_A = \dot{H}_{A\gamma} = \dot{H}_{A,i} \cos \gamma_A ; \quad (14)$$

$$\dot{H}_B = \dot{H}_{B\gamma} = \dot{H}_{B,i} \cos \gamma_B ; \quad (15)$$

$$\dot{H}_C = \dot{H}_{C\gamma} = \dot{H}_{C,i} \cos \gamma_C; \quad (16)$$

$$\dot{H}_N = \dot{H}_{N\gamma} = \dot{H}_{N,i} \cos \gamma_N, \quad (17)$$

где  $\gamma_A = (\alpha - \alpha_A)$  – угол между вектором напряженности магнитного поля  $\dot{H}_A$  и его проекцией на плоскость касательной вектора  $R_{0,i}$ ;  $\alpha$  – 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  $R_{A,i}$  и положительным направлением оси  $X$ ; и аналогично для  $\alpha_B = \arcsin\left[\frac{(y_i - y_B)}{R_{B,i}}\right]$ ;  $\alpha_C = \arcsin\left[\frac{(y_i - y_C)}{R_{C,i}}\right]$ ;  $\alpha_N = \arcsin\left[\frac{(y_i - y_N)}{R_{N,i}}\right]$ .

Результирующее значение напряженности магнитного поля  $\dot{H}_\Sigma$ , 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

$$\dot{H}_\Sigma = \dot{H}_A + \dot{H}_B + \dot{H}_C + \dot{H}_N. \quad (18)$$

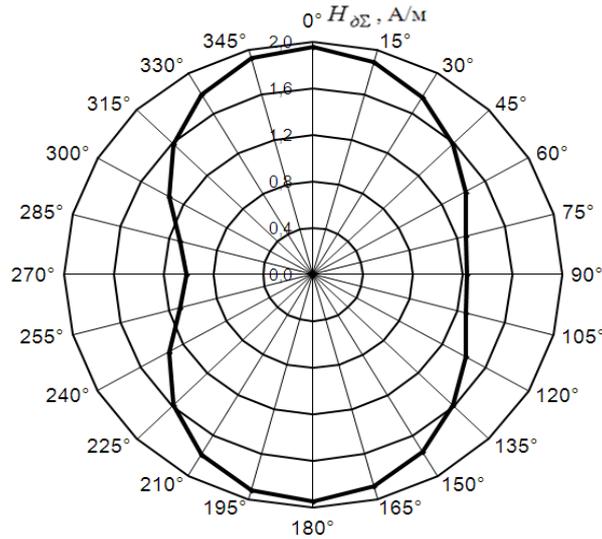
На основании представленных выражений была разработана методика расчета значений напряженностей магнитного поля как от отдельных проводов с током  $\dot{H}_A$ ,  $\dot{H}_B$ ,  $\dot{H}_C$  и  $\dot{H}_N$ , так и результирующих (суммарных) значений  $\dot{H}_\Sigma$  в окружающем пространстве (в контрольных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

Основным режимом в электрических сетях с трехфазными четырехжильными проводами (кабелями) является режим симметричной нагрузки, определяемый токами  $i_A$ ;  $i_B$ ;  $i_C$  в фазных проводниках, сдвинутых относительно друг друга по фазе на  $120^\circ$ .

С использованием выражений (10...18) были определены мгновенные значения напряженностей магнитного поля от тока в фазных проводах  $A, B, C$ :  $\dot{H}_A$ ,  $\dot{H}_B$ ,  $\dot{H}_C$ ; от тока в нулевом проводе  $N$ :  $\dot{H}_N$ ; а также их суммарные (результирующие) значения  $\dot{H}_\Sigma$  (мгновенные, амплитудные, действующие), в контрольной точке  $i$  и для других точек по окружности от геометрического центра трехфазного четырехжильного провода для периода промышленной частоты ( $t = 0,02$  с).

