

7. Vlasenkov A.N., Pavlov A.P., Pasechnik D.Yu. Optimizatsiya konstruktssii izdelii s primeneniem sistem avtomaticheskoi optimizatsii [Optimization of product structures with the use of automatic optimization systems]. *Nauka i biznes: puti razvitiya* [Science and business: ways of development]. 2020. No. 10 (112). Pp. 16–21.
8. Ol'kov Ya.I., Andronnikov A.V. Avtomatizirovanoe optimal'noe proektirovanie prostranstvennykh metallicheskih sterzhnevyykh konstruktssii (PMSK) s ispol'zovaniem algoritmov strukturnoi optimizatsii [Automated optimal design of spatial metal rod structures (SMRS) with the use of structural optimization algorithms]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo* [Proceedings of universities. Investment. Construction], 2003. No. 12 (540). Pp. 8–13.
9. Chemodurov V.T., Vdovichenko V.V. Optimizatsiya parametrov stroitel'nykh konstruktssii na etape proektirovaniya [Optimization of the parameters of building constructions at the design stage]. *Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve, dizaine, arkhitekture. Sbornik materialov mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* [Modern technologies in construction, design, and architecture. Collection of materials of the International scientific conference], 2013. Pp. 84–91.
10. Litra A.N. Optimizatsiya konstruktssii s pomoshch'yu novykh programmykh metodov [Optimization of structures with the help of new program methods]. *Problemy razvitiya avtomatizatsii i mekhanizatsii protsessov dobychi, pererabotki i transporta gaza i gazovogo kondensata. Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Problems of development of automation and mechanization of processes of production, processing and transport of gas and gas condensate. Materials of the scientific and technical conference]. ООО "Izdatel'skii dom – Yug", ОАО "SPA "Promavtomatika" Publ., 2008. Pp. 90–93.
11. Aleksandrov M.P., Kolobov L.N., Lobov N.A., etc. Gruzopod'yomnye mashiny: Uchebnik dlya vuzov po spetsial'nosti "Pod'emno-transportnye mashiny i oborudovanie" [Lifting machines: A textbook for universities on the specialty "Lifting and transport machines and equipment"]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1986. 400 p.
12. Grebenyuk G.I., Biryulyov V.V. Optimizatsiya uzlov i soedinenii stroitel'nykh konstruktssii [Optimization of assemblies and connections of building constructions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo* [Proceedings of higher educational institutions. Construction], 1994. No. 11. Pp. 15–21.
13. Domozhirov L.I. Optimizatsiya koeffitsienta zapasa prochnosti krupnogabaritnykh detalei s uchetom malyykh defektov [Optimization of the factor of safety margin of large-sized parts taking into account small defects]. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy engineering], 2006. No. 1. Pp. 35–39.
14. Bilyk N.A. Koeffitsienty bezopasnosti i zapasa prochnosti mekhanicheskikh konstruktssii [Coefficients of safety and margin of safety of mechanical structures]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of machinery manufacture and reliability], 2017. No. 5. Pp. 63–70.
15. Serpik I.N., Alekseitsev A.V. Optimizatsiya metallicheskih konstruktssii putyom evolyutsionnogo modelirovaniya [Optimization of metal structures by evolution modeling]. Moscow: DIA Publ., 2012. 240 p.
16. Yur'ev A.G. Osnovy proektirovaniya ratsional'nykh nesushchikh konstruktssii [Fundamentals of designing rational load-bearing structures]. Belgorod: BTISM Publ., 1988. 94 p.
17. Yur'ev A.G., Klyuev S.V. Evolyutsionnye i geneticheskie algoritmy optimizatsii stroitel'nykh konstruktssii [Evolutionary and genetic algorithms for optimizing building structures]. Belgorod: BSTU Publ., 2006. 134 p.
18. Mazhid K.I. Optimal'noe proektirovanie konstruktssii [Optimal design of structures]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1979. 237 p.

Информация об авторах

Трескин Сергей Викторович – Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: sergei.tresckin@yandex.ru

Новиков Николай Николаевич – аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: novikovnikolayn@mail.ru

Иванов Павел Юрьевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: savl.ivanov@mail.ru

Дульский Евгений Юрьевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: e.dulskiy@mail.ru

Information about the authors

Sergei V. Treskin – Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: sergei.tresckin@yandex.ru

Nikolai N. Novikov – Ph.D. student, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: novikovnikolayn@mail.ru

Pavel Yu. Ivanov – Ph. D. of Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Subdepartment of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: savl.ivanov@mail.ru

Evgenii Yu. Dulskii – Ph. D. of Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Subdepartment of Railcars and Railcar Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: e.dulskiy@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).17-24

УДК 62-97/98

Расчет шестифазной линейной электрической цепи методом симметричных составляющих

А. В. Данеев¹, Р. А. Данеев², В. Н. Сизых¹

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

² Восточно-Сибирский институт МВД России, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ daneev@mail.ru

