

- преодоление «газовой паузы» — неоправданно высокой доли газа в топливном балансе — с помощью ценовой политики в области энергоресурсов. Оптимизация топливного баланса является важной составляющей комплекса мер по обеспечению энергетической и политической безопасности страны;
- определение реально достижимых и фактически складывающихся экономических, энергетических и экологических показателей в их взаимосвязи и взаимовлиянии [7];
- поддержание темпов роста цен на энергоносители на уровне не ниже 13 % в год (в период с 2012 по 2020 гг.), несмотря на риски инициирования социальной напряженности. Это — один

из важных источников средств, необходимых для поддержки энергетического сектора экономики и сильнодействующего средства стимулирования энергосбережения.

Мощным толчком для ускорения движения к энергоэффективной экономике послужил бы Национальный проект по энергосбережению и энергоэффективности, вопрос о котором поднимался на Красноярском экономическом форуме (г. Красноярск, 27–28 февраля 2009 г.).

Общая задача россиян — распорядиться бесценным капиталом в виде богатейших энергоресурсов так, чтобы не решать проблемы сегодняшнего дня в ущерб будущим поколениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков В.Я. Современная и перспективная энергетика: технологические, социально-экономические и экологические аспекты. — Томск: Изд-во ТПУ, 2008. — 469 с.
2. Сушко В.А. Реформирование электроэнергетики: прогноз ситуации после 2010 года // Новости электротехники. — 2008. — № 3 (51). — С. 32–37.
3. Энергоэффективность в России: скрытый резерв // Отчёт, подготовленный экспертами Всемирного банка, Международной финансовой корпорации и Центра по эффективному использованию энергии. — 2008. — 162 с.
4. Башмаков И.А. Потенциал энергосбережения в России // Энергосбережение. — 2009. — № 1. — С. 28–36.
5. Ковалёв В.Д., Ивакин В.Н., Фотин В.П. Новые технологии и перспективы развития энергетики // Электричество. — 2006. — № 9. — С. 8–14.
6. Кутовой Г.П., Мисриханов М.Ш., Овсейчук В.А. Концепция новой структуры // Новости электротехники. — 2008. — № 3 (51). — С. 1–3.
7. Бушуев В.В. Энергоэффективность как направление новой энергетической политики России // Энергосбережение. — 1999. — № 4. — С. 32–38.

Поступила 18.03.2009 г.

УДК 621.311.1.016

ФОРМИРОВАНИЕ УРАВНЕНИЙ УСТАНОВИВШИХСЯ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ РАСПРЕДЕЛЕННОСТИ ПАРАМЕТРОВ ЛЭП

Н.Н. Харлов, В.В. Иванов*, А. В. Погонин*, В.А. Мельников*

Томский политехнический университет

*Межрегиональная распределительная сетевая компания Сибири, г. Красноярск

E-mail: rcr@tpu.ru.

Предложена система уравнений установившегося несинусоидального режима сложной электрической сети, обеспечивающая математическое моделирование режима с учетом специфических факторов: геометрии подвески проводов и грозозащитных тросов, распределенности параметров, поверхностного эффекта и др. Полученная система уравнений используется для исследования частотных характеристик входной проводимости холостой ЛЭП 500 кВ с горизонтальной подвеской проводов.

Ключевые слова:

Математические модели, несинусоидальные режимы, электрические сети, уравнения баланса токов, распределенные параметры, частотные характеристики.

Введение

В задачах математического моделирования несинусоидальных режимов электрических систем возникает необходимость записи уравнений установившегося несинусоидального режима в форме баланса токов в узлах электрической сети на отдельных частотах гармонических составляющих [1]. В таких расчетах необходим учет специфических свойств линии: способа подвески проводов и

