

7. Захаренко В.С. Особенности имитационного моделирования асинхронного двигателя для составления модели с учетом коммутации и при несимметричных схемах включения / В.С. Захаренко, И.В. Дорощенко // Вестник Гомельского гос. техн. универ-та им. П.О. Сухого. – 2011. – № 3. – С. 66 – 74.

РАСЧЁТ ВНУТРЕННИХ ПАРАМЕТРОВ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ ПРИ ЕЁ РАБОТЕ В РЕЖИМЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Л.А. Паюк

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, Томск

При работе электрической машины в режиме вынужденных колебаний необходимо учитывать особенности формирования колебательного режима работы на её внутренние параметры. Нелишним будет отметить влияние, в первую очередь, частоты питающей сети на них, а так же взаимосвязь геометрических размеров исполнительного двигателя, динамических и энергетических характеристик электропривода колебательного движения [1]. При этом целесообразно воспользоваться методом и допущениями, изложенными [2].

Активное сопротивление фазы статора r_s и ротора r_r согласно [2] определяем по основной расчётной формуле:

$$r = k_r \rho_{\vartheta} \frac{L}{q_{\text{эф}} a}, \quad (1)$$

где L – общая длина эффективных проводников фазы обмотки, определяется по выражению: $L = l_{\text{ср}} W$, здесь $l_{\text{ср}}$ – средняя длина витка обмотки, W – число витков фазы обмотки; $q_{\text{эф}}$ – сечение эффективного проводника фазы обмотки, a – число параллельных ветвей, ρ_{ϑ} – удельное сопротивление материала обмотки при расчётной температуре, k_r – коэффициент увеличения активного сопротивления фазы обмотки от действия эффекта вытеснения тока.

Число витков обмотки статора определим, используя известные выражения для магнитного потока:

$$\Phi = \frac{B_{\delta} D l_{\delta}}{p} = \frac{k_E U}{4 k_B f W k_{\text{об}}}, \quad (2)$$

где B_{δ} – значение индукции в воздушном зазоре; p – число пар полюсов ЭМ; f – частота питающей сети; k_E – коэффициент, учитывающий падение напряжения в обмотке статора; k_B – коэффициент формы поля; $k_{\text{об}}$ – обмоточный коэффициент.

Из данного равенства определяем число витков по выражению:

$$W = \frac{k_E}{4k_B k_{o\delta}} \cdot \frac{pU}{B_\delta f} \cdot \frac{1}{Dl_\delta}, \quad (3)$$

или $W = K_1 \cdot \frac{1}{Dl_\delta},$

где $K_1 = \frac{k_E}{4k_B k_{o\delta}} \cdot \frac{pU}{B_\delta f}$ – коэффициент, учитывающий влияние ЭДС статора и формы поля асинхронного двигателя.

Подставив выражение (3) в (1) получим зависимости активных сопротивлений фаз статора и ротора от геометрических параметров электрической машины:

$$\begin{aligned} r_s &= \frac{k_{r1} K_{1s} (2l_\delta + k_1 \pi D p)}{D l_\delta q_{\text{эф1}} a_1 \rho_{\theta 1}}; \\ r_r &= \frac{k_{r2} K_{1r} (2l_\delta + k_1 \pi p D_2)}{D_2 l_\delta q_{\text{эф2}} a_2 \rho_{\theta 2}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где k_1 – коэффициент приведения параметров первичной обмотки к параметрам вторичной обмотки, l_δ – длина магнитопровода, D – внутренний диаметр расточки статора, D_2 – внешний диаметр ротора, который определяем по выражению: $D_2 = D - 2\delta$, согласно рекомендациям [3].