На основании результатов расчета действующих значений суммарных напряженностей магнитного поля  $H_\Sigma$  для симметричного режима с токами  $I_A = I_B = I_C$  вокруг трехфазного четырехжильного кабеля (провода) с расположением жил по квадрату (рис. 1) построена круговая диаграмма изменения действующих значений суммарной напряженности магнитного поля  $H_\Sigma$ , А/м, которая показана на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что наибольшие значения напряженности магнитного поля  $H_{\Sigma m}$ , А/м, в пространстве вокруг трехфазного четырехжильного провода для симметричного режима присутствуют в контрольных точках вдоль оси расположения проводов фаз  $A, C$ .



Р и с. 2. Круговая диаграмма изменения  $H_{\Sigma}$ , А/м, в пространстве вокруг трехфазного четырехжильного провода для ряда контрольных точек на расстоянии  $R_{0,i} = 0,1$  м от центральной точки 0 для симметричного режима с токами  $I_A = I_B = I_C = 10$  А;

$$i_N = i_A + i_B + i_C = 0; \quad d = 0,01 \text{ м}$$

В результате проведенных расчетов было получено следующее:

– характер изменения максимальных значений суммарной напряженности магнитного поля  $H_{\Sigma m}$  от трехфазного четырехжильного провода для симметричного режима (при  $I = 10$  А,  $d = 0,01$  м) в окружающем пространстве в зависимости от расстояния  $R_{0,i}$ , м, является нелинейным и может быть аппроксимирован выражением

$$H_{\Sigma m}(R_{0,i}) = \frac{0,0197}{R_{0,i}^2}, \text{ А/м}; \quad (19)$$

– характер изменения  $H_{\Sigma m}$  (при  $I = 10$  А,  $R_{0,i} = 0,1$  м) в зависимости от расстояния между жилами провода  $d$ , м, является линейным и может быть аппроксимирован выражением

$$H_{\Sigma m}(d) = 195,61d, \text{ А/м}; \quad (20)$$

– характер изменения  $H_{\Sigma m}$  (при  $d = 0,01$  м,  $R_{0,i} = 0,1$  м) в зависимости от тока  $I$ , А, является линейным и может быть аппроксимирован выражением

$$H_{\Sigma m}(I) = 0,195I, \text{ А/м}. \quad (21)$$

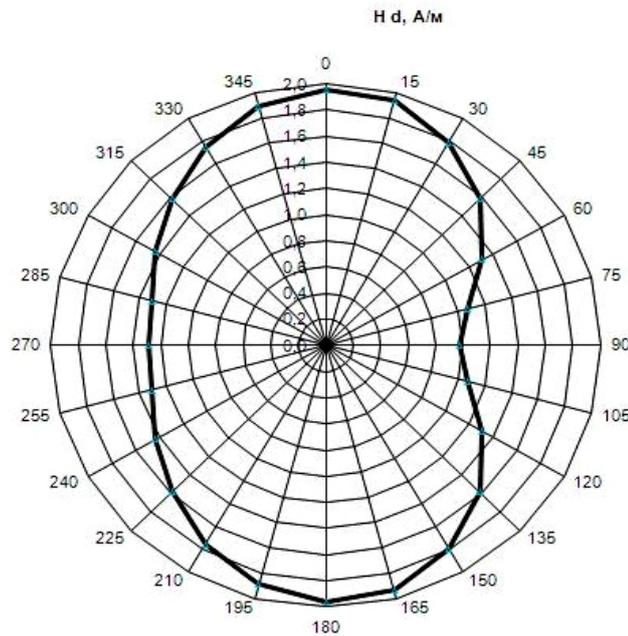
В результате представленных зависимостей было получено общее выражение для определения максимального действующего значения суммарной напряженности магнитного поля  $H_{\Sigma m}(ABCN)$ , А/м, от трехфазного четырехжильного провода для симметричного режима в окружающем пространстве с учетом: величины тока  $I$ , А; расстояния между контрольной точкой пространства и центром провода  $R_{0,i}$ , м; расстояния между жилами провода  $d$ , м, которое имеет следующий вид:

$$H_{\Sigma m}(ABCN) = \frac{0,195Id}{R_{0,i}^2}, \text{ А/м}. \quad (22)$$

Выражение (22) можно также привести к общепринятому виду

$$H_{\Sigma m}(ABCN) = \frac{1,224Id}{2\pi R_{0,i}^2}, \text{ А/м.} \quad (23)$$

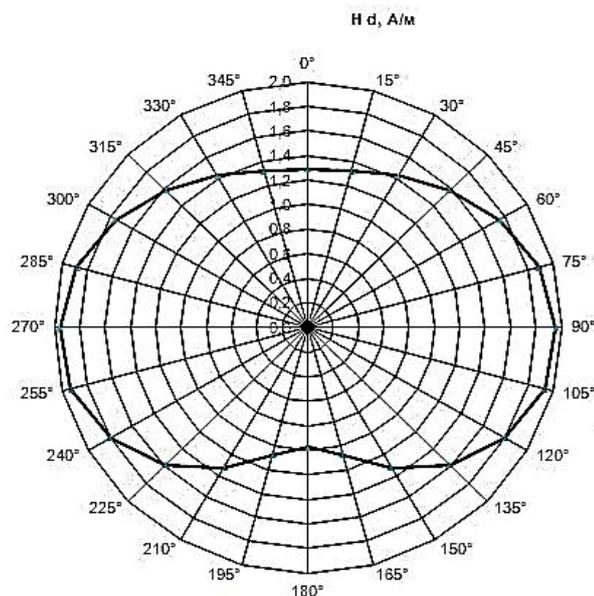
Дополнительно на рис. 3 на основании результатов расчета действующих значений суммарных напряженностей магнитного поля  $H_{\Sigma}$  для неполнофазного режима при отсутствии нагрузки в фазе  $B$  (при обрыве провода) с токами  $I_A = I_C$ ;  $I_B = 0$  вокруг трехфазного четырехжильного кабеля (провода) построена круговая диаграмма изменения действующих значений суммарной напряженности магнитного поля  $H_{\Sigma}$ , А/м, а на рис. 4 – для неполнофазного режима при отсутствии нагрузки в фазе  $C$  (при обрыве провода) с токами  $I_A = I_B$ ;  $I_C = 0$ .



Р и с. 3. Круговая диаграмма изменения  $H_{\Sigma}$ , А/м, вокруг трехфазного четырехжильного провода для несимметричного режима с токами  $I_A = 10 \text{ А}$ ;  $I_B = 0 \text{ А}$ ;  $I_C = 10 \text{ А}$ ;

$$i_N = i_A + i_B + i_C; d = 0,01 \text{ м}; R = 0,1 \text{ м}, \text{ (при обрыве в фазе } B)$$

Из рис. 3 следует, что наибольшие значения напряженности магнитного поля  $H_{\Sigma}$ , А/м, в пространстве вокруг трехфазного трехжильного провода с расположением жил по четырехугольнику для несимметричного режима при обрыве фазы  $B$ :  $H_{\Sigma m}(ACN)$ , А/м, присутствуют в контрольных точках вдоль осей расположения проводов фаз  $A$ ,  $C$ , а из рис. 4 следует, что для несимметричного режима при обрыве в фазе  $C$ :  $H_{\Sigma m}(ABN)$ , А/м, они присутствуют в контрольных точках вдоль осей расположения проводов фаз  $A$ ,  $N$ .



Р и с. 4. Круговая диаграмма изменения  $H_{\Sigma}$ , А/м, вокруг трехфазного четырехжильного провода для несимметричного режима с токами  $I_A = 10\text{А}$ ;  $I_B = 10\text{А}$ ;  $I_C = 0\text{А}$ ;

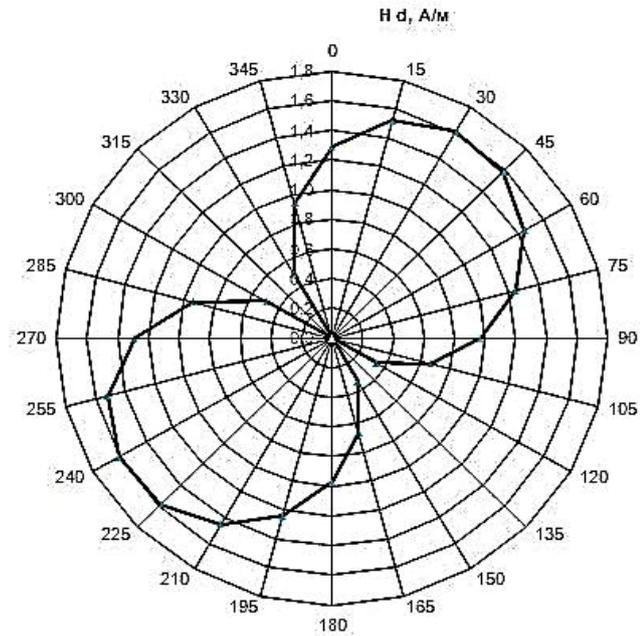
$$i_N = i_A + i_B + i_C; d = 0,01\text{м}; R = 0,1\text{м (при обрыве в фазе C)}$$