Резюме

На промышленных объектах многие проблемы возникают из-за синхронных машин, которые работают на выпрямительную (несимметричную) нагрузку. В них важную роль играют переходные процессы, которые в синхронных машинах описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений. При исследовании синхронных машин достаточно рассмотреть электромагнитные переходные процессы в силу большой инерционной постоянной машины. Уравнения становятся линейными, но с периодическими коэффициентами, которые также не имеют общего решения, поскольку содержат периодические коэффициенты. Возможности практического применения таких уравнений ограничиваются в общем случае трудностями, связанными с определением собственных чисел. В работе применяется метод симметричных составляющих, являющийся основным методом расчета несимметричных установившихся режимов линейных трехфазных (многофазных) цепей, содержащих в качестве источника электрической энергии или нагрузки вращающиеся машины. Исследование проводится на примере шестифазной цепи с несимметричной нагрузкой. В рассмотренном методе на основании законов Кирхгофа составляется система уравнений, в которых несимметричные системы переменных, действующие в линейной многофазной цепи, заменяются симметричными системами, три из которых являются симметричными системами прямой, обратной и нулевой последовательностей. Для каждой из последовательностей расчетным или экспериментальным путем определяются параметры электрической цепи (например, электрических машин). Преобразованная с учетом этих параметров система уравнений решается относительно неизвестных симметричных составляющих переменных (токов и напряжений). Действительные, несимметричные токи и напряжения находятся методом суперпозиций как векторные суммы соответствующих симметричных составляющих каждой из фаз.

Ключевые слова

синхронные машины, переходные процессы, несимметричные режимы, метод симметричных составляющих

Для цитирования

Данеев А. В. Расчет шестифазной линейной электрической цепи методом симметричных составляющих / А. В. Данеев, Р. А. Данеев, В. Н. Сизых // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 17–24. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).17-24

Информация о статье

поступила в редакцию: 10.04.2021, поступила после рецензирования: 02.05.2021, принята к публикации: 11.05.2021

Calculation of a six-phase linear electric circuit by the method of symmetrical components

A. V. Daneev¹✉, R. A. Daneev², V. N. Sizykh¹

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

² the East-Siberian Institute of the MIA of Russia, Irkutsk, the Russian Federation

✉ daneev@mail.ru

Abstract

At industrial facilities many problems are associated with synchronous machines that determine the rectifier (unbalanced) load. Transient processes play a fundamental role in them, which are described by a system of nonlinear differential equations in synchronous machines. When studying synchronous machines, it is enough to consider electromagnetic transient processes due to the large inertial constant of the machine. The equations become linear, but with periodic coefficients that also do not have a general solution, since they contain periodic coefficients. The practical applicability of these equations is generally limited by the difficulties associated with determining the eigenvalues. The work uses the method of symmetrical components, which is the main method for calculating asymmetric steady-state modes of linear three-phase (multiphase) circuits containing rotating machines as a source of electrical energy or load. The research is carried out on the example of a six-phase circuit with an unbalanced load. In the considered method, on the basis of Kirchhoff's laws, a system of equations is drawn up, in which asymmetric systems of variables acting in a linear polyphaser circuit are replaced by symmetric systems, three of which are symmetric systems of direct, reverse and zero sequences. For each of the sequences, the parameters of the electrical circuit (for example, electrical machines) are determined experimentally or by calculation. The system of equations transformed taking into account these parameters is solved with respect to the unknown symmetric components of the variables (currents and voltages). Valid asymmetric currents and voltages are found by the superposition method as vector sums of the corresponding symmetric components of each phase.

Keywords

synchronous machines, transients, unbalanced modes, method of symmetrical components

For citation

Daneev A.V., Daneev R.A., Sizykh V.N. Calculation of a six-phase linear electric circuit by the method of symmetric components [Calculation of a six-phase linear electric circuit by the method of symmetrical components]. *Sovremennye tekhnologii*.

Article Info

Received: 10.04.2021, Revised: 02.05.2021, Accepted: 11.05.2021

Введение

Метод симметричных составляющих (СС) является основным методом расчета несимметричных установившихся режимов линейных трехфазных (многофазных) цепей, содержащих в качестве источника электрической энергии или нагрузки вращающиеся машины [1].

Сущность метода СС заключается в следующем:

1. На основании законов Кирхгофа составляется система уравнений, в которых несимметричные системы переменных электро-движущие силы (ЭДС, токи, напряжения), действующие в линейной многофазной цепи, заменяются m (m – число фаз) симметричными системами, три из которых являются симметричными системами прямой, обратной и нулевой последовательностей.

2. Для каждой из последовательностей расчетным или экспериментальным путем определяются параметры электрической цепи (например, электрических машин).

3. Преобразованная с учетом этих параметров система уравнений решается относительно неизвестных симметричных составляющих переменных (токов и напряжений) при заданных ЭДС источника.

4. Действительные, несимметричные токи и напряжения находятся методом суперпозиций как векторные суммы соответствующих СС каждой из фаз.

Расчет шестифазной линейной электрической цепи

Рассмотрим методику расчета многофазной электрической цепи методом СС на примере шести-фазной цепи с несимметричной нагрузкой (рис. 1). Здесь источник электрической энергии представлен в виде шести несинусоидальных ЭДС $\dot{E}_1, \dots, \dot{E}_6$ с взаимно-индуктивными связями между фазами.

