

УДК 621.3.013

ДИПОЛЬНАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

В.Ю. Розов, докт. техн. наук, **Д.Е. Пелевин**, канд. техн. наук,
 Научно-технический центр магнетизма технических объектов НАН Украины,
 ул. Индустриальная, 19, Харьков, 61106, Украина.

Рассмотрены принципы построения дипольной математической модели внешнего магнитного поля трехфазной электрической цепи. Предложен метод определения параметров дипольной модели магнитного поля электрической цепи на основе уравнения ее мощности. Обоснована необходимость использования трехконтурной модели трехфазной трехпроводной электрической цепи ограниченной протяженности при моделировании ее дипольного магнитного поля для общего случая и выполнен синтез упрощенной двухконтурной модели этой цепи для случая симметрии питающих напряжений. Библ. 6, рис. 2.

Ключевые слова: магнитное поле, дипольная модель, трехфазная электрическая цепь, контур тока.

Введение. При решении проблем защиты людей от негативного действия техногенного магнитного поля (МП) частотой 50 Гц возникает необходимость математического моделирования внешнего МП различных электроэнергетических объектов, в том числе, линий электропередачи (ЛЭП) [5] и распределительных устройств [1, 3], основными источниками МП которых являются токовые контуры их трехфазных трехпроводных электрических цепей. Когда расстояние от источников МП до жилых либо рабочих зон в 2–3 раза превышает протяженность их токовых контуров, становится целесообразным использование дипольного представления МП [2], позволяющего при ограниченной погрешности упростить как моделирование МП, так и инженерные расчеты на его основе.

Так, использование дипольной модели источников МП целесообразно в случае моделирования МП трехфазных микроконтуров, на которые условно разбивается исследуемый участок трехфазной трехпроводной ЛЭП при применении мультидипольной модели его МП [4], а также в случае моделирования внешнего МП трехфазных распределительных устройств [1, 3], которые расположены на определенном удалении от рабочих зон и содержат короткие токопроводы.

При дипольном моделировании источников МП указанных объектов они могут быть представлены простейшими трехфазными электрическими цепями ограниченной протяженности. В этом случае МП электрической цепи может быть получено как суперпозиция дипольного МП ее независимых токовых контуров. Каждый из контуров как источник МП характеризуется дипольным магнитным моментом $\dot{\vec{m}}_i$, который определяется величиной контурного тока \dot{I}_i и связанной с ним площадью контура \vec{s}_i . Тогда дипольная математическая модель электрической цепи объекта описывается соотношением [4]

$$\dot{\vec{H}}(P) = \sum_{i=1}^{\alpha} \left(-grad \frac{(\dot{\vec{m}}_i, \vec{R}_i)}{4\pi R_i^3} \right); \quad \dot{\vec{m}}_i = \dot{I}_i \vec{s}_i, \quad (1,2)$$

где \vec{R}_i – радиус-вектор, направленный из геометрического центра i -го контура в точку наблюдения P ; α – количество контуров тока цепи, участвующих в формировании ее МП, которые в дальнейшем будем называть рабочими контурами цепи.

Для дипольного моделирования МП необходимо определить параметры (2) рабочих контуров тока цепи. Исходя из общих соображений, можно предположить, что для моделирования МП трехфазной трехпроводной электрической цепи в соответствии с (1) количество независимых рабочих контуров тока α должно соответствовать количеству фаз цепи и равняться трем. Однако, теоретическое обоснование принципа определения рабочих контуров тока, формирующих МП трехфазной электрической цепи, в настоящее время отсутствует. На практике же используется упрощенная двухконтурная математическая модель источников МП трехфазной трехпроводной электрической цепи [1, 3], которая не имеет корректного теоретического обоснования и сформулированных условий ее применения.

Настоящая статья посвящена разработке метода определения параметров дипольной математической модели МП трехфазной трехпроводной электрической цепи и условий ее применения с учетом особенностей режима ее работы.

Метод определения параметров дипольной модели магнитного поля электрической цепи. Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из элементарного плоского контура переменного тока \dot{I}_i площадью \bar{s}_i , источника с напряжением \dot{U}_i частотой 50 Гц и нагрузки. Протекание тока в этом контуре сопровождается передачей электрической энергии от источника к нагрузке, скорость которой характеризуется электрической мощностью \dot{S}_i контура [5]

$$\dot{S}_i = \dot{U}_i \dot{I}_i. \quad (3)$$

При этом величина магнитного момента (2) рассматриваемого элементарного контура может быть выражена через его электрическую мощность (3)

$$\dot{m}_i = \frac{\dot{S}_i}{\dot{U}_i} \bar{s}_i. \quad (4)$$

Из соотношения (4) следует, что величина магнитного момента \dot{m}_i элементарного контура с током, которая определяет его магнетизм, пропорциональна электрической мощности этого контура \dot{S}_i , что позволяет определять параметры (2) контура по параметрам его электрической мощности (3).

