

МЕТОД РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ ОТ ТРЕХФАЗНЫХ ШИН С СИММЕТРИЧНЫМИ ТОКАМИ

В.М. Салтыков, Н.В. Безменова

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

Приведены аналитические выражения и графическая модель характера изменения суммарных напряженностей магнитного поля от трехфазных симметричных токов промышленной частоты в зависимости от расстояния между шинами и контрольными точками возможного расположения технических устройств.

Ключевые слова: *распределительные устройства, напряженность магнитного поля, трехфазные симметричные токи, шины.*

В электрических сетях и распределительных устройствах низкого напряжения 0,4...10 кВ напряженность электрического поля промышленной частоты \dot{E} , кВ/м, имеет незначительные уровни [1], а рабочие токи могут достигать 4000 А, т. е. создавать значительные по уровням напряженности магнитного поля промышленной частоты [2-4]. Основными источниками напряженности магнитных полей промышленной частоты \dot{H} , А/м в электрических сетях и распределительных устройствах являются трехфазные токи $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ проводников, в частности, шины прямоугольного или круглого сечения, разнесенные в пространстве на определенное расстояние друг от друга, например, в ячейках комплектных распределительных устройств (КРУ).

Техническое средство (ТС), например, устройства микропроцессорной релейной защиты (МПРЗ), чувствительное к магнитным полям, т. е. контрольная точка i , также находится на определенном расстоянии от шин с токами, причем создаваемые в контрольной точке напряженности магнитного поля $\dot{H}_{i,A}, \dot{H}_{i,B}, \dot{H}_{i,C}$ от трехфазных токов электрической сети будут иметь разные значения, в первую очередь, из-за разных расстояний между шинами с током и контрольной точкой.

При этом задача определения результирующей (суммарной) напряженности магнитного поля $\dot{H}_{i,\Sigma}$, А/м в контрольной точке i зависит от комплекса электрических и конструктивных факторов.

В общем виде определение результирующей напряженности магнитного поля $\dot{H}_{i,\Sigma}$ в контрольной точке i предполагает решение системы уравнений:

$$\dot{H}_{i,A} = \dot{H}'_{i,A}(\dot{I}_A; R_{i,A}) \cdot \cos \varphi_{A,i,a}; \quad (1)$$

$$\dot{H}_{i,B} = \dot{H}'_{i,B}(\dot{I}_B; R_{i,B}) \cdot \cos \varphi_{B,i,b}; \quad (2)$$

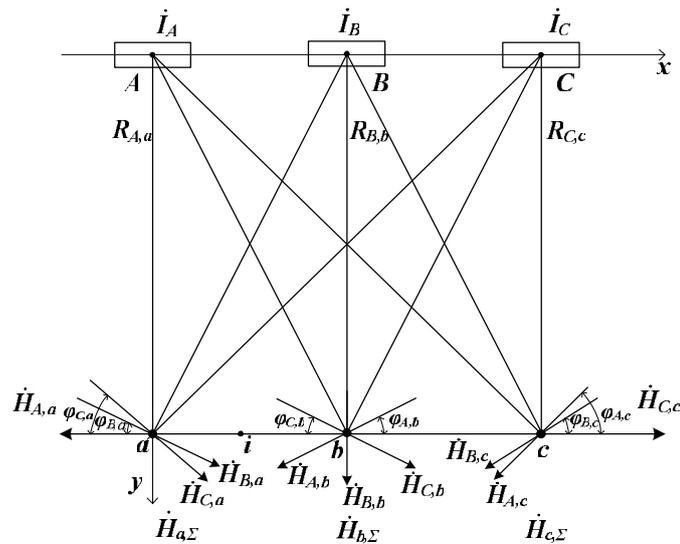
$$\dot{H}_{i,C} = \dot{H}'_{i,C}(\dot{I}_C; R_{i,C}) \cdot \cos \varphi_{C,i,c}; \quad (3)$$

$$\dot{H}_{i,\Sigma} = \dot{H}_{i,A} + \dot{H}_{i,B} + \dot{H}_{i,C}, \quad (4)$$

где $\dot{I}_A; \dot{I}_B; \dot{I}_C$ – токи в шинах A, B, C , А; $R_{i,A}; R_{i,B}; R_{i,C}$ – расстояние между центрами шин A, B, C и контрольной точкой i , м; $\dot{H}'_{i,A}; \dot{H}'_{i,B}; \dot{H}'_{i,C}$ – напряженности магнитного поля от тока шин A, B, C в контрольной точке i , А/м; $\cos \varphi_{A,i,a}$, $\cos \varphi_{B,i,b}$, $\cos \varphi_{C,i,c}$ – коэффициент приведения значений напряженностей магнитного поля $\dot{H}'_{i,A}; \dot{H}'_{i,B}; \dot{H}'_{i,C}$ к значениям их проекций $\dot{H}_{i,A}; \dot{H}_{i,B}; \dot{H}_{i,C}$ на плоскость, параллельную расположению шин.