Данная методика определяется следующей последовательностью расчета:

1. Исходную цилиндрическую матрицу полных сопротивлений электрической цепи определим, как циклическую перестановку фазных импедансов:

$$Z = \begin{bmatrix} Z & Z_m & Z'_m & Z'_0 & Z'_m & Z'_m \\ Z_m & Z & Z_m & Z'_m & Z'_0 & Z'_m \\ Z'_m & Z'_m & Z & Z_m & Z'_m & Z'_0 \\ Z'_0 & Z'_m & Z'_m & Z & Z_m & Z'_m \\ Z'_m & Z'_0 & Z'_m & Z_m & Z & Z_m \\ Z'_m & Z'_m & Z'_0 & Z'_m & Z_m & Z \end{bmatrix},$$

где обозначения импедансов соответствуют замене реальной схемы соединения обмотки «отдельными» катушками с учетом магнитных связей между ними [2].

2. Запишем уравнения баланса напряжений:

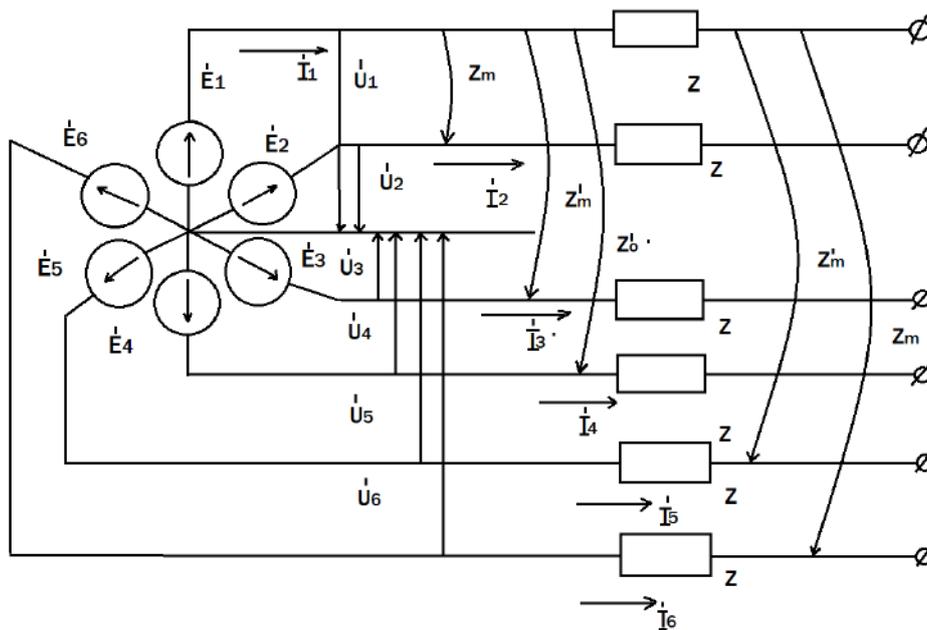


Рис. 1. Шестифазная цепь с несимметричной нагрузкой
Fig. 1. Six-phase circuit with an unbalanced load

$$\dot{U} = \dot{E} - Z\dot{I}, \quad (1)$$

где $\dot{I} = \text{colon}(\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dots, \dot{I}_6)$, $\dot{U} = \text{colon}(\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dots, \dot{U}_6)$, $\dot{E} = \text{colon}(\dot{E}_1, \dot{E}_2, \dots, \dot{E}_6)$ – векторы-столбцы разных токов и напряжений, ЭДС источника размерности 6×1 .

3. Преобразуем уравнения (1) в уравнения симметричных составляющих переменных с помощью подстановки:

$$\dot{X} = V_{CC} \cdot \dot{X}'$$

где $\dot{X}' = \dot{I}', \dot{U}', \dot{E}'$ – переменные СС различных последовательностей систем векторов (рис. 2).

Здесь матрица преобразования к симметричным составляющим при правом направлении вращения систем векторов (по часовой стрелке):

$$U_{CC} = 6 \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^5 & a^4 & a^3 & a^2 & a \\ 1 & a^4 & a^2 & 1 & a^4 & a^2 \\ 1 & a^3 & 1 & a^3 & 1 & a^3 \\ 1 & a^2 & a^4 & 1 & a^2 & a^4 \\ 1 & a & a^2 & a^3 & a^4 & a^5 \end{bmatrix}.$$

Преобразованные уравнения имеют вид:

$$\dot{U}' = \dot{E}' - (V_{CC}^{-1} \cdot Z \cdot V_{CC}) \cdot \dot{I}', \quad (2)$$

где $V_{CC}^{-1} = V_{CC}^*$ (обратная матрица равна комплексно-сопряженной в силу свойств оператора, $a = \exp(j \cdot \frac{\pi}{3})$; $a^6 = 1$, $1 + a + a^2 + \dots + a^5 = 0$, $a^5 = a^*$, ..., $a = a^{-5} = a^{5*}$);

$$V_{CC}^{-1} \cdot Z \cdot V_{CC} = \text{diag}(Z_0, Z_1, \dots, Z_5);$$

$Z_0 = Z + Z_M + Z'_M + Z'_0 + Z'_M + Z_M$ – полное сопротивление для токов нулевой последовательности (рис. 2в);