Перейдем теперь от элементарного контура тока к многоконтурной электрической цепи и предположим, что она содержит α независимых контуров тока. Охарактеризуем мощность этой электрической цепи значением \dot{S}_Σ , представляющим собой сумму мощностей отдельных независимых замкнутых контуров тока этой цепи

$$\dot{S}_\Sigma = \sum_{i=1}^{\alpha} \dot{S}_i = \sum_{i=1}^{\alpha} (\dot{I}_i \dot{U}_i). \quad (5)$$

Тогда, с учетом проведенного выше анализа, можно утверждать, что все независимые контуры тока многоконтурной цепи, входящие в уравнение мощности цепи (5), являются рабочими контурами этой цепи и создают МП в соответствии с (1), (2). При этом определение параметров рабочих контуров тока электрической цепи (2), участвующих в формировании ее МП (1), сводится к выявлению всех контуров тока, входящих в уравнение мощности (5) этой цепи.

Таким образом, метод определения параметров дипольной модели МП электрической цепи заключается в выборе тех параметров модели МП, которые входят в уравнение мощности этой цепи. Реализация метода должна осуществляться на основе анализа уравнения мощности электрической цепи, при котором напряжение \dot{U}_i из (5) определяет соответствующий i -й рабочий контур с площадью \bar{s}_i для (2), а ток \dot{I}_i из (5) – рабочий ток \dot{I}_i для (2).

Дипольная модель магнитного поля трехфазной трехпроводной электрической цепи. Проведем теперь анализ модели МП простейшей трехфазной трехпроводной электрической цепи для общего случая, включающего несимметричный режим ее работы. Электрическая схема трехфазной электрической цепи показана на рис. 1. Электрическая цепь содержит источник электрической энергии (И), характеризуемый линейными напряжениями \dot{U}_L , ЛЭП, характеризуемую линейными (\dot{I}_L) и фазными (\dot{I}_Φ) токами, и нагрузку (Н), причем

$$\dot{U}_L \in (\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}); \quad \dot{I}_L \in (\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C); \quad \dot{I}_\Phi \in (\dot{I}_{AB}, \dot{I}_{BC}, \dot{I}_{CA}); \quad I_\Phi = I_L / \sqrt{3}. \quad (6)$$

Дальнейший анализ проводим при следующих допущениях: токи и напряжения в цепи строго гармоничны; провода ЛЭП взаимно параллельны и образуют плоские контуры тока; взаимное электромагнитное влияние проводов ЛЭП и внешней среды не учитывается; площади токовых контуров источника электрической энергии И и нагрузки Н (рис. 1) равны нулю; при определении мощности и магнитных моментов отдельных фаз цепи предполагается, что каждая из фаз содержит независимый контур тока.

Отметим также, что приведенные на рис. 1 конкретные схемы соединения И и Н («треугольник» либо «звезда») не являются существенными для последующего анализа, так как при необходимости они могут быть преобразованы [6] в другие эквивалентные для режима токов цепи схемы соединения И и Н.

С учетом принятых выше допущений запишем уравнение мощности (5) для электрической цепи (рис. 1), учитывая, что электрическая энергия в ней передается токами $\dot{I}_{AB}, \dot{I}_{BC}, \dot{I}_{CA}$

$$\dot{S}_{\Sigma} = \dot{S}_{AB} + \dot{S}_{BC} + \dot{S}_{CA} = \dot{U}_{AB}\dot{I}_{AB} + \dot{U}_{BC}\dot{I}_{BC} + \dot{U}_{CA}\dot{I}_{CA}. \quad (7)$$