В распределительных устройствах низкого напряжения шины прямоугольного сечения, как правило, расположены вертикально в ряд и могут быть направлены в сторону контрольных точек широкой h или узкой b стороной.

На основании полученных выражений (1...4) можно выполнить расчет напряженностей магнитного поля в контрольных точках a, b, c напротив трехфазных шин прямоугольного сечения A, B, C при расположении прямоугольных шин широкой стороной h к контрольным точкам a, b, c , что отражено геометрической моделью (рис. 1).



Р и с. 1. Геометрическая модель расположения шин A, B, C с токами $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$, направленных к плоскости контрольных точек a, b, c широкой стороной h

В представленной на рис. 1 геометрической модели расположения шин и контрольных точек a, b, c для расчета напряженностей магнитного поля \dot{H} , А/м от симметричных токов ось расположения шин в горизонтальной плоскости примем за ось x . Изменения значений напряженности магнитного поля от центра шины A к контрольной точке a примем за ось y . Контрольные точки a, b, c, i будем располагать на плоскости x' , параллельной плоскости расположения центров шин с симметричными токами.

При выполнении расчетов будем рассматривать напряженности магнитного поля \dot{H} , А/м, направленные по нормальям $\dot{H}^{(h)}$ или $\dot{H}^{(b)}$ к сторонам шин прямоугольного сечения ограниченной длины [5] и в произвольном направлении к плоскости оси y , определяемые по выражениям:

– по оси координаты x :

$$\dot{H}_{I,i}^{(h)} = \frac{I \cdot 0,15 \cdot (\ln L + 3,11)}{2\pi \cdot R_{I,i}^{1,4}}, \text{ А/м}; \quad (5)$$

– по оси координаты y :

$$\dot{H}_{I,i}^{(b)} = \frac{I \cdot 0,12 \cdot (\ln L + 3,29)}{2\pi \cdot R_{I,i}^{1,4}}, \text{ А/м}; \quad (6)$$

– в плоскости y :

$$\dot{H}'_{I,i}^{(h)} = \frac{\dot{H}_{I,i}^{(h)} \cdot \dot{H}_{I,i}^{(b)}}{\sqrt{\dot{H}_{I,i}^{(h)2} \cdot \sin^2 \varphi_{I,i} + \dot{H}_{I,i}^{(b)2} \cdot \cos^2 \varphi_{I,i}}}, \text{ А/м}, \quad (7)$$

где $\dot{H}_{I,i}^{(h)}$ – напряженность магнитного поля в воздушном пространстве по оси нормали широкой стороны h прямоугольной шины с током \dot{I} , А/м; $\dot{H}_{I,i}^{(b)}$ – напряженность магнитного поля в воздушном пространстве по оси нормали узкой стороны прямоугольной шины с током \dot{I} , А/м; $\dot{H}'_{I,i}^{(h)}$ – напряженность магнитного поля в воздушном пространстве от центров шин к контрольным точкам, А/м; \dot{I} – ток в шинах A, B, C прямоугольного сечения, А; L – длина прямоугольной шины с током ($L \leq 1i$), м; $R_{I,i}$ – расстояние от центра прямоугольной шины с током до контрольной точки i , м.

Расстояние $R_{I,i}^{(h)}$, м от центра прямоугольной шины с током \dot{I} до контрольной точки i определяется углом $\varphi_{I,i}^{(h)}$ между вектором (расстоянием) $R_{x,i}^{(h)}$, м, направленным вдоль оси нормали широкой стороны шины h с координатами x, i , т. е. по оси y , и вектором (расстоянием) $R_{x',i}$, м, направленным по оси x' , с координатами x', i , т. е. по выражению

$$R_{I,i}^{(h)} = R_{x',i} / \cos \varphi_{I,i}^{(h)}, \quad (8)$$

где $\cos \varphi_{I,i}^{(h)} = R_{x',i} / R_{x,i}$ – косинус угла сдвига вектора (расстояния) $R_{x',i}^{(h)}$ по оси y в направлении контрольной точки i .

