



УДК 519.711.3:631.382.2:669.174

В.Ф. Евдокимов, чл.-кор. НАН Украины,
Е.И. Петрушенко, канд. техн. наук
Ин-т проблем моделирования
в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины
(Украина, 03164, Киев, ул. Генерала Наумова, 15,
тел. (044) 4249160, e-mail: dep_7@voliacable.com)

Интегральные уравнения симметричных составляющих трехмерного магнитного поля статора цилиндрического электромагнитного перемешивателя

Векторная система интегральных уравнений для векторов плотности источников k -й симметричной составляющей (СС) магнитного поля статора цилиндрического трехфазного электромагнитного перемешивателя преобразована к скалярной системе интегральных уравнений (СкСИУ) относительно проекции на оси цилиндрической системы координат векторов плотности источников k -й СС магнитного поля с учетом симметрии по координатам Z, Y, X в проекциях плотностей источников k -й СС магнитного поля статора. Областью определения СкСИУ, полученной после указанных преобразований, является часть поверхности магнитопровода статора, которой принадлежат точки $M(X_M, Y_M, Z_M)$ с координатами $Z_M \geq 0, Y_M \geq 0, X_M \geq 0$. Это позволяет существенно сократить объем вычислений, связанных с составлением матрицы аппроксимирующей алгебраической системы и ее решением.

Векторную систему интегральных уравнений для векторов плотности источников k -й симметричной составляющей (СС) магнитного поля статора цилиндрического трехфазного электромагнитного перемешивателя перетворено в скалярную систему интегральных уравнений (СкСИУ) относительно проекции на оси цилиндрической системы координат векторов плотности источников k -й СС магнитного поля с учетом симметрии по координатам Z, Y, X в проекциях плотности источников k -й СС магнитного поля статора. Область определения СкСИУ, полученную после указанных преобразований, является частью поверхности магнитопровода статора, которой принадлежат точки $M(X_M, Y_M, Z_M)$ с координатами $Z_M \geq 0, Y_M \geq 0, X_M \geq 0$. Это позволяет существенно сократить объем вычислений, связанных с составлением матрицы аппроксимирующей алгебраической системы и ее решением.

Ключевые слова: интегральная модель, трехмерное вращающееся магнитное поле, симметричные составляющие, соотношения симметрии, электромагнитный перемешиватель, магнитопровод, скалярная система интегральных уравнений.

В [1, 2] векторная система интегральных уравнений для векторов плотности источников k -й симметричной составляющей (СС) магнитного поля статора цилиндрического трехфазного электромагнитного перемешивателя

© В.Ф. Евдокимов, Е.И. Петрушенко, 2013

ля (ЭМП) преобразована к скалярной системе интегральных уравнений (СкСИУ) относительно проекции на оси цилиндрической системы координат векторов плотности источников k -й СС магнитного поля. В [3] указанная СкСИУ преобразована с учетом симметрий по координате Z в проекциях плотностей источников k -й СС магнитного поля статора. В [4] полученная в [3] СкСИУ преобразована с учетом соотношений симметрии по координате Y в проекциях на оси цилиндрической системы координат векторов плотности источников k -й СС магнитного поля. Областью определения новой СкСИУ является часть поверхности магнитопровода статора, лежащая выше координатной плоскости XOY и справа от координатной плоскости XOZ , которой принадлежат точки $M(X_M, Y_M, Z_M)$ с координатами $Z_M \geq 0$ и $Y_M \geq 0$.

Теперь преобразуем полученную в [4] СкСИУ с учетом соотношений симметрии по координате X в проекциях на оси цилиндрической системы координат векторов плотности источников k -й СС магнитного поля. Областью определения новой СкСИУ является часть поверхности магнитопровода статора, которой принадлежат точки $M(X_M, Y_M, Z_M)$ с координатами $Z_M \geq 0, Y_M \geq 0, X_M \geq 0$.

Пусть точка $M(X_M, Y_M, Z_M)$ лежит над координатной плоскостью XOY декартовой системы координат XYZ . При этом $Z_M \geq 0$. Точка $M_Z(X_M, Y_M, -Z_M)$ симметрична точке M относительно координатной плоскости XOY . Точка $M_Y(X_M, -Y_M, Z_M)$ симметрична точке M относительно координатной плоскости XOZ . Точка $M_X(-X_M, Y_M, Z_M)$ симметрична точке M относительно координатной плоскости YOZ .

Введем обозначения, которые будем использовать при преобразовании интегрального уравнения (ИУ) для СС магнитного поля:

S_2 — внутренняя боковая поверхность магнитопровода, $S_2 = S_{21} + S_{22}$;

S_{21} — часть поверхности S_2 , которой принадлежит точка M_Z , лежащая под плоскостью XOY ;

S_{22} — часть поверхности S_2 , которой принадлежит точка M , лежащая над плоскостью XOY ;

S_3 (или S_{32}) — верхнее основание поверхности магнитопровода, которому принадлежит точка M ;

S_4 — внешняя боковая поверхность магнитопровода, $S_4 = S_{41} + S_{42}$;

S_{41} — часть поверхности S_4 , которой принадлежит точка M_Z , лежащая под плоскостью XOY ;

S_{42} — часть поверхности S_4 , которой принадлежит точка M , лежащая над плоскостью XOY ;

S_{221} — часть поверхности S_{22} , которой принадлежит точка M_Y , лежащая над плоскостью XOY слева от плоскости XOZ ;

S_{222} — часть поверхности S_{22} , которой принадлежит точка M , лежащая над плоскостью XOY справа от плоскости XOZ ,

$$S_{22} = S_{221} + S_{222}; \quad (1)$$

S_{321} — часть верхнего основания поверхности магнитопровода, которому принадлежит точка M_Y ;

S_{322} — часть верхнего основания поверхности магнитопровода, которому принадлежит точка M ,

$$S_{32} = S_{321} + S_{322}; \quad (2)$$

S_{421} — часть поверхности S_{42} , которой принадлежит точка M_Y , лежащая над плоскостью XOY слева от плоскости XOZ ;