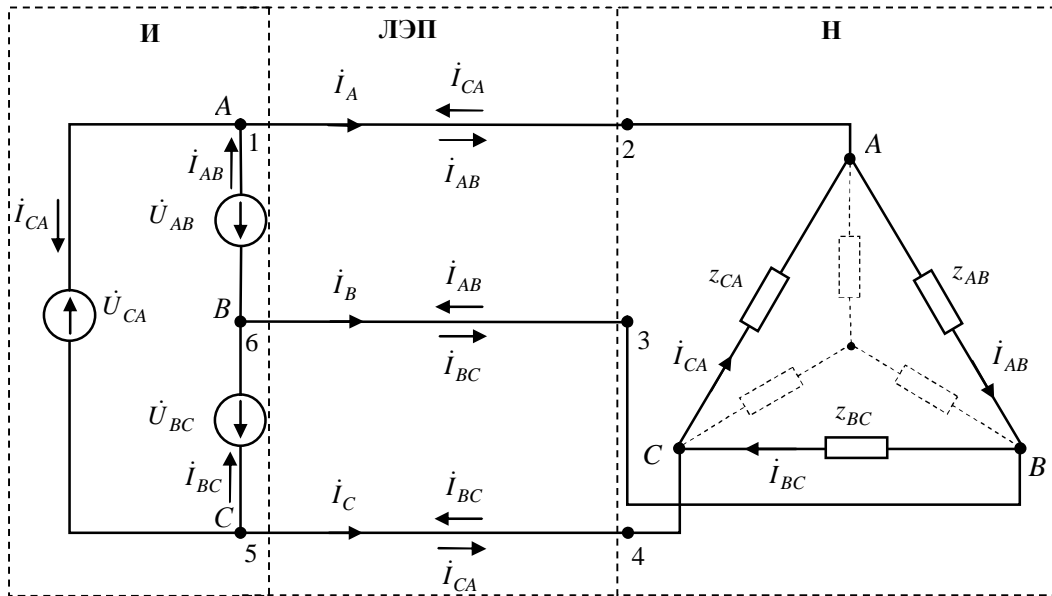


Рис. 1

На основании предложенного метода определим параметры дипольной модели МП рассматриваемой электрической цепи. В соответствии с (7) модель должна содержать три независимых рабочих контура, которые характеризуются площадью \bar{s}_{AB} (контур 1-2-3-6-1) и током \dot{I}_{AB} , площадью \bar{s}_{BC} (контур 6-3-4-5-6) и током \dot{I}_{BC} , площадью \bar{s}_{CA} (контур 1-5-4-2-1-5) и током \dot{I}_{CA} . Тогда на основании (1) дипольная математическая модель МП простейшей трехфазной трехпроводной электрической цепи для рассматриваемого общего случая определяется соотношением

$$\dot{H}(P) = -grad \frac{([\dot{I}_{AB}\bar{s}_{AB}], \bar{R}_{AB})}{4\pi R_{AB}^3} - grad \frac{([\dot{I}_{BC}\bar{s}_{BC}], \bar{R}_{BC})}{4\pi R_{BC}^3} - grad \frac{([\dot{I}_{CA}\bar{s}_{CA}], \bar{R}_{CA})}{4\pi R_{CA}^3}, \quad (8)$$

или с учетом (2)

$$\dot{H}(P) = -grad \frac{(\dot{m}_{AB}, \bar{R}_{AB})}{4\pi R_{AB}^3} - grad \frac{(\dot{m}_{BC}, \bar{R}_{BC})}{4\pi R_{BC}^3} - grad \frac{(\dot{m}_{CA}, \bar{R}_{CA})}{4\pi R_{CA}^3}, \quad (9)$$

которое моделирует схему расположения магнитных моментов $\dot{m}_{AB}, \dot{m}_{BC}, \dot{m}_{CA}$ этой цепи.

Схема расположения магнитных моментов рассмотренной трехконтурной модели при размещении всех рабочих контуров цепи в одной горизонтальной плоскости показана на рис. 2, а.

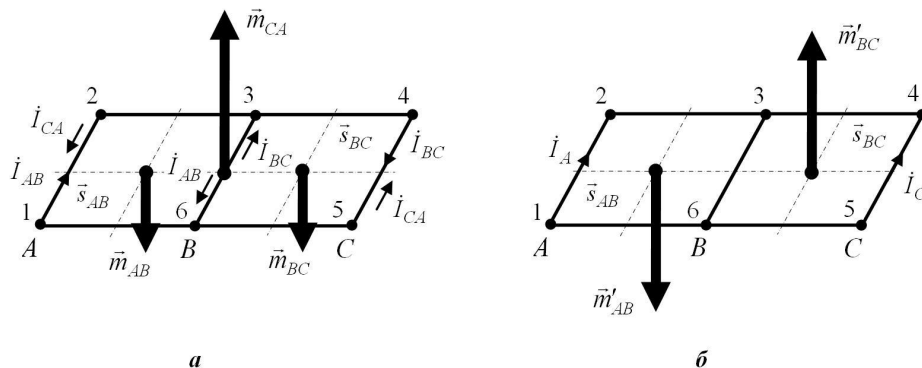


Рис. 2

Дипольная модель магнитного поля при симметрии питающих напряжений. Для электрических цепей реальных объектов, в том числе ЛЭП общего назначения, как правило, выполняется условие

