

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ НА ПЕРСОНАЛ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

В статье представлена методика оценки воздействия электрических полей промышленной частоты на персонал в электрических сетях.

Ключевые слова: электромагнитное поле; напряженность электрического поля; напряженность магнитного поля; поля промышленной частоты; защита персонала в электрических сетях.

В настоящее время в России идет процесс совершенствования нормирования безопасных для здоровья человека напряженностей электрических (ЭП) и магнитных полей (МП) промышленной частоты (ПЧ). Действующие в отечественных электрических сетях нормы [1] регламентируют воздействие ЭП ПЧ величиной напряженности электрического поля E , кВ/м, а МП ПЧ величиной напряженности магнитного поля H , А/м. При этом нормы [1] основываются на допустимых значениях плотности тока, наводимого полями промышленной частоты в тканях организма.

Следует подчеркнуть, что проблема достоверной оценки воздействия ЭП и МП ПЧ на персонал в действующих электроустановках сохраняет свою актуальность в связи с практически полным отсутствием индивидуальных средств такой оценки. Одним из способов решения данной проблемы может стать разработка системы мониторинга индивидуального воздействия ЭП и МП ПЧ на персонал. В основу такой системы может быть положен метод расчета дозы низкочастотных ЭП и МП [2], однако для его практической реализации необходимы средства измерения уровней электрического и магнитного поля промышленной частоты.

Для измерения напряженности магнитного поля разработано достаточное количество систем [3], которые позволяют с достаточной степенью точности решать задачи оценки уровней МП. В отличие от магнитного, электрическое поле промышленной частоты существенно искажается проводящими объектами, в том числе и телом человека, поэтому задача создания индивидуального средства оценки воздействия ЭП ПЧ, обеспечивающего необходимую точность, до сих пор практически не решена. Принцип оценки воздействия электрического поля на человека по величине напряженности является не самым эффективным, так как не учитывает возможность искажения картины ЭП оператором, производящим измерения.

Для решения проблемы количественной оценки воздействия ЭП на человека предлагается оценивать среднюю напряженность ЭП вдоль тела человека в реальном времени. С этой целью предлагается измерительная система нового типа, где тело человека, применительно к которому оценивается воздействие поля, является рабочей частью измерительной системы.

Для пояснения физических принципов работы нового измерителя воздействия ЭП рассмотрим схему рис.1

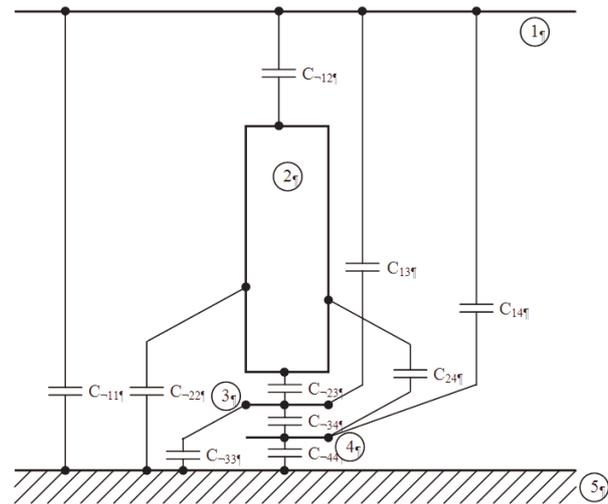


Рис.1. Упрощенная схема расположения элементов измерителя воздействия ЭП

На рис.1. представлены: 1 — источник электрического поля, которым может являться часть электроустановки, находящаяся под напряжением; 2 — объект на котором измеряется средняя напряженность ЭП, например человек. 3 — первая пластина емкостного датчика; 4 — вторая пластина емкостного датчика; 5 — земля.