S_{422} — часть поверхности S_{42} , которой принадлежит точка M , лежащая над плоскостью XOY справа от плоскости XOZ ,

$$S_{42} = S_{421} + S_{422}; \quad (3)$$

S_{2221} — часть поверхности S_{222} , которой принадлежит точка M_X , лежащая над плоскостью XOY справа от плоскости XOZ за плоскостью YOZ ;

S_{2222} — часть поверхности S_{222} , которой принадлежит точка M , лежащая над плоскостью XOY справа от плоскости XOZ перед плоскостью YOZ ,

$$S_{222} = S_{2221} + S_{2222}; \quad (4)$$

S_{3221} — часть поверхности S_{322} , которой принадлежит точка M_X , лежащая над плоскостью XOY справа от плоскости XOZ за плоскостью YOZ ;

S_{3222} — часть поверхности S_{322} , которой принадлежит точка M , лежащая над плоскостью XOY справа от плоскости XOZ перед плоскостью YOZ ,

$$S_{322} = S_{3221} + S_{3222}; \quad (5)$$

S_{4221} — часть поверхности S_{422} , которой принадлежит точка M_X , лежащая над плоскостью XOY справа от плоскости XOZ за плоскостью YOZ ;

S_{4222} — часть поверхности S_{422} , которой принадлежит точка M , лежащая над плоскостью XOY справа от плоскости XOZ перед плоскостью YOZ ,

$$S_{422} = S_{4221} + S_{4222}. \quad (6)$$

Преобразование ИУ (13) и (16) из [4] с учетом симметрии по координате X в плотностях источников СС магнитного поля. Запишем ИУ (13) из [4] с учетом равенств (4)—(6):

$$\frac{2\pi}{\chi} \sigma_{\varphi Q_{222}}(Q_{222}) +$$

$$\begin{aligned}
 & + \int_{S_{2221}} [-\Delta_Y RC(Q_{222}, M_{2221}) + \Delta_Y RC(Q_{222}, M_{22Z21})] \sigma_{\varphi M_{2221}}(M_{2221}) ds_{M_{2221}} + \\
 & + \int_{S_{2222}} [-\Delta_Y RC(Q_{222}, M_{2222}) + \Delta_Y RC(Q_{222}, M_{22Z22})] \sigma_{\varphi M_{2222}}(M_{2222}) ds_{M_{2222}} + \\
 & + \int_{S_{3221}} [-\Sigma_Y RS(Q_{222}, M_{3221}) + \Sigma_Y RS(Q_{222}, M_{32Z21})] \sigma_{\rho M_{3221}}(M_{3221}) ds_{M_{3221}} + \\
 & + \int_{S_{3222}} [-\Sigma_Y RS(Q_{222}, M_{3222}) + \Sigma_Y RS(Q_{222}, M_{32Z22})] \sigma_{\rho M_{3222}}(M_{3222}) ds_{M_{3222}} + \\
 & + \int_{S_{3221}} [-\Delta_Y RC(Q_{222}, M_{3221}) + \Delta_Y RC(Q_{222}, M_{32Z21})] \sigma_{\varphi M_{3221}}(M_{3221}) ds_{M_{3221}} + \\
 & + \int_{S_{3222}} [-\Delta_Y RC(Q_{222}, M_{3222}) + \Delta_Y RC(Q_{222}, M_{32Z22})] \sigma_{\varphi M_{3222}}(M_{3222}) ds_{M_{3222}} + \\
 & + \int_{S_{4221}} [-\Delta_Y RC(Q_{222}, M_{4221}) + \Delta_Y RC(Q_{222}, M_{42Z21})] \sigma_{\varphi M_{4221}}(M_{4221}) ds_{M_{4221}} + \\
 & + \int_{S_{4222}} [-\Delta_Y RC(Q_{222}, M_{4222}) + \Delta_Y RC(Q_{222}, M_{42Z22})] \sigma_{\varphi M_{4222}}(M_{4222}) ds_{M_{4222}} = \\
 & = -F_{2\varphi}^{ZY}(Q_{222}), \quad Q_{222} \in S_{222}. \tag{7}
 \end{aligned}$$

В ИУ (7) примем следующие условия симметрии:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\varphi M_{2221}}(M_{2221}) &= \sigma_{\varphi M_{2222}}(M_{2222}), \quad \sigma_{\varphi M_{3221}}(M_{3221}) = \sigma_{\varphi M_{3222}}(M_{3222}), \\
 \sigma_{\rho M_{3221}}(M_{3221}) &= -\sigma_{\rho M_{3222}}(M_{3222}), \quad \sigma_{\varphi M_{4221}}(M_{4221}) = \sigma_{\varphi M_{4222}}(M_{4222}). \tag{8}
 \end{aligned}$$

