УДК 62-83: 621.313.333

К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИММЕТРИЧНЫХ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ ПОДКЛЮЧЕНИИ К ЭЛЕКТРОСЕТИ

Докт. техн. наук, проф. ЛУКОВНИКОВ В. И., асп. РУДЧЕНКО Ю. А., студ. ТУРЕНКОВА А. В.

Гомельский государственный технический университет имени П.О.Сухого

Нетрадиционное включение трехфазных короткозамкнутых асинхронных электродвигателей в одно- или двухфазную электрическую сеть переменного тока нередко позволяет построить высокоэффективные, ресурсосберегающие электроприводы вращательного и колебательного движений рабочего органа самых разнообразных машин как редукторного, так и безредукторного исполнения [1…3]. Такой подход к созданию электроприводов интересен тем, что он позволяет использовать нормальные трехфазные асинхронные электродвигатели без изменения их конструкций и обычную однофазную сеть без изменения ее напряжения.

Процесс проектирования электроприводов обычно осуществляется в два этапа: на первом – для реализации технического задания выбирается структура, а на втором – осуществляется поиск оптимальных параметров.

Так как структура электропривода в данной статье определена, далее ставится задача выявления изменений математических моделей и электрических параметров симметричных трехфазных короткозамкнутых асинхронных электродвигателей при включении их в одно- или двухфазную сеть электропитания по сравнению с включением в трехфазную сеть.

Задачу определения параметров в частных случаях решали многие исследователи. Нами предлагается единый методологический подход, который позволяет обобщить известные и получить новые результаты.

Поскольку исследуемое подключение асинхронного электродвигателя к сети является несимметричным, за основу решения поставленной задачи выбран наиболее эффективный, на наш взгляд, метод проф. И. П. Трещева учета условий несимметрии с помощью обобщенных пространственных векторов на основе математической модели асинхронного электродвигателя, записанной в системе координат α – β.

Однофазное включение трехфазного короткозамкнутого асинхронного электродвигателя. Анализ возможных схем подключения статорных обмоток трехфазных асинхронных электродвигателей (АД), обеспечивающих наибольшее значение обобщенного пространственного вектора магнитно-движущей силы (МДС) при номинальном значении тока в фазной обмотке, позволил выявить наиболее перспективные из них. Эти схемы представлены на рис. 1, где u_{as}, u_{bs}, u_{cs} – падения напряжений на фазных статорных обмотках; i_{as}, i_{bs}, i_{cs} – фазные статорные токи; u_1, u_2 – гармонические напряжения симметричной сети электропитания; *A*, *B*, *C* и *x*, *y*, *z* – начала и концы фазных обмоток статора.

Для удобства использования метода Трещева [4] обозначения и направления фазных напряжений и токов сохраняются такими, какими они были бы при подключении АД к трехфазной сети.

Согласно [5] векторные уравнения симметричного трехфазного АД при подключении к симметричной трехфазной электросети, записанные в системе координат α – β, имеют вид:

$$\begin{cases} \underline{U}_s = \underline{I}_s R_s + \dfrac{d\underline{\psi}_s}{dt}; \\ 0 = \underline{I}_r R_r + \dfrac{d\underline{\psi}_r}{dt}; \\ u_0 = i_0 R_0 + L_0 \dfrac{di_0}{dt}; \\ M_{эм} = \dfrac{3}{2} \mathrm{Im}\left[\underline{I}_s \overset{*}{\underline{\psi}}_s \right], \end{cases} \qquad (1)$$

где $\underline{U}_s$, $\underline{I}_s$, $\underline{I}_r$, $\underline{\psi}_s$, $\underline{\psi}_r$ – пространственные векторы статорного *s* и роторного *r* напряжений, токов и потокосцеплений; R_s, R_r – активные сопротивления статорных и роторных фазных обмоток для прямой последовательности токов; L_0, R_0 – индуктивность и активное сопротивление статорных фазных обмоток для тока нулевой последовательности i_0; $M_{эм}$ – электромагнитный момент АД; u_0 – падение напряжения в статорных фазных обмотках от тока нулевой последовательности i_0.