Для МДП активные сопротивления обмоток статора и ротора, приведенные к осям α, β рассчитываются с учетом [2, 4] запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned} r_{\alpha s} &= \frac{1}{\omega} \left[A_1 \cdot \frac{1}{D q_{\text{эф1}}} + A_2 \cdot \frac{1}{l_\delta q_{\text{эф1}}} \right]; \\ r_{\beta s} &= \frac{1}{\omega + \Omega} \left[A_1 \cdot \frac{1}{D q_{\text{эф1}}} + A_2 \cdot \frac{1}{l_\delta q_{\text{эф1}}} \right]; \\ r_{\alpha r} &= \frac{1}{\omega} \left[A_3 \cdot \frac{(1 - \frac{2\delta}{D})^2}{(D - 2\delta) q_{\text{эф2}}} + A_4 \cdot \frac{(1 - \frac{2\delta}{D})^2}{l_\delta q_{\text{эф2}}} \right]; \\ r_{\beta r} &= \frac{1}{\omega + \Omega} \left[A_3 \cdot \frac{(1 - \frac{2\delta}{D})^2}{(D - 2\delta) q_{\text{эф2}}} + A_4 \cdot \frac{(1 - \frac{2\delta}{D})^2}{l_\delta q_{\text{эф2}}} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

где δ – величина воздушного зазора; коэффициенты $A_1 \div A_4$ определяемые выражениями:

$$A_1 = \pi \rho \frac{k_{r1} k_{E1} p_1 U_1}{a_1 k_{B1} k_{o\delta 1} B_\delta}; \quad A_2 = \frac{2,2 A_1}{p_1}; \quad A_3 = [A_1]^* k_1; \quad A_4 = [A_2]^* k_1.$$

Здесь коэффициенты $[A_1]^*$, $[A_2]^*$ находятся при соответствующей замене параметров статора на роторные.

Индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора определяются выражением:

$$L_{\sigma} = 2.5110^{-2} \left(\frac{W}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_{\delta}}{pq} \Sigma \lambda ,$$

где q – число пазов на полюс и фазу; $\Sigma \lambda$ – коэффициент магнитной проводимости, учитывающий пазовую (λ_{Π}), лобовую ($\lambda_{Л}$) и дифференциальную ($\lambda_{Д}$) составляющие:

$$\Sigma \lambda = \lambda_{\Pi} + \lambda_{Л} + \lambda_{Д} .$$

Так, для обмоток αs , βs первичного элемента они могут быть рассчитаны с учетом выбранной конфигурации паза и вида обмотки по формулам:

$$L_{\sigma\alpha s} = \frac{1}{\omega^2} A_5 \cdot \frac{1}{D^2 l_{\delta}} \Sigma \lambda_1 ;$$

$$L_{\sigma\beta s} = \frac{1}{(\omega + \Omega)^2} A_5 \cdot \frac{1}{D^2 l_{\delta}} \Sigma \lambda_2 , \quad (6)$$

где A_5 – коэффициент пропорциональности, который рассчитывается по следующему выражению: $A_5 = 6.2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{p}{q} \left(\frac{k_E U_1}{k_B k_{\text{об1}} B_{\delta}} \right)^2$; $\Sigma \lambda_1$, $\Sigma \lambda_2$ – коэффициенты

магнитной проводимости обмоток статора и ротора, учитывающие: пазовую, лобовую и дифференциальную составляющие, которые в свою очередь определяем по следующим формулам:

$$\lambda_{Л} = A_6 \cdot \frac{D}{l_{\delta}} + A_7 \cdot \frac{1}{l_{\delta}} - \text{лобовая составляющая,}$$

$$\lambda_{Д} = A_8 \cdot \frac{(D - A_{10})[(D - 2\delta) - A_{11}]}{(D - 2\delta)} \cdot q_{\text{эф}}^2 + A_9 \cdot \frac{(D - A_{10})[(D - 2\delta) - A_{11}]}{D(D - 2\delta)} -$$

