

ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЁННОСТЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОКРУЖАЮЩЕМ ПРОСТРАНСТВЕ ОТ ТОКОВ ТРЁХФАЗНЫХ КАБЕЛЕЙ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

V.M. Barinov, Assistant Professor of FGAOU DPO "St. Petersburg Energy Institute of Advanced Training" (PEIAT), Honored Specialist in Energetics of the Russian Federation;

A.V. Saltykov, Cand. Sc. (Engineering), Assistant Professor of Computing and Information Technology Department of St. Petersburg State Maritime Technology University;

V.M. Saltykov, Dr. Sc. (Engineering), Professor, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Full Member (Academician) of the International Academy of Ecology and Life Protection Sciences (IAELPS)

В.М. Баринов, доцент ФГАОУ ДПО «Петербургского энергетического института повышения квалификации» (ПЭИПК), заслуженный энергетик Российской Федерации;

А.В. Салтыков, канд. техн. наук, доцент кафедры вычислительной техники и информационных технологий Санкт-Петербургского государственного морского технического университета;

В.М. Салтыков, д-р техн. наук, профессор, почётный работник высшего профессионального образования РФ, действительный член (академик) Международной академии наук по экологии и безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ)

Аннотация. Показан характер изменения напряжённостей магнитного поля в окружающем пространстве и получены аналитические выражения для определения максимальных значений от трёхфазных кабелей низкого напряжения с использованием их при последующем сопоставлении с допустимыми по условиям электромагнитной безопасности и совместимости.

Ключевые слова: трёхфазные кабели низкого напряжения, напряжённость магнитного поля, система электроснабжения, электромагнитная безопасность и совместимость.

Abstract. The behavior of magnetic field strengths in the external environment is shown, and the analytical expressions for the determination of their maximum values are given to be used in further estimation of their permissibility under electromagnetic safety and compatibility conditions.

Key words: low-voltage three-phase cables, magnetic field strength, electric power supply system, electromagnetic safety and compatibility.

Материал поступил в редакцию 22.05.2020
E-mail: vmsaltykov@rambler.ru

В настоящее время, в связи с разнообразием электроэнергетических устройств как источников электромагнитных полей и чувствительных к ним приёмников в виде, например, микропроцессорных устройств, проблема обеспечения допустимой электромагнитной обстановки (ЭМО) становится актуальной.

Достаточно серьёзный вклад в электромагнитную обстановку производственных, офисных и жилых помещений вносит электротехническое оборудование здания, а именно кабельные линии, подводящие электричество ко всем потребителям системы жизнеобеспечения здания, а также распределительные щиты и трансформаторы [1].



Кабельные системы поставлены в достаточно жёсткие рамки с точки зрения ограничения уровней собственных излучений. Такие ограничения не случайны. Они призваны устранить потенциальную угрозу здоровью людей, возникающую в результате длительного воздействия электромагнитных и радиоизлучений от кабелей, проложенных в офисных и жилых помещениях. Сотрудники современных офисов находятся в непосредственной близости и окружены такими «антеннами» практически со всех сторон. Кроме этого, малые расстояния между проводами питающей сети и информационными шинами, которые определяются условиями прокладки коммуникаций в технологических каналах здания, способствуют увеличению уровня индуцированных помех в информационных шинах [2].

Для прокладки коммуникаций в строительных конструкциях предусматриваются или вновь создаются каналы, в которых укладываются не только линии связи для передачи данных, но и телефонные линии, телевизионные, системы пожарной и охранной сигнализации, локальные вычислительные сети компьютерных систем, системы электрообеспечения и т.п. В большинстве случаев в непосредственной близости располагаются и кабельные линии первичного электропитания, как правило, с напряжением 0,4 кВ. Всё это создаёт весьма сложную электромагнитную об-

становку в сетевых каналах, что требует повышенного внимания к проблеме обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС).

Кроме электромагнитных полей от сторонних источников, возрастает напряжённость полей от аппаратуры, которая входит в состав ЛВС (локальная вычислительная сеть): компьютеры, принтеры, ксероксы и др., при этом насыщенность этой аппаратурой и её плотность на единицу площади возрастает.