В результате получим

$$\begin{aligned}
 & \frac{2\pi}{\chi} \sigma_{\varphi Q_{2222}}(Q_{2222}) + \int_{S_{2222}} [-\Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{2222X}) + \\
 & + \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{22Z22X})] \sigma_{\varphi M_{2222}}(M_{2222}) ds_{M_{2222}} + \\
 & + \int_{S_{2222}} [-\Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{2222}) + \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{22Z22})] \sigma_{\varphi M_{2222}}(M_{2222}) ds_{M_{2222}} + \\
 & + \int_{S_{3222}} [\Sigma_Y RS(Q_{2222}, M_{3222X}) - \Sigma_Y RS(Q_{2222}, M_{32Z22X})] \sigma_{\rho M_{3222}}(M_{3222}) ds_{M_{3222}} + \\
 & + \int_{S_{3222}} [-\Sigma_Y RS(Q_{2222}, M_{3222}) + \Sigma_Y RS(Q_{2222}, M_{32Z22})] \sigma_{\rho M_{3222}}(M_{3222}) ds_{M_{3222}} +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \int_{S_{3222}} [-\Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{3222X}) + \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{32Z22X})] \times \\
 & \quad \times \sigma_{\varphi M_{3222}}(M_{3222}) ds_{M_{3222}} + \int_{S_{3222}} [-\Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{3222}) + \\
 & \quad + \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{32Z22})] \sigma_{\varphi M_{3222}}(M_{3222}) ds_{M_{3222}} + \\
 & + \int_{S_{4222}} [-\Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{4222X}) + \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{42Z22X})] \times \\
 & \quad \times \sigma_{\varphi M_{4222}}(M_{4222}) ds_{M_{4222}} + \int_{S_{4222}} [-\Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{4222}) + \\
 & \quad + \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{42Z22})] \sigma_{\varphi M_{4222}}(M_{4222}) ds_{M_{4222}} = -F_{2\varphi}^{ZYX}(Q_{2222}), \\
 & \quad Q_{2222} \in S_{2222}. \tag{9}
 \end{aligned}$$

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned}
 \Sigma_X \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{2222}) &= \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{2222}) + \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{2222X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{22Z22}) &= \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{22Z22}) + \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{22Z22X}), \\
 \Delta_X \Sigma_Y RS(Q_{2222}, M_{3222}) &= \Sigma_Y RS(Q_{2222}, M_{3222}) - \Sigma_Y RS(Q_{2222}, M_{3222X}), \\
 \Delta_X \Sigma_Y RS(Q_{2222}, M_{32Z22}) &= \Sigma_Y RS(Q_{2222}, M_{32Z22}) - \Sigma_Y RS(Q_{2222}, M_{32Z22X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{3222}) &= \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{3222}) + \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{3222X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{32Z22}) &= \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{32Z22}) + \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{32Z22X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{4222}) &= \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{4222}) + \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{4222X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{42Z22}) &= \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{42Z22}) + \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{42Z22X}).
 \end{aligned} \tag{10}$$

С учетом (10) уравнение (9) примет вид

$$\begin{aligned}
 & \frac{2\pi}{\chi} \sigma_{\varphi Q_{2222}}(Q_{2222}) + \int_{S_{2222}} [-\Sigma_X \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{2222}) + \\
 & \quad + \Sigma_X \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{22Z22})] \sigma_{\varphi M_{2222}}(M_{2222}) ds_{M_{2222}} + \\
 & + \int_{S_{3222}} [-\Delta_X \Sigma_Y RS(Q_{2222}, M_{3222}) + \Delta_X \Sigma_Y RS(Q_{2222}, M_{32Z22})] \times \\
 & \quad \times \sigma_{\rho M_{3222}}(M_{3222}) ds_{M_{3222}} + \int_{S_{3222}} [-\Sigma_X \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{3222}) +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & +\Sigma_X \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{32Z22})] \sigma_{\varphi M_{3222}}(M_{3222}) ds_{M_{3222}} + \\
 & + \int_{S_{4222}} [-\Sigma_X \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{4222}) + \Sigma_X \Delta_Y RC(Q_{2222}, M_{42Z22})] \times \\
 & \times \sigma_{\varphi M_{4222}}(M_{4222}) ds_{M_{4222}} = -F_{2\varphi}^{ZYX}(Q_{2222}), \quad Q_{2222} \in S_{2222}. \quad (11)
 \end{aligned}$$

Здесь $F_{2\varphi}^{ZYX}(Q_{2222})$ — преобразованная с учетом симметрии по координате X в плотностях источников магнитного поля правая часть ИУ (13) из [4].

Преобразуем ИУ (16) из [4] с учетом симметрии по координате X в плотностях источников СС магнитного поля. С учетом равенств (4)—(6) запишем

$$\begin{aligned}
 & \frac{2\pi}{\chi} \sigma_z(Q_{222}) + \\
 & + \int_{S_{2221}} [\Delta_Y ZS(Q_{222}, M_{2221}) - \Delta_Y ZS(Q_{222}, M_{22Z21})] \sigma_{\varphi M_{2221}}(M_{2221}) ds_{M_{2221}} + \\
 & + \int_{S_{2222}} [\Delta_Y ZS(Q_{222}, M_{2222}) - \Delta_Y ZS(Q_{222}, M_{22Z22})] \sigma_{\varphi M_{2222}}(M_{2222}) ds_{M_{2222}} + \\
 & + \int_{S_{2221}} [\Sigma_Y CR(Q_{222}, M_{2221}) + \Sigma_Y CR(Q_{222}, M_{22Z21})] \sigma_z(M_{2221}) ds_{M_{2221}} + \\
 & + \int_{S_{2222}} [\Sigma_Y CR(Q_{222}, M_{2222}) + \Sigma_Y CR(Q_{222}, M_{22Z22})] \sigma_z(M_{2222}) ds_{M_{2222}} + \\
 & + \int_{S_{3221}} [-\Sigma_Y ZC(Q_{222}, M_{3221}) + \Sigma_Y ZC(Q_{222}, M_{32Z21})] \sigma_{\rho M_{3221}}(M_{3221}) ds_{M_{3221}} + \\
 & + \int_{S_{3222}} [-\Sigma_Y ZC(Q_{222}, M_{3222}) + \Sigma_Y ZC(Q_{222}, M_{32Z22})] \sigma_{\rho M_{3222}}(M_{3222}) ds_{M_{3222}} + \\
 & + \int_{S_{3221}} [\Delta_Y ZS(Q_{222}, M_{3221}) - \Delta_Y ZS(Q_{222}, M_{32Z21})] \sigma_{\varphi M_{3221}}(M_{3221}) ds_{M_{3221}} + \\
 & + \int_{S_{3222}} [\Delta_Y ZS(Q_{222}, M_{3222}) - \Delta_Y ZS(Q_{222}, M_{32Z22})] \sigma_{\varphi M_{3222}}(M_{3222}) ds_{M_{3222}} + \\
 & + \int_{S_{4221}} [\Delta_Y ZS(Q_{222}, M_{4221}) - \Delta_Y ZS(Q_{222}, M_{42Z21})] \sigma_{\varphi M_{4221}}(M_{4221}) ds_{M_{4221}} + \\
 & + \int_{S_{4222}} [\Delta_Y ZS(Q_{222}, M_{4222}) - \Delta_Y ZS(Q_{222}, M_{42Z22})] \sigma_{\varphi M_{4222}}(M_{4222}) ds_{M_{4222}} +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \int_{S_{4221}} [\Sigma_Y CR(Q_{222}, M_{4221}) + \Sigma_Y CR(Q_{222}, M_{42Z 21})] \sigma_z(M_{4221}) ds_{M_{4221}} + \\
 & + \int_{S_{4222}} [\Sigma_Y CR(Q_{222}, M_{4222}) + \Sigma_Y CR(Q_{222}, M_{42Z 22})] \sigma_z(M_{4222}) ds_{M_{4222}} = \\
 & = -F_{2z}^{ZY}(Q_{222}), \quad Q_{222} \in S_{222}. \quad (12)
 \end{aligned}$$