дифференцирующая составляющая,

$$\text{где } A_6 = \frac{q\beta}{p} (0,534k_{\text{л1}} - 0,341), \quad A_7 = q \left[0,534 \frac{k_{\text{л1}}\beta h_{\text{л1}}}{p} + 0,341(2B + h_{\text{л1}}) \right],$$

$$A_8 = 0.00575 \frac{1}{Z_1 \delta}, \quad A_9 = \frac{0.261}{Z_1 \delta} [2 - (k_{\text{об1}})^2 (1 + \Delta Z_1)], \quad A_{10} = \frac{\gamma_1 \delta Z_1}{\pi}, \quad A_{11} = \frac{\gamma_2 \delta Z_2}{\pi}$$

коэффициенты взаимосвязи лобового и дифференцирующего рассеяния.

Здесь β , $k_{\text{л1}}$, $h_{\text{л1}}$, B , Z_1 , Z_2 , ΔZ , γ_1 , γ_2 – соответственно коэффициент укорочения шага обмотки и коэффициент, определяемый числом пар полюсов машины и наличием изоляции в лобовых частях; высота паза статора; длина вылета лобовых частей; число пазов статора и ротора; коэффициенты, зависящие от соотношения ширины шлица, величины зубцового деления и воздушного зазора.

Пазовая магнитная проводимость определяется исходя из выбранной конфигурации паза. Так, для трапецеидального паза она может быть рассчитана, согласно [2], как:

$$\lambda_{\Pi} = \frac{1}{\omega} \left(A_{12} \cdot \frac{q_{\phi}}{D^3 l_{\delta}} + A_{13} \cdot \frac{1}{D^2 l_{\delta}} \right),$$

где коэффициенты взаимосвязи для пазового рассеяния рассчитываются по выражениям:

$$A_{12} = \frac{0,4mak_E p U_1 Z_1}{c_1 k_{\Pi} k_B k_{\text{об1}} B_{\delta} (1 - 1/\xi k_{cm})} \cdot \left(\frac{c_1}{3c_5} k_{\beta} + \frac{c_2}{c_5} k'_{\beta} + \frac{3c_3}{c_6} k'_{\beta} \right);$$

$$A_{13} = \frac{0,4mak_E p U_1 k'_{\beta}}{c_1 k_{\Pi} k_B k_{\text{об1}} B_{\delta} (1 - 1/\xi k_{cm}) c_7},$$

где $c_1 \div c_7$, k_{Π} – коэффициенты пропорциональности, заполнения паза изолированными проводами, ξ – отношение индукции в зубцах и воздушном зазоре.

Для вторичного элемента индуктивности рассеяния обмоток αr , βr определяются аналогично, путем соответствующей замены параметров статора на роторные с учетом коэффициента приведения k_1 .

Полную взаимоиндуктивность колебательного электродвигателя можно рассчитать по следующему выражению:

$$L_m = \frac{x_m}{\omega},$$

где x_m – сопротивление взаимной индукции обмоток статора и ротора определяем по методике [2]:

$$x_m = \frac{1}{\omega^2} \cdot \frac{k_m}{D l_{\delta}}, \quad (7)$$

где k_m – коэффициент, учитывающий особенности электрической машины, который находим следующим образом:

$$k_m = \frac{2,5mk_{\text{об1}} K_1^2}{10^8 \delta k_{\mu} p^2},$$

где k_{μ} – коэффициент насыщения магнитной цепи, m число фаз электрической машины.

Полные индуктивности обмоток статора и ротора (выражения 2.4, 2.5) по осям α и β запишутся как:

$$L_{\alpha s} = L_{\sigma \alpha s} + L_m; L_{\beta s} = L_{\sigma \beta s} + L_m; L_{\alpha r} = L_{\sigma \alpha r} + L_m; L_{\beta r} = L_{\sigma \beta r} + L_m; \quad (8)$$

Расчёт параметров электрической машины можно свести к алгоритму, представленному на рис. 1. Алгоритм расчёта включает в себя следующие блоки: ввод данных и ограничений; определение диапазона переменных; расчёт коэффициентов; расчёт активных сопротивлений фаз обмоток статора и ротора ЭМ; определение конфигураций пазов и расчёт проводимостей

рассеяния; определение полных индуктивностей рассеяния фаз обмоток статора и ротора; анализ и вывод результатов.