$Z_1 = Z + a^5 \cdot Z_M + a^4 \cdot Z'_M + a^3 \cdot Z'_0 + a^2 \cdot Z'_M + a \cdot Z_M$ – полное сопротивление для токов прямой последовательности (2а);

$Z_2 = Z + a^4 \cdot Z_M + a^2 \cdot Z'_M + Z'_0 + a^4 \cdot Z'_M + a^2 \cdot Z_M$ – полное сопротивление для токов последовательности, образующей первую трехфазную систему векторов (2в);

$Z_3 = Z + a^3 \cdot Z_M + Z'_M + a^3 \cdot Z'_0 + Z'_M + a^3 \cdot Z_M$ – полное сопротивление для токов последовательности, в которой три вектора направлены встречно другим векторам ($a^3 = -1$) (2е);

$Z_4 = Z + a^2 \cdot Z_M + a^4 \cdot Z'_M + Z'_0 + a^2 \cdot Z'_M + a^4 \cdot Z_M$ – полное сопротивление для токов последовательности, образующей вторую трехфазную систему векторов (2д);

$Z_5 = Z + a \cdot Z_M + a^2 \cdot Z'_M + a^3 \cdot Z'_0 + a^4 \cdot Z'_M + a^5 \cdot Z_M$ – полное сопротивление для токов обратной последовательности (2б); $\dot{I}' = \text{colon}(\dot{I}'_{10}, \dot{I}'_{11}, \dot{I}'_{12}, \dots, \dot{I}'_{15})$, $\dot{U}' = \text{colon}(\dot{U}'_{10}, \dot{U}'_{11}, \dot{U}'_{12}, \dots, \dot{U}'_{15})$,

$\dot{E}' = \text{colon}(\dot{E}'_{10}, \dot{E}'_{11}, \dot{E}'_{12}, \dots, \dot{E}'_{15})$ – вектор-столбцы токов напряжений и ЭДС симметричных составляющих.

В частном случае, когда шестифазная обмотка магнито-связанной электрической цепи является симметричной, т. е. $\dot{E}_2 = a^5 \cdot \dot{E}_1$, $\dot{E}_3 = a^4 \cdot \dot{E}_1$, ..., $\dot{E}_6 = a \cdot \dot{E}_1$, в

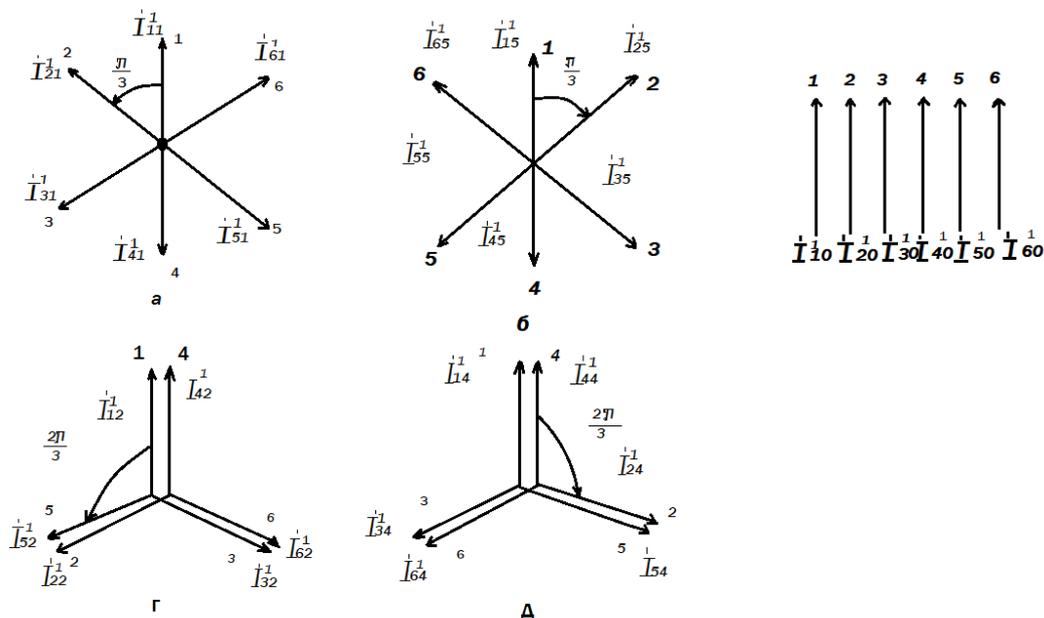


Рис. 2. Последовательность симметричных составляющих
Fig. 2. Sequence of symmetrical components

силу свойств оператора a имеем $\dot{E}' = \text{colon} \left(0,6^{\frac{1}{2}} \cdot \dot{E}_{1,\dots,0} \right)$.