На данный момент проблема решается преимущественно теоретически, а практических рекомендаций для инженеров-проектировщиков и инженеров-производственников по учёту возможного внешнего влияния (на этапе проектирования электрических сетей, а также для дополнительной защиты функционирующих кабельных линий) не существует.

Необходимость в результатах исследований внешних воздействий электромагнитных полей (ЭМП) существует как на стадиях конструирования, проектирования, монтажа и эксплуатации электротехнических систем и комплексов, так и при их реконструкции. Учёт электромагнитной совместимости силовых, вторичных и информационных кабельных линий с другими элементами рассматриваемой электротехнической системы позволяет предупредить неблагоприятные воздействия внешних электромагнитных источников.

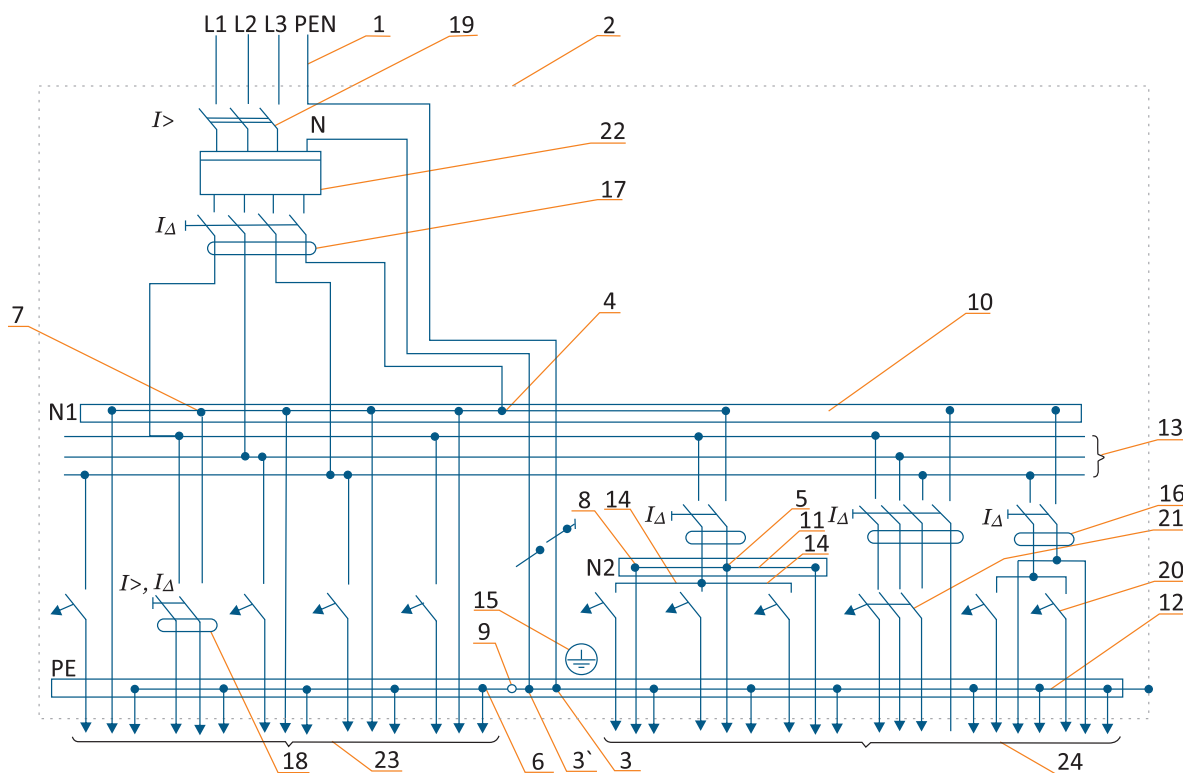


Рис. 1. Схема учётно-группового щитка многоэтажного здания, присоединённого к трёхфазной четырёхжильной питающей сети: 1 – питающая цепь; 2 – проводящая оболочка щитка; 16, 17 – устройства защитного отключения без встроенной защиты от сверхтока; 18 – устройство защитного отключения со встроенной защитой от сверхтока; 19, 20, 21 – автоматические выключатели; 22 – счётчик; 23, 24 – линии групповых цепей