Для объектов системы (рис.1.) используем следующие допущения (рис.2.):

- расстояние между объектами 2 и 3 ℓ_{23} много меньше линейных размеров объекта 3 ℓ_3 и объекта 2 ℓ_2 ;
- расстояние между объектами 3 и 4 ℓ_{34} много меньше линейных размеров объекта 3 ℓ_3 и объекта 4 ℓ_4 ;
- расстояние между объектами 4 и 5 ℓ_{45} много меньше линейных размеров объекта 4 ℓ_4 ;
- объекты 1, 2, 3, 4 и 5 являются идеальными проводниками.
- все объекты находятся в среде с абсолютной диэлектрической проницаемостью ϵ_a ;
- электрическое поле в системе создаётся объектом 1, имеющим заряд Q_1 , и находящимся под потенциалом φ_1 ;

Запишем для системы (рис.1.) третью группу уравнений Максвелла [4]:

$$\begin{cases} Q_1 = \varphi_1 \cdot C_{11} + (\varphi_1 - \varphi_2) \cdot C_{12} + (\varphi_1 - \varphi_3) \cdot C_{13} + (\varphi_1 - \varphi_4) \cdot C_{14} \\ Q_2 = (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot C_{21} + \varphi_2 \cdot C_{22} + (\varphi_2 - \varphi_3) \cdot C_{23} + (\varphi_2 - \varphi_4) \cdot C_{24} , \\ Q_3 = (\varphi_3 - \varphi_1) \cdot C_{31} + (\varphi_3 - \varphi_2) \cdot C_{32} + \varphi_3 \cdot C_{33} + (\varphi_3 - \varphi_4) \cdot C_{34} \\ Q_4 = (\varphi_4 - \varphi_1) \cdot C_{41} + (\varphi_4 - \varphi_2) \cdot C_{42} + (\varphi_4 - \varphi_3) \cdot C_{43} + \varphi_4 \cdot C_{44} \end{cases} \quad (1)$$

где Q_1, Q_2, Q_3 и Q_4 — заряды на поверхности объектов 1, 2, 3 и 4 соответственно; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ и φ_4 — потенциалы объектов 1, 2, 3 и 4; C_{11}, C_{22}, C_{33} и C_{44} — собственные частичные емкости объектов 1, 2, 3 и 4; $C_{12} = C_{21}, C_{13} = C_{31}, C_{14} = C_{41}, C_{23} = C_{32}, C_{24} = C_{42}$ и $C_{34} = C_{43}$ — взаимные частичные емкости между соответствующими объектами.

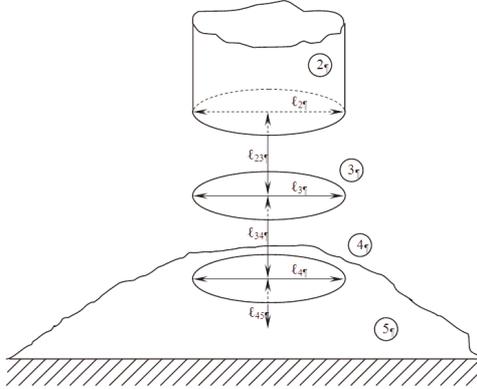


Рис.2. Пространственные характеристики исследуемой системы.

С учетом исходных допущений система (1) примет вид:

$$\begin{cases} Q_1 = \varphi_1 \cdot C_{11} + (\varphi_1 - \varphi_2) \cdot C_{12} + (\varphi_1 - \varphi_3) \cdot C_{13} + (\varphi_1 - \varphi_4) \cdot C_{14} \\ 0 = (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot C_{21} + \varphi_2 \cdot C_{22} + (\varphi_2 - \varphi_3) \cdot C_{23} + (\varphi_2 - \varphi_4) \cdot C_{24} \\ 0 = (\varphi_3 - \varphi_1) \cdot C_{31} + (\varphi_3 - \varphi_2) \cdot C_{32} + \varphi_3 \cdot C_{33} + (\varphi_3 - \varphi_4) \cdot C_{34} \\ 0 = (\varphi_4 - \varphi_1) \cdot C_{41} + (\varphi_4 - \varphi_2) \cdot C_{42} + (\varphi_4 - \varphi_3) \cdot C_{43} + \varphi_4 \cdot C_{44} \end{cases} \quad (2)$$