В ИУ (12) примем условия симметрии с учетом (8) и следующие условия:

$$\sigma_z(M_{2221}) = -\sigma_z(M_{2222}), \quad \sigma_z(M_{4221}) = -\sigma_z(M_{4222}). \quad (13)$$

Тогда ИУ (12) примет вид

$$\begin{aligned}
 & \frac{2\pi}{\chi} \sigma_z(Q_{2222}) + \\
 & + \int_{S_{2222}} [\Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{2222X}) - \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{22Z 22X})] \sigma_{\varphi M_{2222}}(M_{2222}) ds_{M_{2222}} + \\
 & + \int_{S_{2222}} [\Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{2222}) - \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{22Z 22})] \sigma_{\varphi M_{2222}}(M_{2222}) ds_{M_{2222}} - \\
 & - \int_{S_{2222}} [\Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{2222X}) + \Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{22Z 22X})] \sigma_z(M_{2222}) ds_{M_{2222}} + \\
 & + \int_{S_{2222}} [\Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{2222}) + \Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{22Z 22})] \sigma_z(M_{2222}) ds_{M_{2222}} + \\
 & + \int_{S_{3222}} [\Sigma_Y ZC(Q_{2222}, M_{3222X}) - \Sigma_Y ZC(Q_{2222}, M_{32Z 22X})] \sigma_{\rho M_{3222}}(M_{3222}) ds_{M_{3222}} + \\
 & + \int_{S_{3222}} [-\Sigma_Y ZC(Q_{2222}, M_{3222}) + \Sigma_Y ZC(Q_{2222}, M_{32Z 22})] \sigma_{\rho M_{3222}}(M_{3222}) ds_{M_{3222}} + \\
 & + \int_{S_{3222}} [\Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{3222X}) - \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{32Z 22X})] \sigma_{\varphi M_{3222}}(M_{3222}) ds_{M_{3222}} + \\
 & + \int_{S_{3222}} [\Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{3222}) - \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{32Z 22})] \sigma_{\varphi M_{3222}}(M_{3222}) ds_{M_{3222}} + \\
 & + \int_{S_{4222}} [\Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{4222X}) - \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{42Z 22X})] \sigma_{\varphi M_{4222}}(M_{4222}) ds_{M_{4222}} + \\
 & + \int_{S_{4222}} [\Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{4222}) - \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{42Z 22})] \sigma_{\varphi M_{4222}}(M_{4222}) ds_{M_{4222}} -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - \int_{S_{4222}} [\Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{4222X}) + \Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{42Z22X})] \sigma_z(M_{4222}) ds_{M_{4222}} + \\
 & + \int_{S_{4222}} [\Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{4222}) + \Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{42Z22})] \sigma_z(M_{4222}) ds_{M_{4222}} = \\
 & = -F_{2z}^{ZYX}(Q_{2222}), \quad Q_{2222} \in S_{2222}. \quad (14)
 \end{aligned}$$

Для дальнейших преобразований ИУ (14) удобно записать так:

$$\begin{aligned}
 & \frac{2\pi}{\chi} \sigma_z(Q_{2222}) + \\
 & + \int_{S_{2222}} [\Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{2222X}) - \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{22Z22X})] \sigma_{\varphi M_{2222}}(M_{2222}) ds_{M_{2222}} + \\
 & + \int_{S_{2222}} [\Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{2222}) - \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{22Z22})] \sigma_{\varphi M_{2222}}(M_{2222}) ds_{M_{2222}} + \\
 & + \int_{S_{2222}} [-\Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{2222X}) - \Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{22Z22X})] \sigma_z(M_{2222}) ds_{M_{2222}} + \\
 & + \int_{S_{2222}} [\Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{2222}) + \Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{22Z22})] \sigma_z(M_{2222}) ds_{M_{2222}} + \\
 & + \int_{S_{3222}} [\Sigma_Y ZC(Q_{2222}, M_{3222X}) - \Sigma_Y ZC(Q_{2222}, M_{32Z22X})] \sigma_{\rho M_{3222}}(M_{3222}) ds_{M_{3222}} + \\
 & + \int_{S_{3222}} [-\Sigma_Y ZC(Q_{2222}, M_{3222}) + \Sigma_Y ZC(Q_{2222}, M_{32Z22})] \sigma_{\rho M_{3222}}(M_{3222}) ds_{M_{3222}} + \\
 & + \int_{S_{3222}} [\Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{3222X}) - \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{32Z22X})] \sigma_{\varphi M_{3222}}(M_{3222}) ds_{M_{3222}} + \\
 & + \int_{S_{3222}} [\Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{3222}) - \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{32Z22})] \sigma_{\varphi M_{3222}}(M_{3222}) ds_{M_{3222}} + \\
 & + \int_{S_{4222}} [\Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{4222X}) - \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{42Z22X})] \sigma_{\varphi M_{4222}}(M_{4222}) ds_{M_{4222}} + \\
 & + \int_{S_{4222}} [\Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{4222}) - \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{42Z22})] \sigma_{\varphi M_{4222}}(M_{4222}) ds_{M_{4222}} + \\
 & + \int_{S_{4222}} [-\Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{4222X}) - \Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{42Z22X})] \sigma_z(M_{4222}) ds_{M_{4222}} +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \int_{S_{4222}} [\Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{4222}) + \Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{42Z22})] \sigma_z(M_{4222}) ds_{M_{4222}} = \\
 & = -F_{2z}^{ZYX}(Q_{2222}), \quad Q_{2222} \in S_{2222}. \quad (15)
 \end{aligned}$$