В результате проведенных расчетов были получены выражения для определения  $H_{\Sigma m}$ , А/м, в окружающем пространстве от трехфазного четырехжильного кабеля (провода) при обрыве фазы В:  $H_{\Sigma m}(ACN)$ , А/м, или фазы С:  $H_{\Sigma m}(ABN)$ , А/м, с учетом: величины тока  $I$ , А; расстояния между контрольной точкой пространства и центром провода  $R_{0,i}$ , м; расстояния между жилами провода  $d$ , м, которые имеют следующий вид:

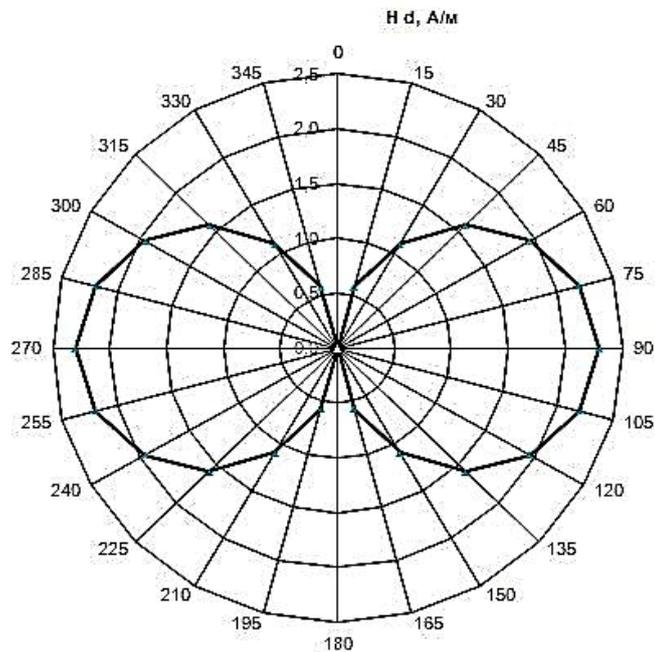
$$H_{\Sigma m}(ACN) = H_{\Sigma m}(ABN) = \frac{1,224Id}{2\pi R_{0,i}^2}, \text{А/м.} \quad (24)$$

При этом можно отметить, что в окружающем пространстве максимальные значения напряженности магнитного поля от трехфазного четырехжильного кабеля (провода)  $H_{\Sigma m}(ABCN)$ , А/м, для симметричного режима нагрузки и неполнофазных режимов при отсутствии нагрузки в одной из фаз:  $H_{\Sigma m}(ACN)$ , А/м;  $H_{\Sigma m}(ABN)$ , А/м, являются одинаковыми и превышают приблизительно на 20 % максимальные значения напряженности магнитного поля от однофазного двухжильного провода  $H_{\Sigma m2}$ , А/м [1].

При отсутствии нагрузки (при обрывах) в двух фазах трехфазного четырехжильного кабеля (провода) характер изменения суммарной напряженности магнитного поля становится похожим на характер изменения суммарной напряженности магнитного поля от однофазного двухжильного провода, как показано на рис. 5 и 6.