грозозащитных тросов, их количества, распределенность параметров, наличие поверхностного эффекта в проводниках на повышенных частотах и пр. При этом напряжения по концам линий и токи линий связываются известными телеграфными уравнениями [2]. Для несимметричной многопроводной линии, состоящей из m проводов и грозозащитных тросов, данные уравнения на частоте n -й гармоники имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}\dot{U}_x(\omega_n) &= e^{-\lambda_u(\omega_n)x} A + e^{\lambda_u(\omega_n)x} B; \\ \dot{I}_x(\omega_n) &= e^{-\lambda_i(\omega_n)x} C + e^{\lambda_i(\omega_n)x} D.\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь $\dot{U}(\omega_n)$, $\dot{I}(\omega_n)$ – векторы-столбцы напряжений и токов частоты ω_n n -й гармоники размерностью $m \times 1$ в сечении на расстоянии x от начала линии; $\lambda_u(\omega_n) = \sqrt{Z(\omega_n)Y(\omega_n)}$; $\lambda_i(\omega_n) = \sqrt{Z(\omega_n)Y(\omega_n)}$; $Z(\omega_n)$, $Y(\omega_n)$ – матрицы собственных и взаимных погонных сопротивлений и проводимостей проводов и тросов на частоте n -й гармоники размерностью $m \times m$; $A(\omega_n)$, $B(\omega_n)$, $C(\omega_n)$, $D(\omega_n)$ – постоянные векторы-столбцы размерностью $m \times 1$, обычно вычисляемые из граничных условий на частоте n -й гармоники:

$$\begin{aligned}-Z(\omega_n)\dot{I}_\kappa(\omega_n) &= \\ &= -\lambda_u(\omega_n)e^{-\lambda_u(\omega_n)l} A(\omega_n) + \lambda_u(\omega_n)e^{\lambda_u(\omega_n)l} B(\omega_n); \\ -Y(\omega_n)\dot{U}_\kappa(\omega_n) &= \\ &= -\lambda_i(\omega_n)e^{-\lambda_i(\omega_n)l} C(\omega_n) + \lambda_i(\omega_n)e^{\lambda_i(\omega_n)l} D(\omega_n).\end{aligned}\quad (2)$$

Уравнения баланса токов

Формирование балансов токов в узлах электрической сети предполагает процедуру определения токов ветвей при заданных напряжениях в узлах. Применительно к уравнениям (1, 2), описывающим режим ветви, данная процедура выглядит следующим образом:

1. Определяются векторы-столбцы $A(\omega_n)$, $B(\omega_n)$ путем решения системы матричных уравнений, записываемой на основе первого уравнения системы (1) для x соответствующего началу и концу линии:

$$\begin{aligned}\dot{U}_n(\omega_n) &= A(\omega_n) + B(\omega_n); \\ \dot{U}_\kappa(\omega_n) &= e^{-\lambda_u(\omega_n)l} A(\omega_n) + e^{\lambda_u(\omega_n)l} B(\omega_n).\end{aligned}$$

Здесь l – длина линии, а индексы n и κ соответствуют ее началу и концу.

Решение данной системы при использовании блочной формы записи матриц имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} A(\omega_n) \\ B(\omega_n) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} E & E \\ e^{-\lambda_u(\omega_n)l} & e^{\lambda_u(\omega_n)l} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_n(\omega_n) \\ \dot{U}_\kappa(\omega_n) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_n(\omega_n) \\ \dot{U}_\kappa(\omega_n) \end{bmatrix},\end{aligned}$$

где E – единичная комплексная матрица размерностью $m \times m$.

Откуда

$$\begin{aligned}A(\omega_n) &= H_{11}\dot{U}_n(\omega_n) + H_{12}\dot{U}_\kappa(\omega_n); \\ B(\omega_n) &= H_{21}\dot{U}_n(\omega_n) + H_{22}\dot{U}_\kappa(\omega_n).\end{aligned}$$

2. Определяются векторы-столбцы токов в начале и в конце линии $\dot{I}^n(\omega_n)$, $\dot{I}^\kappa(\omega_n)$ с использованием первого уравнения системы (2):

$$\begin{aligned}\dot{I}^n(\omega_n) &= -Z^{-1}(\omega_n)(-\lambda_u(\omega_n)A(\omega_n) + \lambda_u(\omega_n)B(\omega_n)); \\ \dot{I}^\kappa(\omega_n) &= -Z^{-1}(\omega_n)(-\lambda_u(\omega_n)e^{-\lambda_u(\omega_n)l} A(\omega_n) + \\ &+ \lambda_u(\omega_n)e^{\lambda_u(\omega_n)l} B(\omega_n)).\end{aligned}$$