Кабельная система, соединяющая активные устройства, способна как излучать, так и подвергаться воздействию излучений. Достаточно актуальной с позиции электромагнитной совместимости является проблема определения уровней и характера напряжённостей магнитного поля: H_{ϕ} , А/м, вокруг кабелей (проводов), определяемых током нагрузки, причём, как показывают исследования, напряжённости электрического поля E , В/м, в сетях с напряжением 0,4 кВ: 6: 10 кВ являются незначительными [3].

В офисных и жилых зданиях возможны различные схемы электроснабжения в зависимости от вида электроприёмников, их мощности и вида внешних электрических сетей.

На рис. 1 приведена схема учётно-группового щитка многоэтажного здания, присоединённого к трёхфазной четырёхжильной питающей сети.

Рекомендации для выбора той или иной схемы групповой линии не могут быть однозначными, так как в значительной степени зависят от протяжённости, количества потребителей, их расположения, удобства управления и эксплуатации.

Электропроводки характеризуются способом прокладки, минимально допустимым сечением, допустимой токовой нагрузкой.

Способы прокладки электропроводок регламентируются в Правилах устройства электроустановок (ПУЭ) [4] и ГОСТ Р 50571.15–97 (МЭК 364-5-52–93) Электроустановки зданий. Часть 5. Выбор и монтаж электрооборудования. Глава 52. Электропроводки [5].

Значения рабочих токов (длительно допустимые промышленной частоты, переходных процессов) с учётом конструктивного исполнения проводников, проводов, кабелей, шин определяют характер и уровни, в первую очередь, напряжённости магнитных полей H_{ϕ} , А/м, в окружающем их пространстве.

При этом рабочие токи в электрических сетях офисных и жилых помещений могут достигать 500 А, то есть создавать значительные по уровням напряжённости магнитного поля промышленной частоты H_{ϕ} , А/м, которые в офисных и жилых помещениях низкого напряжения ограничиваются требованиями нормативных документов, в первую очередь ГН 2.1.8/2.2.4.2262–07 [6] для обслуживающего персонала (ОП) офисных помещений, по которому допустимыми являются значения напряжённости магнитного поля промышленной частоты не более $H_{50\text{Гц},\text{ОП},\text{дон}} \leq 4$ А/м, а также ГОСТ Р 51317.6.1–2006 [7], по которому допустимыми являются значения напряжённости магнитного поля промышленной частоты 50 Гц на порте корпуса технических средств (ТС), применяемых в офисных зданиях и помещениях, не более $H_{50\text{Гц},\text{ТС},\text{дон}} \leq 3$ А/м.

Достаточно распространёнными источниками напряжённости магнитных полей \dot{H} , А/м, в системах

электроснабжения низкого напряжения являются фазные токи \dot{I}_{ϕ} четырёхжильных (A, B, C – фазы, N – нулевой провод) трёхфазных кабелей с расположением проводов по квадрату.

Для расчёта напряжённости магнитного поля вокруг трёхфазного четырёхжильного кабеля (A, B, C, N , кв) с расположением проводов по квадрату целесообразно использовать геометрическую модель, показанную на рис. 2.

В представленной на рис. 2 расчётной модели трёхфазного четырёхжильного провода в качестве контрольных принимаются точки i по окружности вектора $R_{0,i}$ от центральной точки провода 0, совмещённой с началом системы прямоугольных координат X, Y .

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

При этом задаём расстояние d , м, между центрами токоведущих жил однофазного провода A, B, C (фазные проводники) и N (нейтральный проводник), а также задаём их координаты относительно центра прямоугольной системы.