Исходными данными для расчёта являются начальные значения геометрических параметров ЭМ: внутренний диаметр расточки статора (D), длина магнитопровода (l_δ), сечение эффективных проводников фаз обмоток статора ($q_{\text{эф1}}$) и ротора ($q_{\text{эф2}}$).

Полученные выражения позволяют оценить влияние частоты колебаний подвижного элемента двигателя Ω и его геометрических размеров на электрические параметры электромеханического преобразователя энергии при фазовом способе возбуждения колебательного режима работы.

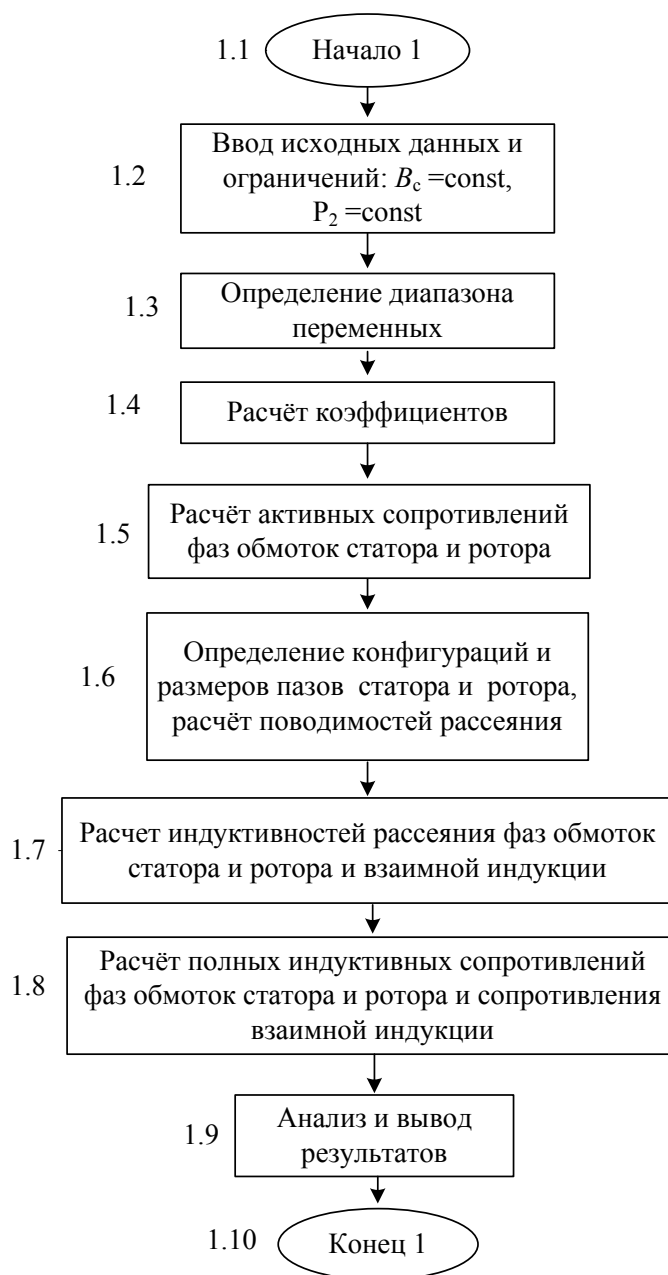


Рис. 1. Алгоритм расчёта параметров электрической машины в зависимости от её геометрии

Так, на рис. 2 представлены области изменения активного сопротивления обмотки статора и полной ее индуктивности по оси α при варьировании размерами МДП. Численные расчеты проведены для двигателя с фазным ротором типа МТН–011–6У, имеющего следующие номинальные параметры: $R_s=4,5$ [Ом]; $R_r=7,41$ [Ом]; $x_s=4,11$ [Ом]; $x_r=3,778$ [Ом]; $x_m=5,3$ [Ом]; $L_s=0,00131$ [Гн]; $L_r=0,0012$ [Гн], $L_m=0,0085$ [Гн].