Или с учетом полученных значений векторов $A(\omega_n)$ и $B(\omega_n)$

$$\begin{aligned}\dot{I}_n(\omega_n) &= -Z^{-1}(\omega_n)(-\lambda_u(\omega_n)(H_{11}\dot{U}_n(\omega_n) + \\ &+ H_{12}\dot{U}_\kappa(\omega_n)) + \lambda_u(\omega_n)(H_{21}\dot{U}_n(\omega_n) + H_{22}\dot{U}_\kappa(\omega_n))); \\ \dot{I}_\kappa(\omega_n) &= -Z^{-1}(\omega_n)(-\lambda_u(\omega_n)e^{-\lambda_u(\omega_n)l} (H_{11}\dot{U}_n(\omega_n) + \\ &+ H_{12}\dot{U}_\kappa(\omega_n)) + \lambda_u(\omega_n)e^{\lambda_u(\omega_n)l} (H_{21}\dot{U}_n(\omega_n) + H_{22}\dot{U}_\kappa(\omega_n))).\end{aligned}$$

Рассмотрим формирование уравнений установившегося несинусоидального режима на частоте n -ой гармоники на примере трехузловой схемы, содержащей источник питания (в общем случае несинусоидальный) в базисном узле 3 и две нелинейных нагрузки в узлах 1 и 2 (рис. 1). Условимся относительно направления ветвей, обозначив их начала и концы соответствующими номерами узлов приключения.

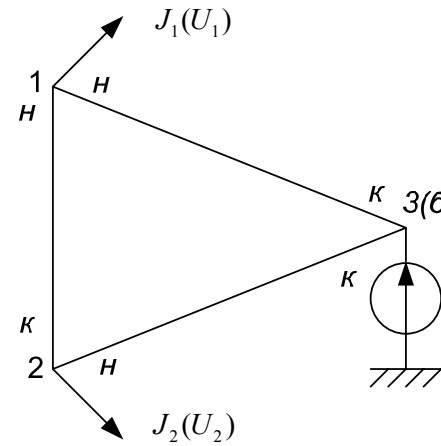


Рис. 1. Схема трехузловой электрической сети: U_6 – напряжение базисного узла; $J_1(U_1)$, $J_2(U_2)$ – токи нагрузок

1. Баланс токов в узле 1:

$$\begin{aligned}-Z^{13-1}(\omega_n)(-\lambda_u^{13}(\omega_n)(H_{11}^{13}\dot{U}_1(\omega_n) + H_{12}^{13}\dot{U}_3(\omega_n)) + \\ + \lambda_u^{13}(\omega_n)(H_{21}^{13}\dot{U}_1(\omega_n) + H_{22}^{13}\dot{U}_3(\omega_n))) + \\ -Z^{12-1}(\omega_n)(-\lambda_u^{12}(\omega_n)(H_{11}^{12}\dot{U}_1(\omega_n) + H_{12}^{12}\dot{U}_2(\omega_n)) + \\ + \lambda_u^{12}(\omega_n)(H_{21}^{12}\dot{U}_1(\omega_n) + H_{22}^{12}\dot{U}_2(\omega_n))) = \dot{J}_1(\omega_n).\end{aligned}$$

2. Баланс токов в узле 2:

$$\begin{aligned}-Z^{23-1}(\omega_n)(-\lambda_u^{23}(\omega_n)(H_{11}^{23}\dot{U}_2(\omega_n) + H_{12}^{23}\dot{U}_3(\omega_n)) + \\ + \lambda_u^{23}(\omega_n)(H_{21}^{23}\dot{U}_2(\omega_n) + H_{22}^{23}\dot{U}_3(\omega_n))) + \\ -Z^{12-1}(\omega_n)(-\lambda_u^{12}(\omega_n)e^{-\lambda_u^{12}(\omega_n)l^{12}}(H_{11}^{12}\dot{U}_1(\omega_n) + H_{12}^{12}\dot{U}_2(\omega_n)) + \\ + \lambda_u^{12}(\omega_n)e^{\lambda_u^{12}(\omega_n)l^{12}}(H_{21}^{12}\dot{U}_1(\omega_n) + H_{22}^{12}\dot{U}_2(\omega_n))) = \dot{J}_2(\omega_n),\end{aligned}$$

где верхние индексы относятся к узлам схемы, причем первый индекс относится к номеру начального узла, а второй – к номеру конца ветви.