Р и с. 5. Круговая диаграмма изменения  $H_{\Sigma}$ , А/м, в пространстве вокруг трехфазного четырехжильного провода для неполнофазного режима с токами:  $I_A = 10\text{А}$ ;  $I_N = I_A$ ;  $d = 0,01\text{м}$ ;  $R = 0,1\text{м}$  (при обрывах в фазах В и С)



Р и с. 6. Круговая диаграмма изменения  $H_{\Sigma}$ , А/м, в пространстве вокруг трехфазного четырехжильного провода для неполнофазного режима с токами:  $I_B = 10\text{А}$ ;  $I_N = I_A$ ;  $d = 0,01\text{м}$ ;  $R = 0,1\text{м}$  (при обрывах в фазах А и С)

В результате проведенных расчетов были получены выражения для определения максимальных действующих значений суммарной напряженности магнитного поля  $H_{\Sigma m}$ , А/м, в окружающем пространстве от трехфазного четырехжильного кабеля (провода) при обрыве в фазах  $B$  и  $C$  (рис. 5):  $H_{\Sigma m}(AN)$ , А/м, а также – при обрывах в фазах  $A$  и  $C$  (рис. 6):  $H_{\Sigma m}(BN)$ , А/м, с учетом: величины тока  $I$ , А; расстояния между контрольной точкой пространства и центром провода  $R_{0,i}$ , м; расстояния между жилами провода  $d$ , м, которые имеют следующий вид:

$$H_{\Sigma m}(AN) = \frac{1,02Id}{2\pi R_{0,i}^2} = 1,02H_{\Sigma m2}, \text{ А/м}, \quad (25)$$

$$H_{\Sigma m}(BN) = \frac{1,44Id}{2\pi R_{0,i}^2} = 1,44H_{\Sigma m2}, \text{ А/м}. \quad (26)$$

При этом можно отметить, что в окружающем пространстве максимальные значения суммарной напряженности магнитного поля от трехфазного четырехжильного кабеля (провода) при обрыве в фазах  $B$  и  $C$ :  $H_{\Sigma m}(AN)$ , А/м (или  $A$  и  $C$ ), практически не отличаются (25), а при обрыве в фазах  $A$  и  $C$ :  $H_{\Sigma m}(BN)$ , А/м, становятся больше в 1,44 раза (26) по отношению к максимальным значениям суммарной напряженности магнитного поля от однофазного двухжильного провода  $H_{\Sigma m2}$ , А/м [1].

В заключение следует отметить, что приведенные круговые диаграммы и полученные выражения для определения максимальных действующих значений суммарной напряженности магнитного поля в окружающем пространстве от токов в трехфазных четырехжильных кабелях или проводах (при известном расположении жил) в зависимости от рассмотренных видов нагрузки позволяют оценить условия электромагнитной совместимости в соответствии с требованиями нормативных документов: ГН 2.1.8.2.2.4.2262-07 [2] для обслуживающего персонала; ГОСТ Р 51317.6.1-2006 [3] или ГОСТ Р 50648-04 [4] для технических средств, а также выбрать наиболее рациональные (безопасные) места их расположения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беспалов А.В., Смирнов М.В., Салтыков А.В., Салтыков В.М. Выбор допустимых расстояний при обеспечении электромагнитной совместимости по магнитным полям промышленной частоты от однофазных проводов в офисных и жилых помещениях // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 1 (37). – С. 158-165.
2. ГН 2.1.8.2.2.4.2262-07. Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой 50 Гц в помещениях жилых, общественных зданий и селитебных территориях. Утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 21 августа 2007 г. № 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. ГОСТ Р 50648 – 94. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к магнитному полю промышленной частоты. Технические требования и методы испытаний. – М.: Издательство стандартов, 1994.

*Статья поступила в редакцию 5 июля 2013 г.*

## **NATURE OF INTENSITY CHANGE OF THE MAGNETIC FIELD ROUND POWER FOUR-VEIN CABLES OR WIRES IN PRODUCTION AND OFFICE ROOMS**

***V.A. Bespalov, A.V. Saltykov, V.M. Saltykov, A.N. Stoikin***

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

*The nature of intensity change of total strain values of magnetic field of industrial frequency in the form of circular charts and maximum values round power three-phase four-vein cables of power supply systems for symmetric and not full-phase modes of loading is shown.*

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

---

*Vladimir A. Bespalov, Postgraduate Student.*  
*Alexander V. Saltykov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*  
*Valentin M. Saltykov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*  
*Aleksey N. Stoikin, Postgraduate Student.*