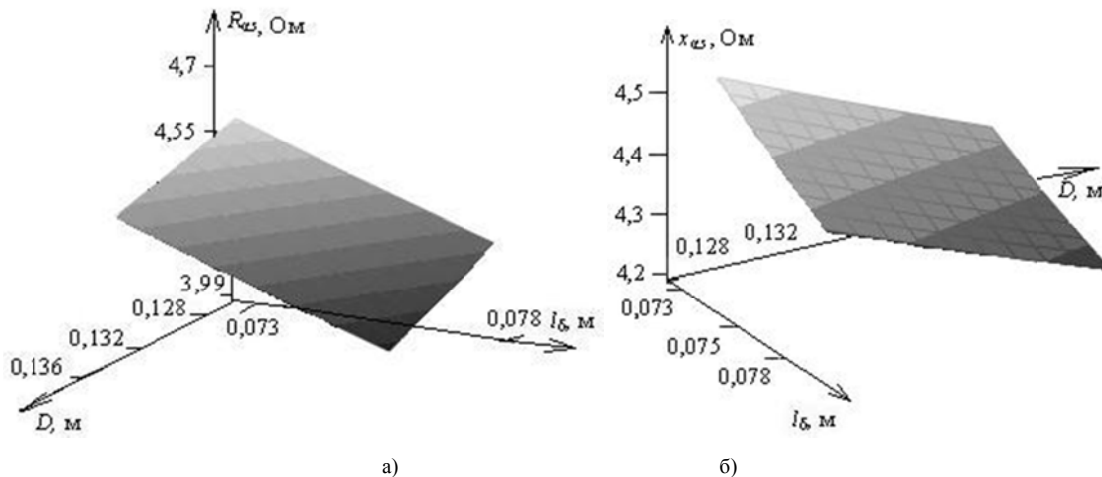


Рис. 2. Области изменения: а) активного сопротивления статора по оси α ; б) полного индуктивного сопротивления статора по оси α : при $l_\delta = \text{var}$, $D = \text{var}$, $q_{\text{эф1}} = \text{const}$, $q_{\text{эф2}} = \text{const}$, $\Omega=31,4$ [рад/сек]

Проанализировав, полученные графики (рис. 2) можно прийти к выводу, что при изменении длины магнитопровода l_δ от 0,073 до 0,079 [м] и внутреннего диаметра статора D от 0,128 до 0,136 [м] активное сопротивление статора по оси α ($R_{\alpha s}$) уменьшается практически по линейному закону (не имея точек экстремума) от значения 33 до 3,99 [Ом], что составляет 12%.

Аналогично изменяется активное сопротивление статора по оси β , и активные сопротивления ротора по осям α и β . Они также имеют тенденцию к уменьшению своих значений при возрастании варьируемых параметров, однако отклонение их от базового значения составляет всего 2,5%. Полные индуктивные сопротивления статора и ротора, напротив, увеличиваются в среднем на 2%.

Согласно рис. 3 наибольшее влияние на параметры МДП, работающей в колебательном режиме работы, оказывают изменение величин сечений эффективных проводников фаз обмоток статора и ротора.

При варьировании их значений в пределах: $q_{\text{эф1}}$ от $1,1 \cdot 10^{-6}$ до $1,7 \cdot 10^{-6}$ [м²], $q_{\text{эф2}}$ $5,8 \cdot 10^{-7}$ до $6,6 \cdot 10^{-7}$ [м²] активное сопротивление обмотки статора по оси α ($R_{\alpha s}$) изменялось в пределах от 4,56 до 3,8 [Ом], что составило 20%. Аналогично уменьшается и активное сопротивление статора по оси β ($R_{\beta s}$). В этом случае также наблюдается уменьшение активных сопротивлений ротора по осям α и β на 3% и 4% соответственно. Полные индуктивные

сопротивления обмоток статора x_s и ротора x_r увеличиваются на 12% и 26,0% соответственно. Они так же не имеют точек экстремума.