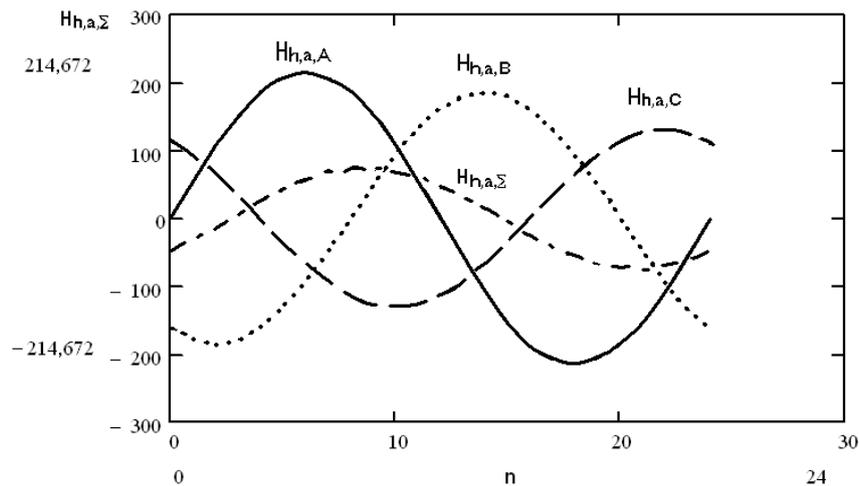
Следует отметить, что значения напряженности магнитного поля $\dot{H}'_{I,i}^{(h)}$, А/м, полученные по выражению (7) в контрольных точках i , например, a, b, c , будут находиться в плоскости, перпендикулярной направлению векторов (расстояний) R_i .

Для приведения указанных значений $\dot{H}_{I,i}^{(h)}$ к общей плоскости, в частности, по оси x' , для их последующего сложения по выражению (4) необходимо воспользоваться следующим выражением:

$$\dot{H}_{I,i}^{(h)} = \dot{H}_{I,i}^{(h)} \cdot \cos \varphi_{I,i}^{(h)}. \quad (9)$$

На основании представленных выражений в трехфазных электрических сетях и в распределительных устройствах с симметричными токами была разработана методика расчета значений напряженностей магнитного поля как от отдельных шин с током $\dot{H}_{A,i}^{(h)}$, $\dot{H}_{B,i}^{(h)}$, $\dot{H}_{C,i}^{(h)}$, так и результирующих (суммарных) значений $\dot{H}_{\Sigma,i}^{(h)}$ в окружающем пространстве (в контрольных точках).

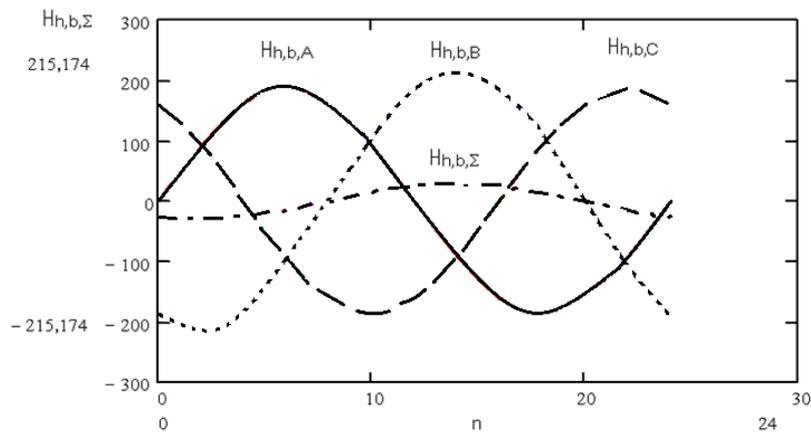
С использованием выражений (4...9) были определены мгновенные значения напряженностей магнитного поля от трехфазных симметричных токов (шины А: $\dot{H}_{A,a}^{(h)}$; шины В: $\dot{H}_{B,a}^{(h)}$; шины С: $\dot{H}_{C,a}^{(h)}$) в контрольной точке a и других, а также их результирующих значений $\dot{H}_{\Sigma}^{(h)}$, в плоскости широких сторон h прямоугольных шин, которые на интервале периода промышленной частоты (0,02 с.) показаны на рис. 2...4.