После преобразований данная система матричных уравнений приобретает вид:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_1(\omega_n) \\ \dot{U}_2(\omega_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{J}_1(\omega_n) \\ \dot{J}_2(\omega_n) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{16} \\ Y_{26} \end{bmatrix} \times \dot{U}_6(\omega_n).$$

Здесь блоки Y_{ij} имеют размерность $m \times m$ и определяются следующими матричными соотношениями:

$$\begin{aligned} Y_{11} &= -Z^{13-1}(\omega_n)(-\lambda_u^{13} H_{11}^{13} + \lambda_u^{13} H_{21}^{13}) - \\ &\quad -Z^{12-1}(\omega_n)(-\lambda_u^{12} H_{11}^{12} + \lambda_u^{12} H_{21}^{12}); \\ Y_{12} &= -Z^{12-1}(\omega_n)(-\lambda_u^{12} H_{12}^{12} + \lambda_u^{12} H_{22}^{12}); \\ Y_{21} &= Z^{12-1}(\omega_n)(-\lambda_u^{12} e^{-\lambda_u^{12} l^{12}} H_{11}^{12} + \lambda_u^{12} e^{\lambda_u^{12} l^{12}} H_{21}^{12}); \\ Y_{22} &= -Z^{23-1}(\omega_n)(-\lambda_u^{23} H_{11}^{23} + \lambda_u^{23} H_{21}^{23}) + \\ &\quad + Z^{12-1}(\omega_n)(-\lambda_u^{12} e^{-\lambda_u^{12} l^{12}} H_{12}^{12} + \lambda_u^{12} e^{\lambda_u^{12} l^{12}} H_{22}^{12}); \\ Y_{13} &= -Z^{13-1}(\omega_n)(-\lambda_u^{13} H_{11}^{13} + \lambda_u^{13} H_{21}^{13}); \\ Y_{23} &= -Z^{23-1}(\omega_n)(-\lambda_u^{23} H_{11}^{23} + \lambda_u^{23} H_{21}^{23}). \end{aligned}$$

Существует определенная закономерность в формировании блоков Y_{ij} :

- на главной диагонали расположены блоки Y_{ii} , представляющие собой суммы матриц, определяемых матричными выражениями типа $-Z^{i-1}(\omega_n)(-\lambda_u^i(\omega_n)H_{11}^i + \lambda_u^i(\omega_n)H_{21}^i)$ при условии, что ветви лежащие между узлами i и j примыкают к узлу i своим началом, и матричными выражениями типа $Z^{j-1}(\omega_n)(-\lambda_u^j(\omega_n)e^{-\lambda_u^j(\omega_n)l^{jj}}H_{12}^j + \lambda_u^j(\omega_n)e^{\lambda_u^j(\omega_n)l^{jj}}H_{22}^j)$ при условии, что ветви, лежащие между узлами i и j , примыкают к узлу i своим концом.
- внедиагональные блоки Y_{ij} вычисляются матричными выражениями типа $-Z^{j-1}(\omega_n)(-\lambda_u^j(\omega_n)H_{11}^j + \lambda_u^j(\omega_n)H_{21}^j)$ при совпадении индексов i и j с номерами узлов начала и конца ветви и матричными выражениями типа $Z^{j-1}(\omega_n)(-\lambda_u^j(\omega_n)e^{-\lambda_u^j(\omega_n)l^{jj}}H_{11}^j + \lambda_u^j(\omega_n)e^{\lambda_u^j(\omega_n)l^{jj}}H_{21}^j)$ при смене порядка следования индексов и номеров узлов начала и конца ветви.