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned}
 \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{2222}) &= \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{2222}) + \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{2222X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{22Z22}) &= \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{22Z22}) + \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{22Z22X}), \\
 \Delta_X \Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{2222}) &= \Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{2222}) - \Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{2222X}), \\
 \Delta_X \Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{22Z22}) &= \Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{22Z22}) - \Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{22Z22X}), \\
 \Delta_X \Sigma_Y ZC(Q_{2222}, M_{3222}) &= \Sigma_Y ZC(Q_{2222}, M_{3222}) - \Sigma_Y ZC(Q_{2222}, M_{3222X}), \\
 \Delta_X \Sigma_Y ZC(Q_{2222}, M_{32Z22}) &= \Sigma_Y ZC(Q_{2222}, M_{32Z22}) - \Sigma_Y ZC(Q_{2222}, M_{32Z22X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{3222}) &= \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{3222}) + \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{3222X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{32Z22}) &= \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{32Z22}) + \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{32Z22X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{4222}) &= \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{4222}) + \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{4222X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{42Z22}) &= \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{42Z22}) + \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{42Z22X}), \\
 \Delta_X \Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{4222}) &= \Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{4222}) - \Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{4222X}), \\
 \Delta_X \Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{42Z22}) &= \Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{42Z22}) - \Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{42Z22X}).
 \end{aligned} \quad (16)$$

С учетом (16) ИУ (15) примет вид

$$\begin{aligned}
 & \frac{2\pi}{\chi} \sigma_z(Q_{2222}) + \int_{S_{2222}} [\Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{2222}) - \\
 & - \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{22Z22})] \sigma_{\varphi M_{2222}}(M_{2222}) ds_{M_{2222}} + \\
 & + \int_{S_{2222}} [\Delta_X \Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{2222}) + \Delta_X \Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{22Z22})] \times \\
 & \times \sigma_z(M_{2222}) ds_{M_{2222}} + \int_{S_{3222}} [-\Delta_X \Sigma_Y ZC(Q_{2222}, M_{3222}) + \\
 & + \Delta_X \Sigma_Y ZC(Q_{2222}, M_{32Z22})] \sigma_{\rho M_{3222}}(M_{3222}) ds_{M_{3222}} + \\
 & + \int_{S_{3222}} [\Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{3222}) - \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{32Z22})] \times
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \times \sigma_{\varphi M_{3222}}(M_{3222}) ds_{M_{3222}} + \int_{S_{4222}} [\Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{4222}) - \\
 & - \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{2222}, M_{42Z22})] \sigma_{\varphi M_{4222}}(M_{4222}) ds_{M_{4222}} + \\
 & + \int_{S_{4222}} [\Delta_X \Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{4222}) + \Delta_X \Sigma_Y CR(Q_{2222}, M_{42Z22})] \times \\
 & \times \sigma_z(M_{4222}) ds_{M_{4222}} = -F_{2z}^{ZYX}(Q_{2222}), \quad Q_{2222} \in S_{2222}. \quad (17)
 \end{aligned}$$

Преобразование ИУ (24) и (29) из [4] с учетом симметрии по координате X в плотностях источников СС магнитного поля. ИУ (24) и (29) из [4] преобразуются с учетом симметрии по координате X в плотностях источников СС магнитного поля аналогично тому, как это сделано выше для ИУ (13) и (16) из [4]. Поэтому приведем окончательный результат этих преобразований для ИУ (24) из [4]:

$$\begin{aligned}
 & \frac{2\pi}{\chi} \sigma_{\rho Q_{3222}}(Q_{3222}) + \int_{S_{2222}} \sigma_{\varphi M_{2222}}(M_{2222}) \times \\
 & \times [\Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{3222}, M_{2222}) - \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{3222}, M_{22Z22})] ds_{M_{2222}} + \\
 & + \int_{S_{2222}} \sigma_z(M_{2222}) [\Delta_X \Sigma_Y CR(Q_{3222}, M_{2222}) + \Delta_X \Sigma_Y CR(Q_{3222}, M_{22Z22})] ds_{M_{2222}} + \\
 & + \int_{S_{3222}} \sigma_{\rho M_{3222}}(M_{3222}) [\Delta_X \Sigma_Y ZC(Q_{3222}, M_{3222})] ds_{M_{3222}} + \\
 & + \int_{S_{3222}} \sigma_{\varphi M_{3222}}(M_{3222}) [-\Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{3222}, M_{32Z22})] ds_{M_{3222}} + \\
 & + \int_{S_{4222}} \sigma_{\varphi M_{4222}}(M_{4222}) [\Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{3222}, M_{4222}) - \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{3222}, M_{42Z22})] ds_{M_{4222}} + \\
 & + \int_{S_{4222}} \sigma_z(M_{4222}) [\Delta_X \Sigma_Y CR(Q_{3222}, M_{4222}) + \Delta_X \Sigma_Y CR(Q_{3222}, M_{42Z22})] ds_{M_{4222}} = \\
 & = -F_{3p}^{ZYX}(Q_{3222}), \quad Q_{3222} \in S_{3222}, \quad (18)
 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{3222}, M_{2222}) &= \Delta_Y ZS(Q_{3222}, M_{2222}) + \Delta_Y ZS(Q_{3222}, M_{2222X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{3222}, M_{22Z22}) &= \Delta_Y ZS(Q_{3222}, M_{22Z22}) + \Delta_Y ZS(Q_{3222}, M_{22Z22X}), \\
 \Delta_X \Sigma_Y CR(Q_{3222}, M_{2222}) &= \Sigma_Y CR(Q_{3222}, M_{2222}) - \Sigma_Y CR(Q_{3222}, M_{2222X}),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta_X \Sigma_Y CR(Q_{3222}, M_{22Z22}) &= \Sigma_Y CR(Q_{3222}, M_{22Z22}) - \Sigma_Y CR(Q_{3222}, M_{22Z22X}), \\
 \Delta_X \Sigma_Y ZC(Q_{3222}, M_{32Z22}) &= \Sigma_Y ZC(Q_{3222}, M_{32Z22}) - \Sigma_Y ZC(Q_{3222}, M_{32Z22X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{3222}, M_{32Z22}) &= \Delta_Y ZS(Q_{3222}, M_{32Z22}) + \Delta_Y ZS(Q_{3222}, M_{32Z22X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{3222}, M_{4222}) &= \Delta_Y ZS(Q_{3222}, M_{4222}) + \Delta_Y ZS(Q_{3222}, M_{4222X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{3222}, M_{42Z22}) &= \Delta_Y ZS(Q_{3222}, M_{42Z22}) + \Delta_Y ZS(Q_{3222}, M_{42Z22X}), \\
 \Delta_X \Sigma_Y CR(Q_{3222}, M_{4222}) &= \Sigma_Y CR(Q_{3222}, M_{4222}) - \Sigma_Y CR(Q_{3222}, M_{4222X}), \\
 \Delta_X \Sigma_Y CR(Q_{3222}, M_{42Z22}) &= \Sigma_Y CR(Q_{3222}, M_{42Z22}) - \Sigma_Y CR(Q_{3222}, M_{42Z22X}).
 \end{aligned} \tag{19}$$

В результате преобразовывая ИУ (29) из [4] получим

$$\begin{aligned}
 & \frac{2\pi}{\chi} \sigma_{\varphi Q_{3222}}(Q_{3222}) + \\
 & + \int_{S_{2222}} \sigma_{\varphi M_{2222}}(M_{2222}) [-\Sigma_X \Delta_Y ZC(Q_{3222}, M_{2222}) + \Sigma_X \Delta_Y ZC(Q_{3222}, M_{22Z22})] ds_{M_{2222}} + \\
 & + \int_{S_{2222}} \sigma_z(M_{2222}) [\Delta_X \Sigma_Y SR(Q_{3222}, M_{2222}) + \Delta_X \Sigma_Y SR(Q_{3222}, M_{22Z22})] ds_{M_{2222}} + \\
 & + \int_{S_{3222}} \sigma_{\rho M_{3222}}(M_{3222}) [\Delta_X \Sigma_Y ZS(Q_{3222}, M_{32Z22})] ds_{M_{3222}} + \\
 & + \int_{S_{3222}} \sigma_{\varphi M_{3222}}(M_{3222}) [\Sigma_X \Delta_Y ZC(Q_{3222}, M_{32Z22})] ds_{M_{3222}} + \\
 & + \int_{S_{4222}} \sigma_{\varphi M_{4222}}(M_{4222}) [-\Sigma_X \Delta_Y ZC(Q_{3222}, M_{4222}) + \Sigma_X \Delta_Y ZC(Q_{3222}, M_{42Z22})] ds_{M_{4222}} + \\
 & + \int_{S_{4222}} \sigma_z(M_{4222}) [\Delta_X \Sigma_Y SR(Q_{3222}, M_{4222}) + \Delta_X \Sigma_Y SR(Q_{3222}, M_{42Z22})] ds_{M_{4222}} = \\
 & = -F_{3\varphi}^{ZYX}(Q_{3222}), \quad Q_{3222} \in S_{3222}, \tag{20}
 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{3222}, M_{2222}) &= \Delta_Y ZC(Q_{3222}, M_{2222}) + \Delta_Y ZC(Q_{3222}, M_{2222X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y ZC(Q_{3222}, M_{22Z22}) &= \Delta_Y ZC(Q_{3222}, M_{22Z22}) + \Delta_Y ZC(Q_{3222}, M_{22Z22X}), \\
 \Delta_X \Sigma_Y SR(Q_{3222}, M_{2222}) &= \Sigma_Y SR(Q_{3222}, M_{2222}) - \Sigma_Y SR(Q_{3222}, M_{2222X}), \\
 \Delta_X \Sigma_Y SR(Q_{3222}, M_{22Z22}) &= \Sigma_Y SR(Q_{3222}, M_{22Z22}) - \Sigma_Y SR(Q_{3222}, M_{22Z22X}), \\
 \Delta_X \Sigma_Y ZS(Q_{3222}, M_{32Z22}) &= \Sigma_Y ZS(Q_{3222}, M_{32Z22}) - \Sigma_Y ZS(Q_{3222}, M_{32Z22X}),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Sigma_X \Delta_Y ZC(Q_{3222}, M_{32Z22}) &= \Delta_Y ZC(Q_{3222}, M_{32Z22}) + \Delta_Y ZC(Q_{3222}, M_{32Z22X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y ZC(Q_{3222}, M_{4222}) &= \Delta_Y ZC(Q_{3222}, M_{4222}) + \Delta_Y ZC(Q_{3222}, M_{4222X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y ZC(Q_{3222}, M_{42Z22}) &= \Delta_Y ZC(Q_{3222}, M_{42Z22}) + \Delta_Y ZC(Q_{3222}, M_{42Z22X}), \\
 \Delta_X \Sigma_Y SR(Q_{3222}, M_{4222}) &= \Sigma_Y SR(Q_{3222}, M_{4222}) - \Sigma_Y SR(Q_{3222}, M_{4222X}), \\
 \Delta_X \Sigma_Y SR(Q_{3222}, M_{42Z22}) &= \Sigma_Y SR(Q_{3222}, M_{42Z22}) - \Sigma_Y SR(Q_{3222}, M_{42Z22X}).
 \end{aligned} \tag{21}$$