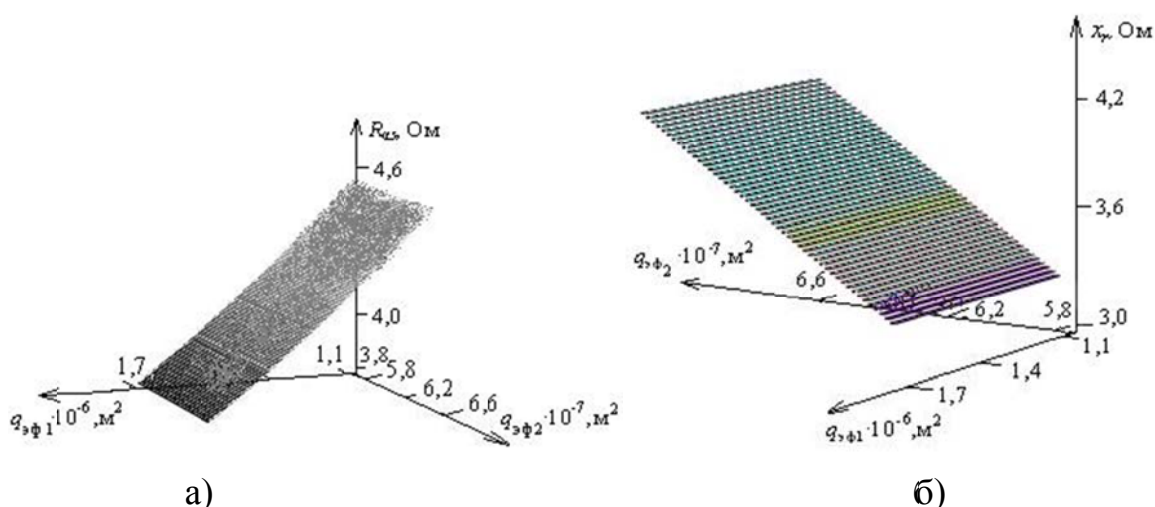


Рис. 3. Области изменения: а) активного сопротивления статора по оси α ; б) полного индуктивного сопротивления статора: при $q_{\Phi 1} = \text{var}$, $q_{\Phi 2} = \text{var}$, $l_{\delta} = \text{const}$, $D = \text{const}$, $\Omega = 31,4$ [рад/сек]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аристов А.В., Паюк Л.А. Взаимосвязь динамических показателей электропривода колебательного движения с геометрическими параметрами МДП при фазовой модуляции // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы, 2010. – С. 116–121.
2. Загорский А. Е., Управление переходными процессами в электрических машинах переменного тока. / А.Е. Загорский, Ю.Г. Шакарян. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 176 с.
3. Иоханнабер Ф. Литьевые машины. Справочное руководство 4-е. изд. Перевод с английского под общ. ред. д-ра. т. н., проф. Э. Л. Калиничева – Спб.: ЦОП «Профессия», 2010. – 432 с.
4. Луковников В. И. Электромашинный безредукторный колебательный электропривод. – Электротехническая промышленность. Электропривод, 1980, вып. 8 (88). – С. 14–18.

МИКРОГЭС С АВТОБАЛАНСНЫМ ВЫРАВНИВАНИЕМ НАГРУЗКИ

*Ю.Н. Дементьев**, *А.Д. Суровец**, *Р.В. Кузьмин***, *В.И. Суздорф***

* – Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, Томск

** – Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, Россия, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре

Энергетические установки, требующие питания от источника стабильной частоты и напряжения переменного тока ставят специфичную задачу