Следовательно, уравнения (2) примут вид:

$$\begin{cases} \dot{U}'_{10} = -z_0 \cdot \dot{I}'_{10}, \\ \dot{U}'_{11} = 6^{\frac{1}{2}} \cdot \dot{E}'_1 - z_1 \cdot \dot{I}'_{11}, \\ \dot{U}'_{12} = -z_2 \cdot \dot{I}'_{12}, \\ \dot{U}'_{13} = -z_3 \cdot \dot{I}'_{13}, \\ \dot{U}'_{14} = -z_4 \cdot \dot{I}'_{14}, \\ \dot{U}'_{15} = -z_5 \cdot \dot{I}'_{15}. \end{cases}$$

Пример

В работах [3–4] на основе математической модели (ММ) шестифазного магнитоэлектрического генератора (МЭГ) в фазовых координатах (ФК), в осях $d, q, 0$, а также методом СС произведен на электровычислительной машине расчет в физических единицах электромагнитных переходных процессов. Далее показан график переходных процессов фазных токов при номинальной нагрузке (рис. 3). Расчетные данные в параметры генератора следующие: мощность – $S_n = 18 \text{ кВ}\cdot\text{А}$; частота вращения – $n = 8000 \text{ об/мин}$; частота ЭДС – $f = 1066 \text{ Гц}$; действующие значения фазных токов и напряжений – $I_{\phi n} = 1 \text{ А}$, $E_{\phi n} = 28,5 \text{ В}$; индуктивные параметры обмотки – $L_s = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$, $L_{aq} = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$; коэффициент мощности – $\cos F = 0,8$ [5].

При математическом описании переходных процессов МЭГ демпфирующие свойства постоянного момента (ПМ) и биметаллической обмотки не учитывались.

ММ в ФК была составлена двумя способами: с численным и аналитическим вычислением матрицы периодических коэффициентов $A(t)$.

По результатам моделирования в ФК можно определить действующие значения токов и напряжений. Для этого достаточно согласно ГОСТ 19705-81 построить огибающую переходных процессов по амплитудным значениям фазных переменных и уменьшить ее значение в $\sqrt{2}$ раз. Однако такой переход можно выполнить непосредственно в модели по следующим формулам:

$$I = \sqrt{0,5 \cdot k_1 \cdot \left(\sum_{j=1}^2 (i_{aj}^2 + i_{bj}^2 + i_{cj}^2) \right)},$$

$$U = \sqrt{0,5 \cdot k_1 \cdot \left(\sum_{j=1}^2 (u_{aj}^2 + u_{bj}^2 + u_{cj}^2) \right)}.$$

Действительно, для установившегося симметричного режима работы МЭГ

$$i_{aj} = I_m \cdot \sin(\gamma_i - \phi), \quad j_{cj} = I_m \cdot \sin\left(\gamma_i - \phi + \frac{2\pi}{3}\right),$$

где $j = 1, 2$; γ – угол между фазными токами и напряжениями при активно-индуктивной нагрузке генератора.

Так как

$$\sum_{j=1}^2 (i_{aj}^2 + i_{bj}^2 + i_{cj}^2) = \frac{1}{k_1} \cdot I_m^2, \quad (3)$$

то для того, чтобы выполнить соотношения $I = I_m / \sqrt{2}$, $U = U_m / \sqrt{2}$, необходимо домножить обе части тождества (3) на коэффициент k_1 , учитывающий равенство амплитуды изображающего вектора фазных токов и напряжений амплитуде тока и напряжения одной фазы.

Для нашего случая можно записать:

$$i = y + f_1(t).$$

В предложении, что $f_1(t)$ – вектор, элементы которого являются малыми периодически изменяющимися величинами, имеют место следующие приближенные формулы:

$$I = \sqrt{0,5 \cdot k_1 \cdot \left(\sum_{i=1}^2 (i_{ai}^2 + i_{bi}^2 + i_{ci}^2) \right)}, \quad (4)$$

$$U = \sqrt{0,5 \cdot k_1 \cdot \left(\sum_{i=1}^2 (u_{ai}^2 + u_{bi}^2 + u_{ci}^2) \right)}, \quad (5)$$

где

$$U_{ai} = L_H \cdot \frac{dy_{ai}}{dt} + R_H \cdot y_{ai}, \quad U_{bi} = L_H \cdot \frac{dy_{bi}}{dt} + R_H \cdot y_{bi},$$

$$U_{ci} = L_H \cdot \frac{dy_{ci}}{dt} + R_H \cdot y_{ci}; \quad i = 1, 2.$$

Уравнения (4), (5) позволяют, аналогично преобразованию Парка – Горева и методу СС, определить действующие значения фазных токов и напряжений в ФК с обратным переходом к фазным переменным состояниям при исследовании симметричных режимов работы МЭГ. Такой переход осуществляется с помощью формул Эйлера для двух трехфазных СС со сдвигом 60° , что позволяет указывать на эквивалентность ортогональных преобразований Парка – Гарева и метода СС в системе координат, связанной с вращающимся ротором синхронных машин (СМ).

Графики переходных процессов для действующего значения напряжения при номинальной нагрузке при моделировании в ФК, методом СС и в осях $d, q, 0$ изображены на (рис. 4).

Видно, что результаты расчета методом СС и в осях $d, q, 0$ незначительно отличаются от результатов моделирования в ФК. Относительная погрешность вычислений не превышает 0,5 % по сравнению с результатом моделирования в ФК.

Длительность переходных процессов исследуемого МЭГ составляет 0,36 мс, что примерно в 3 раза меньше периода изменения частоты ЭДС. Небольшая длительность переходных процессов в значительной степени определяется малыми индуктивностями обмотки статора, что является отличительной особенностью переходных процессов в ЭМ с ПМ.