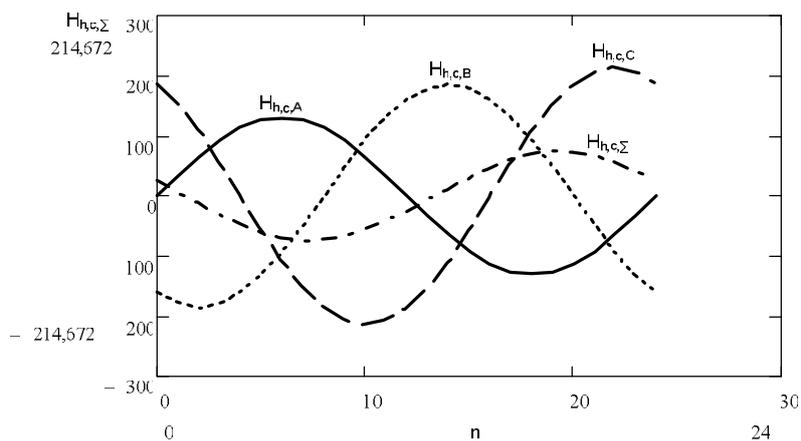
Р и с. 2. Мгновенные значения напряженностей магнитного поля в контрольной точке a в плоскости широких сторон h прямоугольных шин при $R_{A,a} = 0,6$ м

На основании рассмотренных выражений был выполнен расчет значений суммарных напряженностей магнитного поля $\dot{H}_{\Sigma,a}^{(h)}$; $\dot{H}_{\Sigma,b}^{(h)}$; $\dot{H}_{\Sigma,c}^{(h)}$, А/м на расстоянии $R_{x,i}$, м для ряда контрольных точек по оси y [6] от симметричных трехфазных токов A, B, C прямоугольных шин в плоскости их широких сторон h .

В частности, для расстояния между шинами $d = 0,2$ м, определяемого условиями электродинамической устойчивости шин, результаты расчетов суммарных напряженностей магнитного поля $\dot{H}_{\Sigma}^{(h)}$ ($\dot{H}_{\Sigma,a}^{(h)}$, $\dot{H}_{\Sigma,b}^{(h)}$, $\dot{H}_{\Sigma,c}^{(h)}$) в контрольных точках напротив шин с трехфазными токами $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ сведены в табл. 1.



Р и с. 3. Мгновенные значения напряженностей магнитного поля в контрольной точке b в плоскости широких сторон h прямоугольных шин при $R_{B,b} = 0,6$ м



Р и с. 4. Мгновенные значения напряженностей магнитного поля в контрольной точке c в плоскости широких сторон h прямоугольных шин при $R_{C,c} = 0,6$ м

Из рис. 2...4 и табл. 1 следует, что наибольшие значения $\dot{H}_{\Sigma}^{(h)}$ присутствуют в контрольной точке a : $\dot{H}_{\Sigma,a}^{(h)}$ и в точке c : $\dot{H}_{\Sigma,b}^{(h)}$, пространства напротив крайних шин с токами \dot{I}_A и \dot{I}_C . Это объясняется комбинацией фазовых сдвигов между напряженностями от токов отдельных фаз и их значениями в контрольной точке в зависимости от расстояния.

При этом характер изменения суммарных значений напряженностей магнитного поля напротив шины A – $\dot{H}_{\Sigma,a}^{(h)}$ в контрольных точках на расстоянии $R_{A,a}$, м от шины A для ряда значений симметричных токов $\dot{I}_A = \dot{I}_B = \dot{I}_N = 1000; 2000; 3000$ А (при $d = 0,2$ м) в графическом виде показан на рис. 5.