Распределим в исследуемой схеме (рис.1.) потоки вектора электрического смещения, входящие в объект 2 и выходящие из него (рис.3.). Для потока Ψ_{12} , входящего в объект 2, в соответствии с теоремой Гаусса [4] можно записать следующее равенство:

$$\Psi_{12} = \Psi_{23} + \Psi_{25}, \quad (3)$$

где Ψ_{23} — поток вектора электрического смещения, выходящий из объекта 2 и входящий в объект 3; Ψ_{25} — поток вектора электрического смещения, выходящий из объекта 2 и входящий в объект 5 (рис.3.) В связи с тем, что согласно исходным допущениям, расстояния l_{23}, l_{34} и l_{45} много меньше линейных размеров объектов l_2, l_3 и l_4 , то можно полагать, что

$$\Psi_{23} = \Psi_{34} = \Psi_{45}. \quad (4)$$

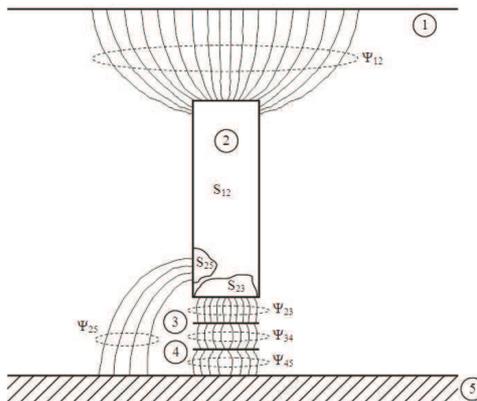


Рис.3. Распределение потоков вектора электрического смещения в исследуемой системе.

Представим взаимные емкости системы (2) следующим образом:

$$\begin{cases} C_{12} = \frac{\Psi_{12}}{\varphi_1 - \varphi_2}; & C_{13} = \frac{\Psi_{13}}{\varphi_1 - \varphi_3}; & C_{14} = \frac{\Psi_{14}}{\varphi_1 - \varphi_4}; \\ C_{21} = \frac{\Psi_{21}}{\varphi_2 - \varphi_1}; & C_{23} = \frac{\Psi_{23}}{\varphi_2 - \varphi_3}; & C_{24} = \frac{\Psi_{24}}{\varphi_2 - \varphi_4}; \\ C_{31} = \frac{\Psi_{31}}{\varphi_3 - \varphi_1}; & C_{32} = \frac{\Psi_{32}}{\varphi_3 - \varphi_2}; & C_{34} = \frac{\Psi_{34}}{\varphi_3 - \varphi_4}; \\ C_{41} = \frac{\Psi_{41}}{\varphi_4 - \varphi_1}; & C_{42} = \frac{\Psi_{42}}{\varphi_4 - \varphi_2}; & C_{43} = \frac{\Psi_{43}}{\varphi_4 - \varphi_3}. \end{cases} \quad (5)$$

Подставив (5) в (2), получим:

$$\begin{cases} Q_1 = \varphi_1 \cdot C_{11} + \Psi_{12} + \Psi_{13} + \Psi_{14}; \\ 0 = -\Psi_{12} + \varphi_2 \cdot C_{22} + \Psi_{23} + \Psi_{24}; \\ 0 = -\Psi_{13} - \Psi_{23} + \varphi_3 \cdot C_{33} + \Psi_{34}; \\ 0 = -\Psi_{14} - \Psi_{24} - \Psi_{34} + \varphi_4 \cdot C_{44}. \end{cases} \quad (6)$$

Исходя из конфигурации (Рис.2.), исходных условий и (4) обозначим поток вектора электрического смещения, проходящий через объекты 2, 3 и 4 как

$$\Psi_{\partial} = \Psi_{13} = \Psi_{14} = \Psi_{24} = \Psi_{23} = \Psi_{34} = \Psi_{45}. \quad (7)$$

Выразим из третьего и четвертого уравнений (6) потенциалы φ_3 и φ_4 :

$$\begin{cases} \varphi_3 = \frac{\Psi_{\partial}}{C_{33}} \\ \varphi_4 = \frac{3 \cdot \Psi_{\partial}}{C_{44}} \end{cases}$$

С учётом того, что $C_{33} = \frac{C_{34} \cdot C_{44}}{C_{34} + C_{44}}$, разность потенциалов между объектами 4 и 3 определяется как

$$\varphi_3 - \varphi_4 = \Psi_{\partial} \cdot \left(\frac{C_{44} - 2 \cdot C_{34}}{C_{44} \cdot C_{34}} \right). \quad (8)$$