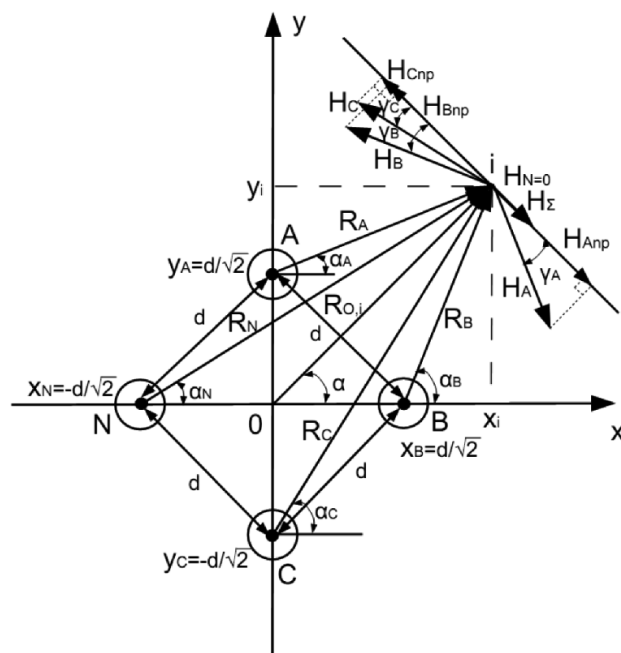


Рис. 2. Геометрическая модель для расчёта напряжённостей магнитного поля вокруг трёхфазного четырёхжильного кабеля (A, B, C, N , кв) с расположением проводов по квадрату

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

для фазного проводника A трёхфазного провода:

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



для фазного проводника B трёхфазного провода:

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

для фазного проводника C трёхфазного провода:

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

для нейтрального проводника N трёхфазного провода:

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

Задаём координаты контрольной точки i , применяя выражения:

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

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

Заданные координаты позволяют определять вектора R_A, R_B, R_C и R_N , то есть 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 значений 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 (закона Ампера) [8, 9] определяются значения напряжённости магнитного поля в контрольной точке от токов в проводниках A, B, C и N :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

где $\gamma_A = (\alpha - \alpha_A)$ – угол между вектором напряжённости 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 $R_{A,i}$ и положительным направлением оси X ;

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 напряжённости магнитного поля \dot{H}_Σ , А/м, в контрольной точке окружающего пространства по окружности вектора $R_{0,i}$ от центральной точки провода O , совмещённой 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 расчёта значений напряжённости магнитного поля, как от отдельных проводов с током \dot{H}_A, \dot{H}_B , и \dot{H}_C , и \dot{H}_N , так и результирующих (суммарных) значений \dot{H}_Σ , в окружающем пространстве (в контрольных точках).

Используя выражения (10–18), были определены мгновенные значения напряжённости магнитно-