$$\dot{S}_H > \dot{S}_H, \quad (10)$$

где \dot{S}_H – установленная мощность источника И (рис. 1); \dot{S}_H – мощность нагрузки ЛЭП. При этом питающие напряжения \dot{U}_L образуют симметричную систему и удовлетворяют условию [6]

$$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0. \quad (11)$$

Определим параметры дипольной модели МП электрической цепи (рис. 1) при выполнении условия (11). Анализ проведем с учетом следующих соотношений между линейными и фазными токами, определенными на основе 1-го закона Кирхгофа для узлов 1,5,6:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}, \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}, \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}. \quad (12)$$

Преобразуя (7) с учетом (11) и (12), получим уравнение мощности цепи для случая симметрии питающих напряжений

$$\dot{S}_\Sigma = \dot{I}_{AB}\dot{U}_{AB} + \dot{I}_{BC}\dot{U}_{BC} + \dot{I}_{CA}(-\dot{U}_{AB} - \dot{U}_{BC}) = \dot{U}_{AB}\dot{I}_A + \dot{U}_{BC}(-\dot{I}_C). \quad (13)$$

Тогда, в соответствии с предложенным методом и на основании полученного уравнения мощности (13) цепи, модель дипольных источников МП для данной цепи в случае симметрии питающих напряжений может быть построена на основе двух токовых контуров ($\alpha=2$). Эти контуры характеризуются площадью \bar{s}_{AB} (контур 1-2-3-6-1) с током \dot{I}_A и площадью \bar{s}_{BC} (контур 6-3-4-5-6) с током $-\dot{I}_C$, которые для рассматриваемого случая являются рабочими и могут использоваться в качестве параметров (2) математической модели МП.

На основании проведенного выше анализа и в соответствии с (1) дипольная математическая модель МП трехфазной трехпроводной электрической цепи для случая симметрии питающих напряжений может быть выражена соотношением

$$\dot{H}(P) = -grad \left(\frac{[\dot{I}_A \bar{s}_{AB}], \bar{R}_{AB}}{4\pi R_{AB}^3} \right) - grad \left(\frac{[-\dot{I}_C \bar{s}_{BC}], \bar{R}_{BC}}{4\pi R_{BC}^3} \right), \quad (14)$$

или с учетом (2):

$$\dot{H}(P) = -grad \left(\frac{[\dot{m}'_{AB}, \bar{R}_{AB}]}{4\pi R_{AB}^3} \right) - grad \left(\frac{[\dot{m}'_{BC}, \bar{R}_{BC}]}{4\pi R_{BC}^3} \right); \quad \dot{m}'_{AB} = \dot{I}_A \bar{s}_{AB}; \quad \dot{m}'_{BC} = -\dot{I}_C \bar{s}_{BC}, \quad (15)$$

которое моделирует схему расположения магнитных моментов \dot{m}'_{AB} и \dot{m}'_{BC} этой цепи.

Схема расположения магнитных моментов рассмотренной двухконтурной модели при размещении всех рабочих контуров цепи в одной горизонтальной плоскости представлена на рис. 2, б.

Таким образом, при условии симметрии питающих напряжений в качестве параметров дипольной математической модели МП трехфазной трехпроводной электрической цепи могут быть использованы только два контура передачи электрической энергии, что существенно упрощает моделирование МП (14), (15) в сравнении с базовой моделью (8), (9), использующей три токовых контура.

Заключение. Предложен метод определения параметров дипольной математической модели магнитного поля электрической цепи, который основан на использовании только тех параметров этой цепи, которые входят в уравнение ее электрической мощности.

Теоретически обоснована необходимость использования трехконтурной модели трехфазной трехпроводной электрической цепи при моделировании ее дипольного магнитного поля для общего случая и выполнен синтез упрощенной двухконтурной модели этой цепи для случая симметрии питающих напряжений.

1. Лутиков В.С., Крюкова Н.В., Геляровская О.А., Варшамова И.С., Гиль Л.А., Деркач В.В. Анализ магнитного момента токов трехфазного источника поля // Электротехника и электромеханика. – 2006. – №4. – С. 47–51.