Исходя из (3) и (7) можно записать:

$$\Psi_{\partial} = \Psi_{12} - \Psi_{25} \quad (9)$$

С учётом теоремы Гаусса выражение (9) примет вид

$$\Psi_{\partial} = \varepsilon_a \cdot \int_{S_{12}} E \cdot dS - \varepsilon_a \cdot \int_{S_{25}} E \cdot dS,$$

или

$$\Psi_{\partial} = \varepsilon_a \cdot \int_{S_{12} - S_{25}} E \cdot dS, \quad (10)$$

где S_{12} — часть площади объекта 2, в которую входит поток вектора электрического смещения Ψ_{12} , определяющий воздействие электрического поля на объект 2; S_{12} — часть площади объекта 2, из которого выходит поток вектора электрического смещения Ψ_{25} , который не оказывает влияния на разность потенциалов (8).

Подставив (10) в (8) и получим:

$$\varphi_3 - \varphi_4 = \left(\frac{C_{44} - 2 \cdot C_{34}}{C_{44} \cdot C_{34}} \right) \cdot \varepsilon_a \cdot \int_{S_{12}-S_{25}} E \cdot dS \cdot \quad (11)$$

Для обеспечения точности при оценке воздействия ЭП на объект 2 необходимо конструктивно обеспечить следующее условие:

$$S_{2-5} \rightarrow 0.$$

Тогда выражение (11) можно переписать в виде:

$$\varphi_3 - \varphi_4 = \left(\frac{C_{44} - 2 \cdot C_{34}}{C_{44} \cdot C_{34}} \right) \cdot \varepsilon_a \cdot \int_{S_{12}} E \cdot dS \cdot \quad (12)$$

Преобразуем выражение (12) в виде:

$$\varphi_3 - \varphi_4 = \left(\frac{C_{44} - 2 \cdot C_{34}}{C_{44} \cdot C_{34}} \right) \cdot \varepsilon_a \cdot S_{12} \cdot \frac{\int E \cdot dS}{S_{12}}, \quad (13)$$

где величина $\frac{\int E \cdot dS}{S_{12}}$ представляет собой среднее значение напряженности электрического поля вдоль поверхности тела человека E_c . Тогда для (13) можно записать:

$$\varphi_3 - \varphi_4 = \left(\frac{C_{44} - 2 \cdot C_{34}}{C_{44} \cdot C_{34}} \right) \cdot \varepsilon_a \cdot S_{12} \cdot E_c \cdot \quad (14)$$

Полученная разность потенциалов на датчиках (объекты 3 и 4) позволяет определить среднее значение напряженности ЭП вдоль поверхности объекта 2 (человека) и оценить реальное воздействие ЭП ПЧ.

Предполагается, что для обеспечения исходных допущений датчики разности потенциалов должны иметь форму пластин и располагаться в подошве электроизолирующих ботинок.

В целом, для практической реализации разработанной методики потребует решения следующих вопросов:

- разработка конфигурации измерительной системы;
- оценка погрешностей измерительной системы и разработка мероприятий по их минимизации;
- разработка и апробация средства измерения, способного в реальном времени обрабатывать результаты измерений.

Разработанная на основе (14) измерительная система может быть интегрирована в систему индивидуального мониторинга воздействия ЭП и МП ПЧ.

Литература

1. Электромагнитные поля в производственных условиях : СанПин 2.2.4.119-03. — М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. — 24 с.
2. Курбацкий, В. Г. Использование аппаратно-программного комплекса «Гамма-2» для оценки количественного воздействия эллиптически поляризованных полей на персонал в электрических сетях / В. Г. Курбацкий, А. В. Струмяк // Сб. докл. X Рос. науч.-техн. конф. по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности «ЭМС-2008». — СПб : ВИТУ, 2008. — С. 733.
3. Курбацкий, В. Г. Приборы для оценки электромагнитной обстановки на объектах электроэнергетики / В. Г. Курбацкий, А. В. Струмяк // Промышленная энергетика. — 2006. — № 8. — С. 12 — 17.
4. Говорков, В. А. Электрические и магнитные поля / В. А. Говорков. — изд. 3-е, перераб. и доп. — М. : Энергия, 1970. — 488 с.