Таблица 1

Значения суммарных напряженностей магнитного поля $\dot{H}_{\Sigma}^{(h)}$ ($\dot{H}_{\Sigma,a}^{(h)}$, $\dot{H}_{\Sigma,b}^{(h)}$, $\dot{H}_{\Sigma,c}^{(h)}$) в контрольных точках i для симметричных токов A, B, C в прямоугольных шинах

$\dot{H}_{\Sigma}^{(h)}$ для $I_A = I_B = I_C = 1000 \text{ A}$, $d = 0,2 \text{ м}$									
Ось x , м	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
$R_{x,i}$, м	$\dot{H}_{\Sigma,a}^{(h)}$				$\dot{H}_{\Sigma,b}^{(h)}$				$\dot{H}_{\Sigma,c}^{(h)}$
0,1	1720	1171	640	1117	1629	1117	640	1171	1720
0,2	546,7	462	368	385	426	385	368	462	546,7
0,3	256	224	187	163	157	163	187	224	256
0,4	140	122	99,5	79	70,5	79	99,5	122	140
0,5	82,6	71	56,6	42	36,3	42	56,6	71	82,6
0,6	52,2	44	34,3	25	20,6	25	34,3	44	52,2
0,7	34,5	27	21,9	16	12,6	16	21,9	27	34,5
0,8	23,7	19	14,6	10	8,2	10	14,6	19	23,7
0,9	16,8	14	10,2	7	4,6	7	10,2	14	16,8
1	12,2	10	7,3	5	3,9	5	7,3	10	12,2

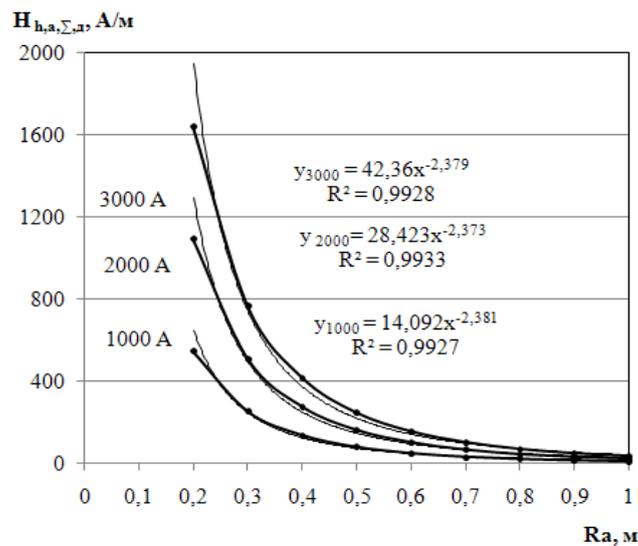


Рис. 5. Изменения значений суммарных напряженностей магнитного поля $\dot{H}_{\Sigma,a}^{(h)}$ в контрольных точках на расстоянии $R_{A,a}$, м от шины A при токах $I_A = I_B = I_C = 1000; 2000; 3000 \text{ A}$

Аппроксимирующие выражения кривых значений $\dot{H}_{\Sigma,a}^{(h)}$ (при $d = 0,2 \text{ м}$), показанных на рис. 5, имеют вид:

$$\text{— для } I_A = I_B = I_C = 1000 \text{ A: } \dot{H}_{\Sigma,a}^{(h)} = 14,1 / R_{A,a}^{2,38}, \text{ А/м,} \quad (10)$$

$$- \text{ для } \dot{I}_A = \dot{I}_B = \dot{I}_C = 2000 \text{ А: } \dot{H}_{\Sigma,a}^{(h)} = 28,4 / R_{A,a}^{2,37}, \text{ А/м,} \quad (11)$$

$$- \text{ для } \dot{I}_A = \dot{I}_B = \dot{I}_C = 3000 \text{ А: } \dot{H}_{\Sigma,a}^{(h)} = 42,4 / R_{A,a}^{2,38}, \text{ А/м.} \quad (12)$$

Полученные аппроксимирующие выражения для группы токов позволяют получить общее выражение суммарных значений напряженностей магнитного поля от симметричных токов для наибольших значений (напротив крайних шин) системы трехфазных шин для случая расположения трехфазных шин прямоугольного сечения широкой стороной h – $\dot{H}_{\Sigma,a}^{(h)}$ к контрольным точкам пространства:

$$\dot{H}_{\Sigma,a}^{(h)}(I) \cong \frac{0,014 \cdot I}{R_{A,a}^{2,38}}, \text{ А/м,} \quad (13)$$

где I – ток шины прямоугольного сечения, А; $R_{A,a}$ – расстояние от контрольной точки a напротив крайней шины до центра прямоугольной шины A по нормали ее широкой стороны h .