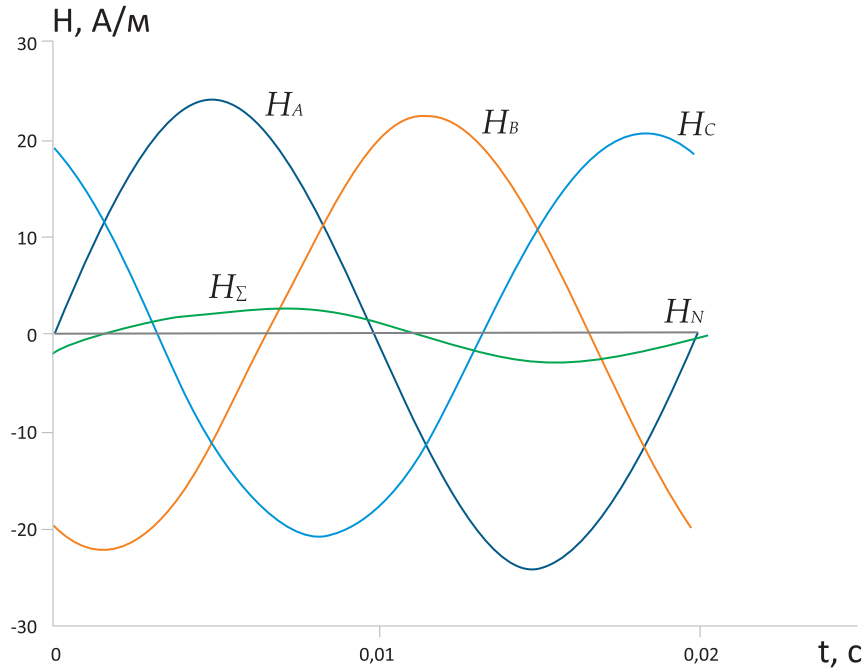


Рис. 3. Мгновенные значения напряжённостей магнитного поля \dot{H}_A , \dot{H}_N , \dot{H}_Σ от токов в проводах четырёхжильного трёхфазного кабеля (A, B, C, N , кв) для симметричного режима в окружающем пространстве в точке i (по оси Y на рис. 6) при $I_\delta = 10$ А, $R_{0,i} = 0,1$ м, $d = 0,01$ м

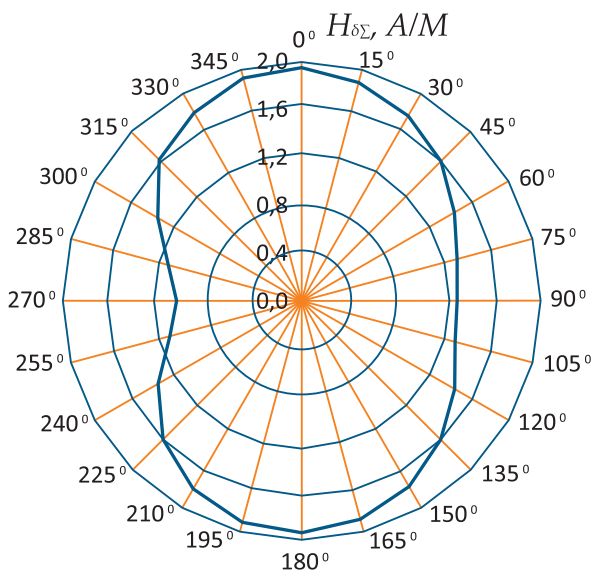


Рис. 4. Круговая диаграмма изменения $H_{\delta\Sigma}$ А/м, в окружающем пространстве вокруг трёхфазного четырёхжильного кабеля (A, B, C, N , кв) с расположением проводов по квадрату для симметричного режима с токами: $I_{A,\delta} = I_{B,\delta} = I_{C,\delta} = 10$ А, при $d = 0,01$ м, $R_{0,i} = 0,1$ м

го поля от тока в фазных проводах A, B, C ; \dot{H}_A , \dot{H}_B , \dot{H}_C ; от тока в нулевом проводе N (при несимметричной нагрузке) \dot{H}_N ; в контрольной точке i и других, а также их суммарные (результатирующие) значения \dot{H}_Σ по окружности от геометрического центра трёхфазного четырёхжильного кабеля (A, B, C, N , кв) с расположением проводов по квадрату для симметричного режима, которые на интервале периода 0,02 с показаны на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что для синусоидального тока напряжённости магнитного поля от жил проводов четырёхжильного трёхфазного (A, B, C, N , кв) кабеля и их суммарные мгновенные значения сохраняют синусоидальный характер.

Круговая диаграмма, в соответствии с геометрической моделью расположения проводов кабеля, показанных на рис. 2, изменения действующих значений суммарной напряжённости магнитного поля $H_{\delta\Sigma}$, А/м, в окружающем пространстве вокруг трёхфазного четырёхжильного кабеля (A, B, C, N , кв) с расположением проводов по квадрату для симметричного режима показана на рис. 4.

Из рис. 4 следует, что наибольшие значения напряжённости магнитного поля $H_{\delta\Sigma}$, (A, B, C, N , кв), А/м, в пространстве вокруг трёхфазного четырёхжильного кабеля с расположением проводов по квадрату для симметричного режима присутствуют в контрольных точках вдоль оси расположения жил провода (на рис. 2 – по оси Y).