2. Розов В.Ю. Методы снижения внешних магнитных полей энергонасыщенных объектов // Технічна електродинаміка. – 2001. – №1. – С. 16–20.

3. Розов В.Ю., Ерисов А.В., Лутиков В.С. Особенности снижения внешних магнитных полей распределительных устройств и полупроводниковых преобразователей: Препр. НАН Украины. Ин-т электродинамики №791. – К.: 1996. – 46 с.

4. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелевин Д.Е., Пилюгина О.Ю. Магнитное поле линий электропередачи и методы его снижения до безопасного уровня // Технічна електродинаміка. – 2012. – №2. – С. 21–22.

5. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелевин Д.Е., Яковенко В.Н. Исследование магнитного поля высоковольтных линий электропередачи переменного тока // Технічна електродинаміка. – 2012. – №1. – С. 3–9.

6. Ионкин П.А., Мельников Н.А., Даревский А.И., Кухаркин У.С. Теоретические основы электротехники. Часть 1. Основы теории цепей. – М: Высшая школа. – 1965. – 734 с.

УДК 621.3.013

ДИПОЛЬНА МОДЕЛЬ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТРИФАЗНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА

В.Ю. Розов, докт.техн.наук, **Д.Є. Пелєвін**, канд.техн.наук,

Науково-технічний центр магнетизму технічних об'єктів НАН України,

вул. Індустріальна, 19, Харків, 61106, Україна.

Розглянуто принципи побудови дипольної математичної моделі зовнішнього магнітного поля трифазного електричного кола. Запропоновано метод визначення параметрів дипольної моделі магнітного поля електричного кола на основі рівняння його потужності. Обґрунтовано необхідність використання триконтурної моделі трифазного трипровідного електричного кола обмеженої протяжності при моделюванні його дипольного магнітного поля для загального випадку і виконано синтез спрощеної двоконтурної моделі цього кола у випадку симетрії напруг живлення. Бібл. 6, рис. 2.

Ключові слова: магнітне поле, дипольна модель, трифазне електричне коло, контур струму.

THE DIPOLE MODEL OF MAGNETIC FIELD OF THREE-PHASE ELECTRIC CIRCUIT

V.Yu. Rozov, D.Ye. Pelevin,

Science and Technology Center of Magnetism of Technical Objects, National Academy of Sciences of Ukraine,

19 Industrialna st., Kharkiv, 61106, Ukraine.

The principles of construction of dipole mathematical model of external magnetic-field of three-phase electric circuit are considered. To determine the parameters of this dipole model the method based on the equation of power is suggested. The necessity for using three-contour model of three-phase electric circuit model of limited length in general case is grounded. The synthesis of a simplified two-contour model is performed in case of the symmetry of supply voltages. References 6, figures 2.

Key words: the magnetic field, dipole model, three-phase electric circuit, current circuit.

1. Lupikov V.S., Kriukova, N.V., Geliarovskaia O.A., Varshamova I.S., Gil L.A., Derkach V.V. Analysis of the magnetic moment of the currents the three-phase source of field // Elektrotehnika i Elektromekhanika. – 2006. – № 4. – Pp. 47–51. (Rus)

2. Rozov V.Yu. The methods of reducing external magnetic fields of energy-objects // Tekhnichna elektrodynamika. – 2001. – № 1. – Pp. 16–20. (Rus)

3. Rozov V.Yu., Erisov A.V., Lupikov V.S. The features of reducing external magnetic fields of semiconductor switching devices and transducers / Preprint NAN Ukrainy, Instytut Elektrodynamiky № 791. – Kyiv: 1996. – 46 p. (Rus)

4. Rozov V.Yu., Reutskii S.Yu., Pelevin D.Ye., Piliugina O.Yu. The magnetic field of power transmission lines and methods of its mitigation to a safe level // Tekhnichna elektrodynamika. – 2012. – №2. – Pp. 21–22. (Rus)

5. Rozov V.Yu., Reutskii S.Yu., Pelevin D.Ye., Yakovenko V.N. The research of magnetic field of high-voltage AC transmission lines // Tekhnichna elektrodynamika. – 2012. – №1. – Pp. 3–9. (Rus)

6. Ionkin P.A., Melnikov N.A., Darevskii A.I., Kukharkin U.S. Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Part 1. Fundamentals of circuit theory. – Moskva: Vysschaia shkola. – 1965. – 734 p. (Rus)

Надійшла 27.02.2012

Received 27.02.2012