Аналогичные расчеты суммарных значений напряженностей магнитного поля были выполнены и для случая расположения трехфазных шин прямоугольного сечения узкой стороной b – $\dot{H}_{\Sigma,a}^{(b)}$ к контрольным точкам пространства (при $d = 0,2$ м) для наибольших значений (напротив крайних шин) системы трехфазных шин. Для их определения можно использовать выражение

$$\dot{H}_{\Sigma,a}^{(b)}(I) \cong \frac{0,009 \cdot I}{R_{A,a}^{2,45}}, \text{ А/м,} \quad (14)$$

где $R_{A,a}$ – расстояние от контрольной точки a напротив крайней шины до центра прямоугольной шины A по нормали ее узкой стороны b .

Для системы трехфазных шин круглого сечения D напряженность магнитного поля $\dot{H}_{\Sigma,a}^{(D)}$ для наибольших значений (напротив крайних шин) можно определить по выражению (при $d = 0,2$ м)

$$\dot{H}_{\Sigma,a}^{(D)}(I) = \frac{0,011 \cdot I}{R_{A,a}^{2,44}}, \text{ А/м,} \quad (15)$$

где $R_{A,a}$ – расстояние от контрольной точки a напротив крайней шины до центра круглой шины A сечением D .

В результате расчетов было получено, что наибольшие значения суммарных напряженностей магнитного поля промышленной частоты в контрольных точках пространства на одинаковом расстоянии от трехфазных шин с симметричными токами присутствуют при направлении к контрольным точкам шин прямоугольного сечения широкой стороной h – $\dot{H}_{\Sigma,a}^{(h)}(I)$, наименьшие – при направлении к контрольным точкам шин прямоугольного сечения узкой стороной b – $\dot{H}_{\Sigma,a}^{(b)}(I)$, при этом расхождение между суммарными значениями напряженности магнитного поля составляют

35%. Промежуточные значения суммарных значений напряженности магнитного поля создают трехфазные шины круглого сечения $D - \dot{H}_{\Sigma,a}^{(D)}(I)$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Защита биосферы от влияния электромагнитных полей: Учеб. пособие для вузов / Е.С. Колечицкий, В.А. Романов, В.Г. Карташов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008.
2. Салтыков В.М., Самолина О.В., Павлов А.В. Электромагнитные поля трансформаторных подстанций промышленных предприятий с позиции электромагнитной безопасности // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии. Тр. Всерос. науч.-техн. конф. Ч. 1. – Тольятти: ТГУ, 2004. – С. 163-170.
3. Салтыков В.М., Сайдова Н.В. Анализ электромагнитных полей главной понизительной подстанции 110/35/6 кВ // Экология и ресурсо- и энергосберегающие технологии на предприятиях народного хозяйства (промышленность, транспорт, сельское хозяйство). Сб. ст. VI Всерос. науч.-практ. конф. – Пенза: Приволжский дом знаний, 2006. – С. 23-26.
4. Салтыков В.М., Сайдова Н.В., Булохов Д.В., Муштаков А.И. Исследование электромагнитных полей промышленной частоты характерных объектов электростанций и способы их защиты // Пере-напряжения и надежность эксплуатации электрооборудования. Тр. Междунар. науч.-техн. конференций. – СПб.: ПЭИПК, 2008. – С. 164-166.
5. Салтыков В.М., Безменова Н.В. Учет длины проводника с током промышленной частоты при определении напряженности магнитного поля // Энергосбережение, электромагнитная совместимость и качество в электрических системах. II Международная науч.-практ. конференция. 20 февраля 2011. – Пенза: Приволжский дом знаний, 2011. – С. 3-5.
6. Салтыков В.М., Безменова Н.В. Оценка допустимых расстояний в распределительных устройствах напряжением 6-10 кВ при обеспечении нормируемых уровней магнитных полей промышленной частоты 50 Гц // Технологии электромагнитной совместимости. – 2011. – № 1. – С. 14-18.

Статья поступила в редакцию 28 февраля 2011 г.

UDK 681.3.06

THREE-PHASE SUPPLIED INDUSTRIAL FREQUENCY MAGNETIC FIELDS CALCULATION METHOD

V.M. Saltykov, N.V. Bezmenova

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

The work shows analytical forms and graphic model of overall three-phase symmetric current magnetic field strength change depending on distance between bus rods and control point of possible devices locations.

Keywords: *switchboard, magnetic field, three-phase balanced currents, busbars.*

*V.M. Saltykov – Doctor of Technical Sciences, Professor.
N.V. Bezmenova – Senior Lecture.*