В случае последовательного соединения фазных статорных обмоток (рис. 1а) условия несимметрии в мгновенных значениях фазных токов и напряжений имеют следующий вид:

$$\begin{cases} i_{as} = -i_{bs} = -i_{cs}; \\ u_{as} - u_{bs} - u_{cs} = u_1. \end{cases}$$

В координатных осях α, β эти условия запишутся:

$$\begin{cases} i_{бs} + i_0 = 0{,}5\sqrt{3} i_{\beta s} - i_0 + 0{,}5 i_{\alpha s} = 0{,}5 i_{\alpha s} - 0{,}5\sqrt{3} i_{\beta s} - i_0; \\ (u_{\alpha s} + u_0) + \left(0{,}5 u_{\alpha s} + 0{,}5\sqrt{3} u_{\beta s} - u_0\right) + \left(0{,}5 u_{\alpha s} - 0{,}5\sqrt{3} u_{\beta s} - u_0\right) = u_1. \end{cases}$$

После преобразования получим:

$$\begin{cases} i_{\alpha s} = -4 i_0; \\ u_{\alpha s} = 0{,}5(u_1 + u_o); \\ i_{\beta s} = 0. \end{cases}$$

В форме изображающих векторов условия несимметрии примут вид:

$$\begin{cases} \underline{I}_s = -4 i_0; \\ \underline{U}_s + \overset{*}{\underline{U}}_s = u_1 + u_0. \end{cases} \qquad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим:

$$\begin{cases} (u_1 + u_0) = \left(\underline{I}_s + \overset{*}{\underline{I}}_s \right) R_s + \dfrac{d\left(\underline{\psi}_s + \overset{*}{\underline{\psi}}_s \right)}{dt}; \\ 0 = \underline{I}_r R_r + \dfrac{d\underline{\psi}_r}{dt}; \\ u_0 = -\dfrac{1}{4} R_0 \underline{I}_s - \dfrac{1}{4} L_0 \dfrac{d\underline{I}_s}{dt}; \\ M_{эм} = \dfrac{3}{2} \mathrm{Im}\left[\underline{I}_s \overset{*}{\underline{\psi}}_s \right]. \end{cases}$$

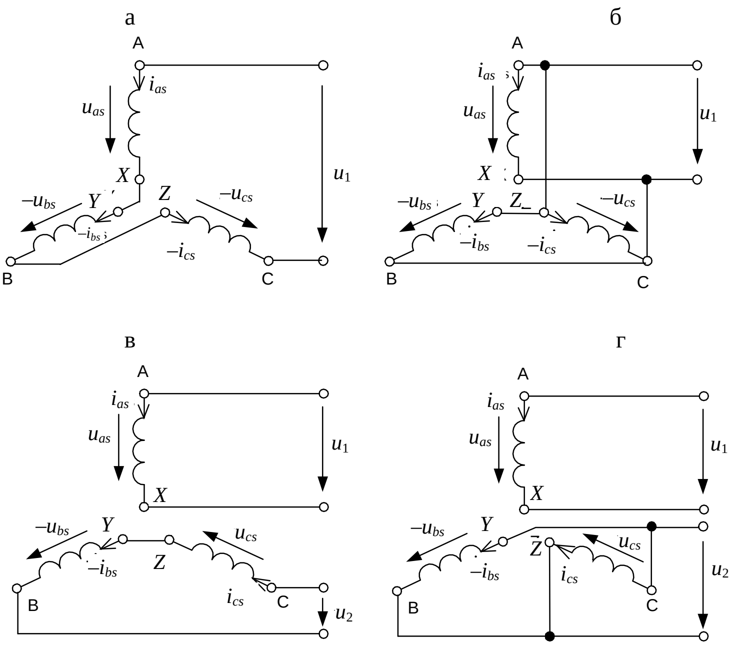

Рис. 1. Схема подключения трехфазных АД к однофазной (а, б) и двухфазной (в, г) электросетям