Результат преобразования ИУ (36) и (41) из [4] с учетом симметрии по координате X в плотностях источников СС магнитного поля. ИУ (36) и (41) из [4] преобразуются аналогично тому, как это сделано для ИУ (13) и (16) из [4]. Поэтому приведем окончательный результат этих преобразований. Для ИУ (36) из [4], получено следующее уравнение:

$$\begin{aligned}
 &\frac{2\pi}{\chi} \sigma_{\varphi Q_{4222}}(Q_{4222}) + \\
 &+ \int_{S_{2222}} \sigma_{\varphi M_{2222}}(M_{2222}) [\Sigma_X \Delta_Y RC(Q_{4222}, M_{2222}) - \Sigma_X \Delta_Y RC(Q_{4222}, M_{22Z22})] ds_{M_{2222}} + \\
 &+ \int_{S_{3222}} \sigma_{\rho M_{3222}}(M_{3222}) [\Delta_X \Sigma_Y RS(Q_{4222}, M_{3222}) - \Delta_X \Sigma_Y RS(Q_{4222}, M_{32Z22})] ds_{M_{3222}} + \\
 &+ \int_{S_{3222}} \sigma_{\varphi M_{3222}}(M_{3222}) [\Sigma_X \Delta_Y RC(Q_{4222}, M_{3222}) - \Sigma_X \Delta_Y RC(Q_{4222}, M_{32Z22})] ds_{M_{3222}} + \\
 &+ \int_{S_{4222}} \sigma_{\varphi M_{4222}}(M_{4222}) [\Sigma_X \Delta_Y RC(Q_{4222}, M_{4222}) - \Sigma_X \Delta_Y RC(Q_{4222}, M_{42Z22})] ds_{M_{4222}} = \\
 &= -F_{4\varphi}^{ZYX}(Q_{4222}), \quad Q_{4222} \in S_{4222},
 \end{aligned} \tag{22}$$

где

$$\begin{aligned}
 \Sigma_X \Delta_Y RC(Q_{4222}, M_{2222}) &= \Delta_Y RC(Q_{4222}, M_{2222}) + \Delta_Y RC(Q_{4222}, M_{2222X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y RC(Q_{4222}, M_{22Z22}) &= \Delta_Y RC(Q_{4222}, M_{22Z22}) + \Delta_Y RC(Q_{4222}, M_{22Z22X}), \\
 \Delta_X \Sigma_Y RS(Q_{4222}, M_{3222}) &= \Sigma_Y RS(Q_{4222}, M_{3222}) - \Sigma_Y RS(Q_{4222}, M_{3222X}), \\
 \Delta_X \Sigma_Y RS(Q_{4222}, M_{32Z22}) &= \Sigma_Y RS(Q_{4222}, M_{32Z22}) - \Sigma_Y RS(Q_{4222}, M_{32Z22X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y RC(Q_{4222}, M_{3222}) &= \Delta_Y RC(Q_{4222}, M_{3222}) + \Delta_Y RC(Q_{4222}, M_{3222X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y RC(Q_{4222}, M_{32Z22}) &= \Delta_Y RC(Q_{4222}, M_{32Z22}) + \Delta_Y RC(Q_{4222}, M_{32Z22X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y RC(Q_{4222}, M_{4222}) &= \Delta_Y RC(Q_{4222}, M_{4222}) + \Delta_Y RC(Q_{4222}, M_{4222X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y RC(Q_{4222}, M_{42Z22}) &= \Delta_Y RC(Q_{4222}, M_{42Z22}) + \Delta_Y RC(Q_{4222}, M_{42Z22X}).
 \end{aligned} \tag{23}$$

В результате преобразования ИУ (41) из [4] получено следующее ИУ:

$$\begin{aligned}
 & \frac{2\pi}{\chi} \sigma_z(Q_{4222}) + \\
 & + \int_{S_{2222}} \sigma_{\varphi M_{2222}}(M_{2222}) [\Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{4222}, M_{2222}) + \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{4222}, M_{22Z22})] ds_{M_{2222}} + \\
 & + \int_{S_{2222}} \sigma_z(M_{2222}) [\Delta_X \Sigma_Y RC(Q_{4222}, M_{2222}) + \Delta_X \Sigma_Y RC(Q_{4222}, M_{22Z22})] ds_{M_{2222}} + \\
 & + \int_{S_{3222}} \sigma_{\rho M_{3222}}(M_{3222}) [\Delta_X \Sigma_Y ZC(Q_{4222}, M_{3222}) - \Delta_X \Sigma_Y ZC(Q_{4222}, M_{32Z22})] ds_{M_{3222}} + \\
 & + \int_{S_{3222}} \sigma_{\varphi M_{3222}}(M_{3222}) [\Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{4222}, M_{3222}) + \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{4222}, M_{32Z22})] ds_{M_{3222}} + \\
 & + \int_{S_{4222}} \sigma_{\varphi M_{4222}}(M_{4222}) [\Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{4222}, M_{4222}) + \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{4222}, M_{42Z22})] ds_{M_{4222}} + \\
 & + \int_{S_{4222}} \sigma_z(M_{4222}) [\Delta_X \Sigma_Y RC(Q_{4222}, M_{4222}) + \Delta_X \Sigma_Y RC(Q_{4222}, M_{42Z22})] ds_{M_{4222}} = \\
 & = -F_{4z}^{ZYX}(Q_{4222}), \quad Q_{4222} \in S_{4222}, \quad (24)
 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{4222}, M_{2222}) &= \Delta_Y ZS(Q_{4222}, M_{2222}) + \Delta_Y ZS(Q_{4222}, M_{2222X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{4222}, M_{22Z22}) &= \Delta_Y ZS(Q_{4222}, M_{22Z22}) + \Delta_Y ZS(Q_{4222}, M_{22Z22X}), \\
 \Delta_X \Sigma_Y RC(Q_{4222}, M_{2222}) &= \Sigma_Y RC(Q_{4222}, M_{2222}) - \Sigma_Y RC(Q_{4222}, M_{2222X}), \\
 \Delta_X \Sigma_Y RC(Q_{4222}, M_{22Z22}) &= \Sigma_Y RC(Q_{4222}, M_{22Z22}) - \Sigma_Y RC(Q_{4222}, M_{22Z22X}), \\
 \Delta_X \Sigma_Y ZC(Q_{4222}, M_{3222}) &= \Sigma_Y ZC(Q_{4222}, M_{3222}) - \Sigma_Y ZC(Q_{4222}, M_{3222X}), \\
 \Delta_X \Sigma_Y ZC(Q_{4222}, M_{32Z22}) &= \Sigma_Y ZC(Q_{4222}, M_{32Z22}) - \Sigma_Y ZC(Q_{4222}, M_{32Z22X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{4222}, M_{3222}) &= \Delta_Y ZS(Q_{4222}, M_{3222}) + \Delta_Y ZS(Q_{4222}, M_{3222X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{4222}, M_{32Z22}) &= \Delta_Y ZS(Q_{4222}, M_{32Z22}) + \Delta_Y ZS(Q_{4222}, M_{32Z22X}), \\
 \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{4222}, M_{4222}) &= \Delta_Y ZS(Q_{4222}, M_{4222}) + \Delta_Y ZS(Q_{4222}, M_{4222X}),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Sigma_X \Delta_Y ZS(Q_{4222}, M_{42Z22}) &= \Delta_Y ZS(Q_{4222}, M_{42Z22}) + \Delta_Y ZS(Q_{4222}, M_{42Z22X}), \\ \Delta_X \Sigma_Y RC(Q_{4222}, M_{4222}) &= \Sigma_Y RC(Q_{4222}, M_{4222}) - \Sigma_Y RC(Q_{4222}, M_{4222X}), \\ \Delta_X \Sigma_Y RC(Q_{4222}, M_{42Z22}) &= \Sigma_Y RC(Q_{4222}, M_{42Z22}) - \Sigma_Y RC(Q_{4222}, M_{42Z22X}). \end{aligned} \quad (25)$$

Выводы

Таким образом, преобразована полученная в [4] СкСИУ с учетом соотношений симметрии по координате X в проекциях на оси цилиндрической системы координат векторов плотности источников k -й СС магнитного поля. Областью определения новой СкСИУ (11), (17), (18), (20), (22), (24) является часть поверхности магнитопровода статора, лежащая выше координатной плоскости XOY , справа от координатной плоскости XOZ , перед координатной плоскостью YOZ , которой принадлежат точки $M(X_M, Y_M, Z_M)$ с координатами $Z_M \geq 0, Y_M \geq 0, X_M \geq 0$. Это позволяет существенно сократить объем вычислений, необходимых для составления матрицы аппроксимирующей алгебраической системы и ее решения.

The vector system of integral equations for the vectors of source density of the k th symmetrical component (SC) of magnetic field of the stator of cylindrical three-phase electromagnetic stirrer has been transformed to the scalar system of integral equations (ScSIE) in respect of the projection of density vectors of the sources of k th SC of the magnetic field on the axis of cylindrical system of coordinates with allowance for symmetry on Z, Y, X coordinates in projections of densities of the sources of the k th SC of magnetic field of the stator. Part of the stator core surface, the points $M(X_M, Y_M, Z_M)$ with coordinates $Z_M \geq 0, Y_M \geq 0, X_M \geq 0$ belonging to it, is the domain of definition of ScSIE obtained after the above transformations. This allows reducing considerably the volume of calculations connected with composing the matrix of approximating algebraic system and its solution.

1. Евдокимов В.Ф., Кучаев А.А., Петрушенко Е.И., Кучаев В.А. Модель трехмерного магнитного поля статора цилиндрического электромагнитного перемешивателя с учетом распределения токов намагниченности по поверхности магнитопровода. I // Электрон. моделирование. — 2012. — 34, № 1. — С. 48—51.
2. Евдокимов В.Ф., Кучаев А.А., Петрушенко Е.И., Кучаев В.А. Модель трехмерного магнитного поля статора цилиндрического электромагнитного перемешивателя с учетом распределения токов намагниченности по поверхности магнитопровода. II // Там же. — 2012. — 34, № 2. — С. 51—75.
3. Евдокимов В.Ф., Петрушенко Е.И., Кучаев В.А. Интегральная модель трехмерного вращающегося магнитного поля статора цилиндрического ЭМП на основе симметричных составляющих. I // Там же. — 2012. — 34, № 6. — С. 3—15.

4. Евдокимов В.Ф., Петрушенко Е.И., Кучаев В.А. Интегральная модель трехмерного вращающегося магнитного поля статора цилиндрического ЭМП на основе симметричных составляющих. II // Там же. — 2013. — 35, № 1. — С. 15—42.

Поступила 08.04.13;
после доработки 27.05.13

ЕВДОКИМОВ Виктор Федорович, чл.-кор. НАН Украины, директор Ин-та проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины. В 1963 г. окончил Харьковский политехнический ин-т. Область научных исследований — теория моделирования процессов и систем в энергетике, теория функционально-ориентированных компьютерных систем, анализ и синтез параллельных вычислительных методов и систем.

ПЕТРУШЕНКО Евгений Иванович, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом моделирования задач электромагнитной гидродинамики Ин-та проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины. В 1960 г. окончил Новочеркасский политехнический ин-т, а в 1963 г. — Ростовский государственный университет. Область научных исследований — моделирование электромагнитных полей.