В целях сравнения моделей по параметрическим возмущениям исследовались различные режимы

работы МЭГ. По результатам расчета в различных системах координат построена внешняя характеристика генератора (рис. 5). Результаты моделирования в ФК, методом СС и осях $d, q, 0$ при набросе нагрузки от нуля до четырех номиналов (4Н) практически совпадают. В диапазоне изменения нагрузки от 10 до 150 % падение напряжения ΔU_1 составило 5,4 В, что позволяет сделать вывод о жесткости внешней характеристики МЭГ. Рабочий диапазон определяется точками пересечения внешней характеристики генератора с вольт-амперными характеристиками нагрузки $U_{H1} = f(I_{H1})$ и $U_{H2} = f(I_{H2})$ (рис. 5). Цифровое моделирование показывает, что при решении уравнений МЭГ методом СС затраты машинного времени сокращаются в 13–14 раз по сравнению с временем счета в ФК. Погрешность вычислений методом СС по сравнению с результатом моделирования в ФК не превышает 0,1 %.

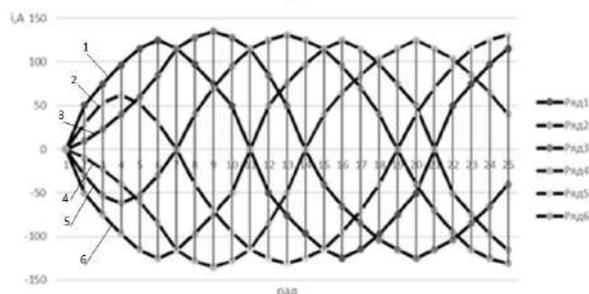


Рис. 3. Переходные процессы фазных токов при номинальной нагрузке

Fig. 3. Transient processes of phase currents at the rated load

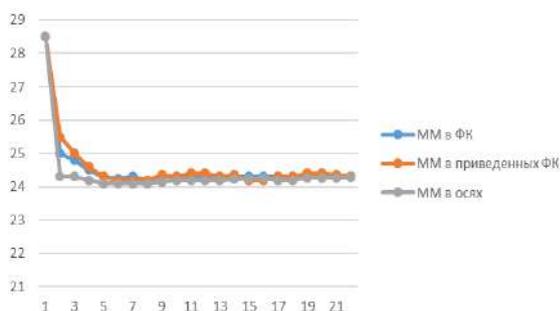


Рис. 4. Переходные процессы для действующего значения напряжения при номинальной нагрузке

Fig. 4. RMS voltage transients at the rated load

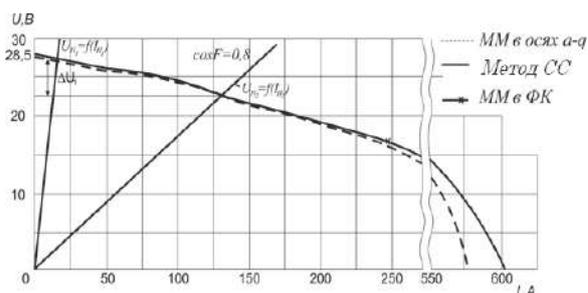


Рис. 5. Внешняя характеристика генератора
Fig. 5. External characteristic of the generator

Обобщая изложенное, можно сказать, что при использовании симметричных режимов работы МЭГ целесообразно использовать ММ метода СС и ММ в осях $d, q, 0$. Результат моделирования получается в действующих значениях фазных токов и напряжений.

Таким образом, моделирование методом СС позволяет получить результаты, удовлетворяющие по точности вычислений расчету в ФК, но с существенно меньшими вычислительными затратами. В то же время данный метод не имеет ограничений метода во вращающихся осях $d, q, 0$ при исследовании несимметричных режимов работы МЭГ. Ряд близких и смежных вопросов моделирования объектов различной природы рассмотрен в работах [6–20].

Заключение

На примере шестифазной магнитно-связанной электрической цепи в статье изложены основные этапы применения метода СС при расчете установившихся режимов многофазных цепей. Преобразование СС многофазных цепей диагонализует матрицу полных сопротивлений, т. е. позволяет исключить магнитно-связанные контуры высоких порядков. В симметричной многофазной электрической цепи индуктируется только ЭДС прямой последовательности. В отличие от преобразования Парка – Горева метод СС позволяет исследовать как симметричные, так и несимметричные переходные режимы в СМ.

Список литературы

1. Сипайлов Г.А., Лоос А.В. Математическое моделирование электрических машин. М. : Высш. шк., 1980. 175 с.
2. Крон Т. Тензорный анализ сетей. М. : Советское радио, 1978. 720 с.
3. Данеев А.В., Данеев Р.А. Сизых В.Н. Моделирование многофазных синхронных машин в различных системах координат // Изв. Самар. науч. центра Рос. академии наук. 2020. Т. 22, № 4. С. 104–115.
4. Силин Л.Ф. Проектирование асинхронных двигателей. Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2002. 236 с.
5. Особенности электромагнитного расчета генераторов с редкоземельными постоянными магнитами / И.И. Алексеев, Б.С. Зайчихин, М.Г. Клейман и др. // Электричество. 1985. № 11. С. 27–30.

6. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины. М.-Л. : Госэнергоиздат, 1950. 551 с.
7. Арешян Г.Л. Вопросы преобразования дифференциальных уравнений многофазных электрических машин // Изв. Академии наук СССР. Энергетика и транспорт. 1982. № 5. С. 52–62.
8. Осин И.Л., Шакарян Ю.Г. Электрические машины. М. : Высш. шк., 1990. 304 с.
9. Сизых В.Н., Мухопад А.Ю. Ассоциативный автомат адаптивного управления технологическими процессами на основе нейронных сетей // Науч. вестн. Новосиб. гос. техн. ун-та. 2014. № 1 (54). С. 34–45.
10. Сизых В.Н. Итерационно-релаксационный метод // Автоматика и телемеханика. 2005. № 6. С. 47–58.
11. Мухопад Ю.Ф., Пашков Н.Н., Сизых В.Н. Адаптивный подход к нейронному управлению одним классом абсолютно устойчивых систем // Фундаментальные исследования. 2011. № 8-1. С. 139–147.
12. К апостериорному моделированию нестационарных гиперболических систем / А.В. Данеев, В.А. Русанов, М.В. Русанов и др. // Изв. Самар. науч. центра Рос. академии наук. 2018. Т. 20. № 1 (81). С. 106–113.
13. Данеев А.В., Русанов В.А. Об одном классе сильных дифференциальных моделей над счетным множеством динамических процессов конечного характера // Изв. высш. учеб. заведений. Математика. 2000. № 2. С. 32–40.
14. Rusanov V.A., Antonova L.V., Daneev A.V. Inverse problem of nonlinear systems analysis: a behavioral approach // *Advances in Differential Equations and Control Processes*. 2012. Т. 10. № 2. Р. 69–88.
15. Данеев А.В., Русанов В.А., Шарпинский Д.Ю. Нестационарная реализация Калмана – Месаровича в конструкциях оператора Релея-Ритца // Кибернетика и системный анализ. 2007. № 1. С. 82–91.
16. Асинхронные двигатели общего назначения / Е.П. Бойко, Ю.В. Гаинцев, Ю.М. Ковалев и др. М. : Энергоиздат, 1980. 488 с.
17. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. СПб. : Питер, 2007. 320 с.
18. Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины. М. : Академия, 2010. 320 с.
19. Копылов И. П. Электрические машины. М. : Высш. шк.; Логос. 2006. 680 с.
20. Тер-Газарян Г.Н. Несимметричные режимы синхронных машин. М. : Энергия, 1969. 214 с.

References

1. Sipailov G.A., Loos A.V. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin [Mathematical modeling of electrical machines]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1980. 175 p.
2. Kron T. Tenzorniy analiz setei [Tensor analysis of networks]. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1978. 720 p.
3. Daneev A.V., Daneev R.A., Sizykh V.N. Modelirovanie mnogofaznykh sinkhronnykh mashin v razlichnykh sistemakh koordinat [Simulation of multiphase synchronous machines in different coordinate systems]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi Akademii nauk [The Bulletin of the Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences]*, 2020. Vol. 22, No. 4. Pp. 104–115.
4. Silin L.F. Proektirovanie asinkhronnykh dvigatelei [Design of asynchronous motors]. Krasnoyarsk: IPTs KSTU Publ., 2002. 236 p.
5. Alekseev I.I., Zaichikhin B.S., Kleiman M.G., Starovoitova N.P. Osobnosti elektromagnitnogo rascheta generatorov s redkozemel'nymi postoyannymi magnitami [Features of electromagnetic calculation of generators with rare-earth permanent magnets]. *Elektrichestvo [Electricity]*, 1985, No. 11. P. 27–30.
6. Gorev A.A. Perekhodnye protsessy sinkhronnoi mashiny [Transient processes of a synchronous machine]. Moscow: Gosenergoizdat Publ., 1950. 551 p.
7. Arshyan G.L. Voprosy preobrazovaniya differentsial'nykh uravnenii mnogofaznykh elektricheskikh mashin [Questions of transformation of differential equations of multiphase electrical machines]. *Izvestiya AN SSSR. Energetika i transport*, 1982. No. 5. Pp. 52–62.
8. Osin I.L., Shakaryan Yu.G. Elektricheskie mashiny [Electric cars]. Moscow: Higher school, 1990. 304 p.
9. Sizykh V.N., Mukhopad A.Yu. Assotsiativnyi avtomat adaptivnogo upravleniya tekhnologicheskimi protsessami na osnove neironnykh setei [Associative automaton of adaptive control of technological processes based on neural networks]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [The science bulletin of Novosibirsk State Technical University]*, 2014. No. 1 (54). Pp. 34–45.
10. Sizykh V.N. Iteratsionno-relaksatsionnyi metod [An iterative-relaxation method]. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and telemechanics]*, 2005. No. 6. Pp. 47–58.
11. Mukhopad Yu.F., Pashkov N.N., Sizykh V.N. Adaptivnyi podkhod k neironnomu upravleniyu odnim klassom absolutno ustoychivyykh sistem [An adaptive approach to neural control for one class of absolutely stable systems]. *Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental research]*, 2011. No. 8-1. Pp. 139–147.
12. Daneev A.V., Rusanov V.A., Rusanov M.V., Sizykh V.N. K aposteriornomu modelirovaniyu nestatsionarnykh giperbolicheskikh sistem [Towards a posteriori modeling of nonstationary hyperbolic systems]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk [The Bulletin of the Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences]*, 2018. Vol. 20. No. 1 (81). Pp. 106–113.
13. Daneev A.V., Rusanov V.A. Ob odnom klasse sil'nykh differentsial'nykh modelei nad schetnym mnozhestvom dinamicheskikh protsessov konechnogo kharaktera [On a class of strong differential models over a countable set of dynamic processes of a finite nature]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Matematika [Proceedings of universities. Mathematics]*, 2000. No. 2. Pp. 32–40.
14. Rusanov V.A., Antonova L.V., Daneev A.V. Inverse problem of nonlinear systems analysis: a behavioral approach. *Advances in Differential Equations and Control Processes*, 2012. Vol. 10. No. 2. Pp. 69–88.