Исключив из системы уравнений неизвестную u_0, далее преобразуем:

$$
\begin{aligned}
& u_1 = \underline{I}_s\left(2R_s + \frac{1}{4}R_0\right) + \frac{1}{4}L_0\frac{d\underline{I}_s}{dt} + 2\frac{d\left(\underline{\psi}_s + \overset{*}{\underline{\psi}}_s\right)}{dt}; \\
& 0 = \underline{I}_r R_r + \frac{d\underline{\psi}_r}{dt}; \\
& M_{\text{эм}} = \frac{3}{2}\operatorname{Im}\left[\underline{I}_s \overset{*}{\underline{\psi}}_s\right].
\end{aligned}
\qquad (3)
$$

Связь пространственных векторов потокосцеплений и токов описывается уравнениями:

$$
\begin{aligned}
\underline{\psi}_s &= \underline{I}_s L_s + \underline{I}_r M e^{j\xi}; \\
\underline{\psi}_r &= \underline{I}_r L_r + \underline{I}_s M e^{-j\xi},
\end{aligned}
$$

где $L_s = M + L_{s\zeta}$; $L_r = M + L_{r\zeta}$ – полные индуктивности фазных обмоток статора и ротора соответственно; M, $L_{s\zeta}$, $L_{r\zeta}$ – взаимная индуктивность и индуктивности рассеяния обмоток соответственно.

Учитывая эту связь и приводя роторные переменные величины к координатным осям $\alpha – \beta$ через множитель $e^{j\xi}$, где ξ – угол поворота ротора относительно статора, запишем систему уравнений (3) в проекциях пространственных векторов следующим образом:

$$\begin{cases} \left(2R_s + \frac{1}{4}R_0\right)i_{\alpha s} + \left(2L_s + \frac{1}{4}L_0\right)\frac{di_{\alpha s}}{dt} + 2M\frac{di_{\alpha r}}{dt} = u_1; \\ R_r i_{\alpha r} + L_r\frac{di_{\alpha r}}{dt} + M\frac{di_{\alpha s}}{dt} + \omega L_r i_{\beta r} = 0; \\ R_r i_{\beta r} + L_r\frac{di_{\beta r}}{dt} - \omega L_r i_{\alpha r} - \omega M i_{\alpha s} = 0; \\ M_{эм} = -\frac{3}{2}M i_{\alpha s} i_{\beta r}, \end{cases} \tag{4}$$

где ω – угловая скорость вращения ротора.

Полученный результат показывает, что для рассмотренной схемы однофазного включения трехфазного АД общее активное сопротивление последовательно соединенных фазных статорных обмоток равно $2R_s + \frac{1}{4}R_0 \approx 2{,}25R_s$, а общая полная индуктивность – $2L_s + \frac{1}{4}L_0 \approx 2M + 2{,}25L_{s\zeta}$, так как согласно [6] величины $R_0 \approx R_s$; $L_0 \approx L_{s\zeta}$.

Параметры роторных обмоток не изменяются.

Анализируя аналогичным образом схему параллельного соединения статорных обмоток (рис. 1б), можно получить математическую модель, подобную (4), но с коэффициентами в левой части первого уравнения в 3 раза меньшими.

Двухфазное включение трехфазного короткозамкнутого асинхронного электродвигателя. Для схемы с последовательным соединением двух статорных фазных обмоток (рис. 1в) условия несимметрии имеют вид:

$$\begin{cases} i_{cs} = -i_{bs}; \\ u_{\alpha s} = u_1; \\ u_{cs} - u_{bs} = u_2. \end{cases}$$

Проделывая преобразования, аналогичные предыдущим, запишем систему уравнений АД в следующем виде:

$$\begin{cases} (R_s + 0{,}5R_0)i_{\alpha s} + (L_s + 0{,}5L_0)\frac{di_{\alpha s}}{dt} + M\frac{di_{\alpha r}}{dt} = u_1; \\ \sqrt{3}R_s i_{\beta r} + \sqrt{3}L_s\frac{di_{\beta r}}{dt} + \sqrt{3}M\frac{di_{\beta s}}{dt} = u_2; \\ R_r i_{\alpha r} + L_r\frac{di_{\alpha r}}{dt} + M\frac{di_{\alpha s}}{dt} + \omega L_r i_{\beta r} + \omega M i_{\beta s} = 0; \\ R_r i_{\beta r} + L_r\frac{di_{\beta r}}{dt} + M\frac{di_{\beta s}}{dt} - \omega L_r i_{\alpha r} - \omega M i_{\alpha s} = 0; \\ M_{эм} = \frac{3}{2}M\left(i_{\beta s}i_{\alpha r} - i_{\alpha s}i_{\beta r}\right) \end{cases} \tag{5}$$