В итоге получено выражение для определения максимального действующего значения суммарной напряжённости магнитного поля $H_{\delta\Sigma}$, (A, B, C, N , кв), А/м, от трёхфазного четырёхжильного кабеля с расположением проводов по квадрату для симметричного режима в окружающем пространстве, которое имеет следующий вид:

$$H_{\delta\Sigma}(A, B, C, N, \text{кв}) = \frac{1,224 \cdot I_\delta \cdot d}{2 \cdot \pi \cdot R_{0,i}^2}, \text{ А/м}, \quad (19)$$

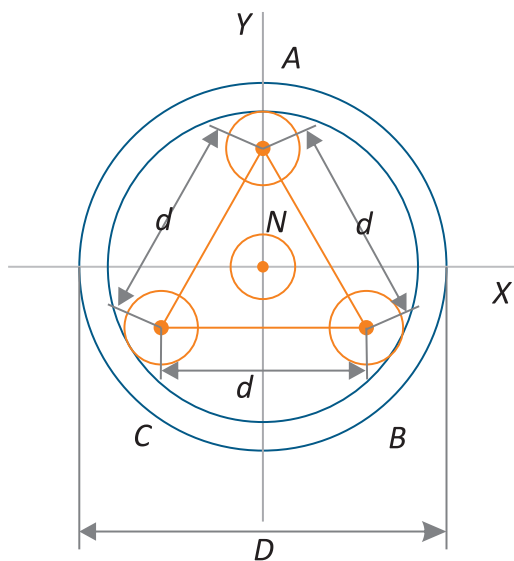


Рис. 5. Геометрическая модель расположения проводов (A, B, C, тр, N) четырёхжильного трёхфазного кабеля для расчёта $H_{\delta\Sigma}$ А/м, в окружающем пространстве

где I_{δ} – действующее значение тока, А;
 d – расстояния между центрами проводов кабеля, м;
 $R_{\delta,i}$ – расстояния между контрольной точкой i окружающего пространства и центром O кабеля, м.
 Для трёхфазных кабелей низкого напряжения возможны и другие способы расположения токоведущих и вспомогательных жил.

Например, одним из способов является расположение фазных проводов A, B, C по треугольнику, а нулевого провода N в центре четырёхжильного трёхфазного кабеля, как показано по геометрической модели на рис. 5.

При этом, изменения действующих значений суммарной напряжённости магнитного поля $H_{\delta\Sigma}$ А/м, в окружающем пространстве вокруг четырёхжильного трёхфазного кабеля (A, B, C, тр, N) с расположением силовых проводов по треугольнику для симметричного режима, будут иметь вид, как показано на рис. 6.

Из рис. 6 следует, что максимальные действующие значения напряжённости магнитного поля $H_{\delta\Sigma m}(A, B, C, тр, N)$, А/м, в пространстве вокруг четырёхжильного трёхфазного кабеля с расположением проводов по треугольнику для симметричного режима присутствуют в контрольных точках напротив расположения силовых проводов кабеля.

В итоге получено выражение для определения максимального действующего значения суммарной напряжённости магнитного поля $H_{\delta\Sigma m}(A, B, C, тр, N)$, А/м, от трёхфазного четырёхжильного кабеля с расположением проводов по треугольнику для симметричного режима в окружающем пространстве, которое имеет следующий вид:

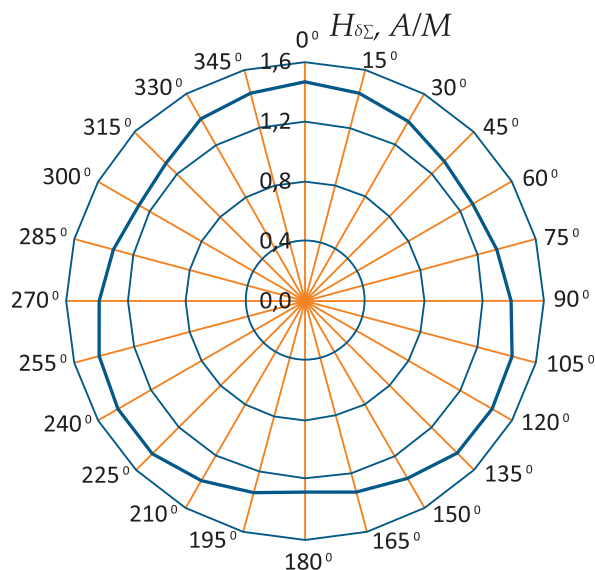


Рис. 6. Круговая диаграмма изменения $H_{\delta\Sigma}$ А/м, в окружающем пространстве вокруг четырёхжильного трёхфазного кабеля (A, B, C, тр, N) с расположением проводов по треугольнику для симметричного режима с токами: $I_{A,\delta} = I_{B,\delta} = I_{C,\delta} = 10$ А, при $d = 0,01$ м, $R_{\delta,i} = 0,1$ м

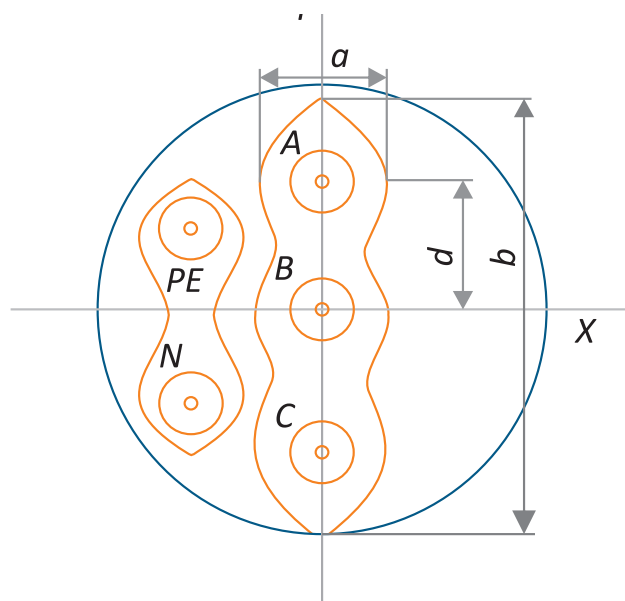


Рис. 7. Геометрическая модель расположения проводов (A, B, C, ряд, N, PE) пятижильного трёхфазного кабеля для расчёта $H_{\delta\Sigma}$ А/м, в окружающем пространстве

$$H_{\delta\Sigma m}(A, B, C, тр, N) = \frac{0,914 \cdot I_{\delta} \cdot d}{2 \cdot \pi \cdot R_{\delta,i}^2}, \text{ А/м} \quad (20)$$

Ещё одним из способов расположения проводов трёхфазной сети низкого напряжения является расположение фазных проводов A, B, C в ряд, а нулевого провода N и провода PE в соседнем ряду в виде пятижильного трёхфазного кабеля, как показано по геометрической модели на рис. 7.

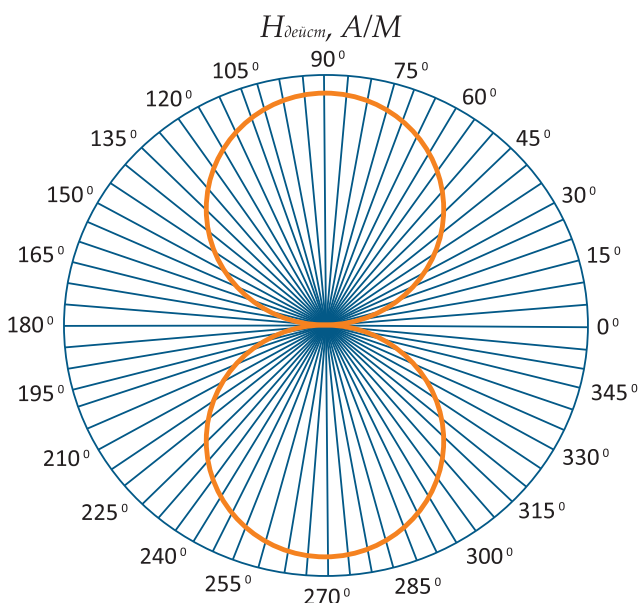


Рис. 8. Круговая диаграмма изменения $H_{\delta\Sigma}$, А/м, в окружающем пространстве вокруг пятижильного трёхфазного кабеля (А,В,С,ряд, N, PE) с расположением силовых проводов в ряд для симметричного режима с токами:

$$I_{A,\delta} = I_{B,\delta} = I_{C,\delta} = 10 \text{ А, при } d = 0,01 \text{ м, } R_{0,i} = 0,1 \text{ м}$$