Наиболее сложной процедурой при проведении расчетов по приведенным уравнениям является процедура вычисления функций от матриц типа: $\lambda_u(\omega_n) = \sqrt{Z(\omega_n)Y(\omega_n)}$; $\lambda_u(\omega_n) = \sqrt{Z(\omega_n)Y(\omega_n)}$, $e^{-\lambda_u(\omega_n)l}$, $e^{\lambda_u(\omega_n)l}$, $e^{-\lambda_u(\omega_n)l}$, $e^{\lambda_u(\omega_n)l}$. В дальнейшем вычисления данных функций проводится с использованием теоремы Кэли-Гамильтона [3], в соответствии с которой матричная функция определяется по формуле:

$$f(A) = \frac{1}{\Delta} \sum_{k=1}^n \Delta_{n-k} A^{n-k}.$$

Здесь Δ – определитель Вандермонда $\det[\lambda_i^{k-1}]$, а Δ_j – определитель, получаемый, если в Δ вместо $\lambda_1^j, \lambda_2^j, \dots, \lambda_n^j$, подставить значения функций $f(\lambda_1), f(\lambda_2), \dots, f(\lambda_n)$.

В тех случаях, когда гармонические составляющие токов нагрузок заранее неизвестны и определяются в процессе расчета в зависимости от спектров узловых напряжений с использованием соответствующих математических моделей (например [4, 5]) расчет должен выполняться итерационно:

$$\begin{vmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \dot{U}_1(\omega_n) \\ \dot{U}_2(\omega_n) \end{vmatrix}^{k+1} = \begin{vmatrix} \dot{J}_1(\omega_n, u_1^k) \\ \dot{J}_2(\omega_n, u_2^k) \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} Y_{16} \\ Y_{26} \end{vmatrix} \times \dot{U}_6(\omega_n).$$

Данные уравнения позволяют проводить исследование режимов электрических сетей с нелинейными нагрузками. Кроме того, на основе этих уравнений возможно исследование частотных свойств мно-

гопроводных линий с распределенными параметрами и определение возможности возникновения резонансных режимов на частотах высших гармоник.

Результаты расчета

В качестве примера использования полученных уравнений приведем расчет трехфазной холостой линии 500 кВ с длиной 200 км с горизонтальным расположением проводов без троса со следующими погонными параметрами [2]: $r_0=0,12$ Ом/км; $x_{011}=0,331$ Ом/км; $x_{012}=0,0549$ Ом/км; $x_{013}=0,0245$ Ом/км; $g_{011}=4 \cdot 10^{-8}$ См/км; $g_{012}=2 \cdot 10^{-8}$ См/км; $g_{013}=1 \cdot 10^{-8}$ См/км; $b_{011}=3,41 \cdot 10^{-6}$ См/км; $b_{012}=0,54 \cdot 10^{-6}$ См/км; $b_{013}=0,162 \cdot 10^{-6}$ См/км. При расчете учтено явление поверхностного эффекта в проводах в соответствии с результатами исследований, изложенными в [6]: при $\chi \leq 1$ – $r_{0\approx}/r_0 = 1 + \chi^4/3$; при $\chi \geq 1$ – $r_{0\approx}/r_0 = \chi + 1/4 + 3/(4\chi)$ при $\chi \geq 30$ – $r_{0\approx}/r_0 \approx \chi$.

Здесь $\chi = \frac{R_{np}}{2} \sqrt{\omega \mu \gamma / 2}$; $r_{0\approx}, r_0$ – погонные активные сопротивления провода постоянному току и току частотой ω ; μ, γ – абсолютная магнитная проницаемость и проводимость материала провода; R_{np} – внешний диаметр провода.

Амплитуды напряжений на шинах источника питания принимаются равными нулю в крайних фазах и единице в средней фазе. Частота приложенного напряжения в процессе расчета изменяется от 50 до 5000 Гц ($\omega/\omega_0=1-100$). Входная проводимость определяется численно равной величине входного тока средней фазы. Зависимости составляющих проводимости от частоты приведены на рис. 2.