Полученный результат показывает, что для рассмотренной схемы двухфазного включения трехфазного АД активное сопротивление одиночной фазной обмотки статора равно $R_s + 0{,}5R_0 \approx 1{,}5R_s$, полная индуктивность $L_s + 0{,}5L_0 \approx M + 1{,}5L_{s\zeta}$, взаимная индуктивность M, а для двух последовательно соединенных фазных обмоток все величины R_s, L_s и M возрастают в $\sqrt{3}$ раз. Параметры роторных обмоток не меняются.

Анализируя аналогичным образом схему с параллельным соединением двух статорных фазных обмоток (рис. 1г), можно получить математическую модель, подобную (5), но с коэффициентами в левой части второго уравнения в 2 раза меньшими.

ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ показал, что в математических моделях (4), (5) трехфазных АД, включенных в одно- или двухфазную сеть по схемам, (рис. 1), параметры роторных фазных обмоток по осям α – β ($R_{\alpha r}$, $R_{\beta r}$, $L_{\alpha r}$, $L_{\beta r}$, $M_{\alpha r}$, $M_{\beta r}$) совпадают с параметрами реальных обмоток трехфазного АД. В то же время параметры фазных обмоток статора по осям α – β изменяются в соответствии с табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Однофазное включение		Двухфазное включение	
	Рис. 1а	Рис. 1б	Рис. 1в	Рис. 1г
$R_{\alpha s}$	$2R_s + \frac{1}{4}R_0$	$\frac{2}{3}R_s + \frac{1}{12}R_0$	$R_s + \frac{1}{2}R_0$	$R_s + \frac{1}{2}R_0$
$R_{\beta s}$	0	0	$\sqrt{3}R_s$	$\frac{\sqrt{3}}{2}R_s$
$L_{\alpha s}$	$2L_s + \frac{1}{4}L_0$	$\frac{2}{3}L_s + \frac{1}{12}L_0$	$L_s + \frac{1}{2}L_0$	$L_s + \frac{1}{2}L_0$
$L_{\beta s}$	0	0	$\sqrt{3}L_s$	$\frac{\sqrt{3}}{2}L_s$
$M_{\alpha s}$	$2M$	$\frac{2}{3}M$	M	M
$M_{\beta s}$	0	0	$\sqrt{3}M$	$\frac{\sqrt{3}}{2}M$

2. Достоверность полученных результатов подтверждается совпадением их с полученными в частных случаях в работах [1, 3, 6] методом симметричных составляющих и подтвержденными экспериментально.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернопятов Н. И. Трехфазные двигатели в однофазной сети // Техника в сельском хозяйстве. – 1972. – № 6. – С. 43–45.
2. Грачев С. А., Луковников В. И. Безредукторный электромашинный привод периодического движения. – Мн.: Вышэйш. шк., 1991. – 160 с.
3. Иванова Г. И. О параметрах и величинах в несимметричных системах асинхронных двигателей // Электротехника. – 1972. – № 8. – С. 58–61.
4. Трещев И. И. Электромеханические процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия, 1980. – 344 с.
5. Луковников В. И., Веппер Л. В. Исследование автоколебательного движения однофазного асинхронного электродвигателя с линейной пружиной на валу // Вестник ГГТУ имени П. О. Сухого. – 2001. – № 2. – С. 33–42.
6. Левин М. С., Куц П. В. О сопротивлении нулевой последовательности асинхронного электродвигателя // Электричество. – 1953. – № 2.

Представлена кафедрой
автоматизированного электропривода

Поступила 20.10.2004