15. Daneev A.V., Rusanov V.A., Sharpinskiy D.Yu. Nestatsionarnaya realizatsiya Kalmana – Mesarovicha v konstruktsiyakh operatora Releya–Rittsa [Non-stationary realization of Kalman-Mesarovich in the constructions of the Rayleigh-Ritz operator]. *Kibernetika i sistemnyi analiz [Cybernetics and system analysis]*, 2007. No. 1. Pp. 82–91.
16. E.P. Boiko, Yu.V. Gaintsev, Yu.M. Kovalyov et al. Asinkhronnye dvigateli obshchego naznacheniya [Asynchronous motors of general purpose]. In Petrov V.M. and Kravchik A.E. (eds) Moscow: Energoizdat Publ., 1980. 488 p.
17. Vol'dek A.I., Popov V.V. Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka [Electric cars. AC machines]. St. Petersburg: Piter Publ., 2007. 320 p.
18. Bespalov V.Ya., Kotelenets N.F. Elektricheskie mashiny [Electric cars]. Moscow: Academy Publishing center, 2010. 320 p.
19. Kopylov I.P. Elektricheskie mashiny [Electric machines]. Moscow: Vysshaya shkola; Logos Publ. 2006. 680 p.
20. Ter-Gazaryan G.N. Nesimmetrichnye rezhimy sinkhronnykh mashin [Asymmetrical modes of synchronous machines]. Moscow: Energiya Publ., 1969. 214 p.

Информация об авторах

Данеев Алексей Васильевич – профессор кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: daneev@mail.ru

Данеев Роман Алексеевич – доцент кафедры информационно-правовых дисциплин, Восточно-Сибирский институт МВД России, e-mail: romasun@mail.ru

Сизых Виктор Николаевич – профессор кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: szych_vn@mail.ru

Information about the authors

Aleksei V. Daneev – Professor of the Subdepartment of Information Systems and Information Security, Irkutsk State Transport University, e-mail: daneev@mail.ru

Roman A. Daneev – Associate Professor of the Subdepartment of Information technologies, East-Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, e-mail: romasun@mail.ru

Viktor N. Szykh – Professor of the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, e-mail: szych_vn@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).24-30

УДК 621.833.65

Суперпозиция вращений в механизмах

И. П. Попов✉

Курганский государственный университет, г. Курган, Российская Федерация

✉ ip.popow@yandex.ru

Резюме

Предпосылкой рассмотрения суперпозиции вращений в механизмах является принцип суммирования прямолинейных равномерных движений. Цель работы – установить, как в подобной ситуации обстоит дело при сложении вращательных синхронных или кратных движений. Задачи исследования состоят в аналитическом описании и построении годографов комбинированных вращательных механических движений. Практический аспект темы определяется тем, что во многих механизмах, таких как мультиинертный осциллятор, планетарные передачи, приводы фрез в машинах для очистки труб больших диаметров и т. п. реализуется суммирование вращательных движений, и форма годографа является полезной информацией при проектировании подобных устройств. Установлено, что подобно тому, как результатом сложения двух равномерных прямолинейных движений является также равномерное прямолинейное движение, результатом сложения двух равномерных однонаправленных круговых движений является также равномерное круговое движение. Годографом при сложении двух равномерных противоположно направленных круговых движений будет эллипс. В частном случае эллипс может вырождаться в отрезок прямой линии. Определены характеристики эллиптического годографа, в том числе большая и малая полуоси, корни характеристического уравнения, эксцентриситет, фокусы, угол наклона осей. Решена обратная задача – определение скоростей вращения по виду годографа. При сложении двух несинхронных вращений возможны годографы в виде улитки, имеющей сходство с улиткой Паскаля. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании механизмов, реализующих сложные вращательные движения.

Ключевые слова

координаты, вращательные движения, вектор, годограф, эллипс, улитка Паскаля

Для цитирования

Попов И. П. Суперпозиция вращений в механизмах / И. П. Попов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 24–30. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).24-30

Информация о статье

поступила в редакцию: 17.03.2021, поступила после рецензирования: 20.03.2021, принята к публикации: 11.04.2021

Superposition of rotations in mechanisms