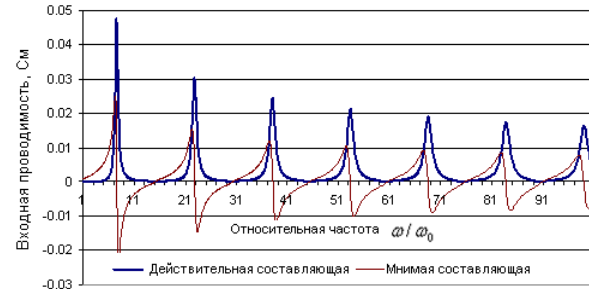


Рис. 2. Зависимости действительной и мнимой составляющих входной проводимости средней фазы линии

Выводы

1. Предложены уравнения установившегося несиноусоидального режима в сложной электрической сети, которые в общем виде имеют общепринятую форму уравнений узловых напряжений в форме баланса токов с той лишь разницей, что значения собственных и взаимных проводимостей определяются матричными выражениями и учитывают основные факторы, определяющие режим: количество проводов многопроводных ЛЭП, способ их подвески, распределенность параметров, поверхностный эффект, а также инцидентность ветви.

2. Полученные системы матричных уравнений установившегося несинусоидального режима обеспечивают расчет узловых напряжений и токов ветвей на всех расчетных частотах, а при

необходимости и их итерационные уточнения, что особенно важно при близости частот отдельных гармонических составляющих к полюсам частотных характеристик ЛЭП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аррилага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах: пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 320 с.: ил.
2. Базуткин В.В., Дмоховская Л.Ф. Расчеты переходных процессов и перенапряжений. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 328 с., ил.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1974. — 832 с., ил.
4. Кучумов Л.А., Харлов Н.Н., Картасиди Н.Ю., Пахомов А.В., Кузнецов А.А. Использование метода гармонического баланса

для расчета несинусоидальных и несимметричных режимов в системах электроснабжения // Электричество. — 1999. — № 12. — С. 10–21.

5. Харлов Н.Н. Математическое моделирование и идентификация узлов нагрузки с нелинейными электроприемниками // Электричество. — 2006. — № 2. — С. 7–12.
6. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники. Т. 2. — Л.: Энергия, 1967. — 407 с., ил.

Поступила 01.04.2009 г.

УДК 621.313.333

УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫМИ ПРОЦЕССАМИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ

А.В. Аристов, Л.А. Паюк

Томский политехнический университет
E-mail: avv@ido.tpu.ru

Рассмотрены вопросы управления переходными процессами в электрических машинах двойного питания, работающих в режиме вынужденных колебаний. Установлена взаимосвязь параметров машины двойного питания с динамическими показателями, даны рекомендации по снижению ударных моментов и токов за счет выбора начальных фаз питающих напряжений или величин коэффициентов сигналов обмоток вторичного элемента.

Ключевые слова:

Электрическая машина двойного питания, переходные процессы, ударные моменты и токи, колебательный режим работы.

При проектировании электромеханических систем, работающих в режиме вынужденных колебаний, особое внимание следует уделять возможности реализации управления переходными процессами при пуске на заданную частоту колебаний. Согласно методу динамического синтеза, заключающегося в том, что в управляемых электрических машинах любая переменная, характеризующая режим работы электромеханического преобразователя энергии, может быть принята в качестве регулируемой. Управление переходными процессами может быть достигнуто за счет изменения механической и электромагнитной инерции системы по заданным законам, полученным исходя из теории оптимального управления.

Для решения поставленной задачи необходимо установить взаимосвязь между электромагнитными нагрузками исполнительного двигателя и его геометрическими параметрами. Для того, чтобы

выводы носили обобщающий характер, в качестве исполнительного двигателя будем рассматривать машину двойного питания (МДП). При этом целесообразно воспользоваться методом и допущениями, изложенными в [1].

В качестве варьируемых геометрических параметров для управляемых электродвигателей колебательного движения следует выбрать: внутренний диаметр расточки статора D , длину магнитопровода l_s и сечение эффективных проводников обмоток статора $q_{\text{эф1}}$ и ротора $q_{\text{эф2}}$. Тогда электрические параметры МДП можно выразить через них с учетом постоянных коэффициентов, присущих данному виду двигателя.

Так, при фазовом способе возбуждения колебательного режима работы активные сопротивления обмоток статора и ротора МДП, приведенные к осям α , β , будут рассчитываться с учетом [2] по соотношениям