При этом, в соответствии с геометрической моделью расположения проводов пятижильного трёхфазного кабеля по осям координат прямоугольной системы (рис. 7), круговая диаграмма изменения действующих значений суммарной напряжённости магнитного поля $H_{\delta\Sigma}$, А/м, в окружающем пространстве вокруг пятижильного трёхфазного кабеля с расположением силовых проводов в ряд для симметричного режима, будет иметь вид, как показано на рис. 8.

Из рис. 8 следует, что наибольшие значения напряжённости магнитного поля $H_{\delta\Sigma m}(A, B, C, \text{ ряд}, N, PE)$, А/м, в пространстве вокруг пятижильного трёхфазного кабеля с расположением силовых проводов для симметричного режима присутствуют в контрольных точках вдоль расположения силовых проводов кабеля.

В итоге получено выражение для определения максимального действующего значения суммарной напряжённости магнитного поля $H_{\delta\Sigma m}(A, B, C, \text{ ряд}, N, PE)$, А/м, от пятижильного трёхфазного кабеля с расположением силовых проводов в ряд для симметричного режима в окружающем пространстве, которое имеет следующий вид:

$$H_{\delta\Sigma m}(A, B, C, \text{ ряд}, N, PE) = \frac{1,744 \cdot I_{\delta} \cdot d}{2 \cdot \pi \cdot R_{0,i}^2}, \text{ А/м} \quad (21)$$

Полученные аналитические выражения для максимальных действующих значений суммарных напряжённостей магнитного поля от токов трёхфазных кабелей для симметричного режима, а также виды характера изменения суммарных напряжённостей маг-

нитного поля в окружающем круговом пространстве от расположения проводов кабелей, позволят оценивать условия электромагнитной безопасности (ЭМБ) для обслуживающего персонала (о.п.) и условия ЭМС для технических средств по магнитным полям от токов многожильных кабелей с учётом допустимых расстояний в пространстве вокруг одиночных трёхфазных кабелей низкого напряжения в системах электроснабжения (СЭС) производственных, офисных, жилых помещений, и учитывать их при анализе существующей электромагнитной обстановки в помещениях и при проектировании СЭС.

Список литературы

1. Салтыков В.М., Салтыков А.В. Исследования электромагнитных полей офисных и жилых помещений с компьютерной техникой и от электрической сети. – Deutschland, Saarbrucken, LAP LAMBERT Academic Publishing. 2013. – 128 с.
2. Воробьёв А.Ю. Электроснабжение компьютерных и телекоммуникационных систем. – М.: Эко-Трендз, 2002.
3. Салтыков В.М., Копичникова И.В. Исследования электромагнитной обстановки в системе электроснабжения офисного здания // Технологии электромагнитной совместимости. – 2011. – № 1 (36). – С. 19–24
4. Правила устройства электроустановок. Раздел 1, 7. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.
5. ГОСТ Р 50571.15–97 (МЭК 364-5-52–93). Электроустановки зданий. Часть 5. Выбор и монтаж электрооборудования. Глава 52. Электропроводки. – М.: Издательство стандартов, 1997. – 216 с.
6. 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 года, № 60. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902060222> (дата обращения: 14.04.2020).
7. 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.
8. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебник. – 10-е изд., стереотипное. – М.: Гардарики, 2003.
9. Защита биосферы от влияния электромагнитных полей: учеб. пособие для вузов / Е.С. Колечицкий, В.А. Романов, В.Г. Карташов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 353 с.