

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ПАРАМЕТРЫ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ В ОДНОФАЗНУЮ ИЛИ ДВУХФАЗНУЮ СЕТЬ

В.И. ЛУКОВНИКОВ, Ю.А. РУДЧЕНКО, В.А. САВЕЛЬЕВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение. Нетрадиционное включение трехфазных короткозамкнутых асинхронных электродвигателей в однофазную или двухфазную электрическую сеть переменного тока нередко позволяет построить высокоэффективные, ресурсосберегающие электроприводы вращательного и колебательного движения 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.

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

В связи с тем, что структура электропривода в данной статье определена, то далее ставится задача выявления изменений математических моделей и электрических параметров симметричных трехфазных короткозамкнутых асинхронных электродвигателей при включении их в однофазную или двухфазную сеть электропитания по сравнению с включением в трехфазную сеть.

Задача определения параметров в частных случаях решалась рядом исследователей. Нами предлагается единый методологический подход, который позволяет обобщить известные и получить новые результаты.

Метод решения. Поскольку исследуемое подключение асинхронного электродвигателя к сети является несимметричным, то за основу решения поставленной задачи выбран наиболее эффективный, на наш взгляд, метод профессора Трещева И.П. учета условий несимметрии с помощью обобщенных пространственных векторов на основе математической модели асинхронного электродвигателя, записанной в системе координат $\alpha - \beta$.

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 для применения в рассматриваемых типах электроприводов. Эти схемы представлены на рис. 1, где обозначено: u_{as}, u_{es}, u_{cs} – падения напряжений на фазных статорных обмотках; i_{as}, i_{es}, i_{cs} – фазные статорные токи; u_1, u_2 – гармонические напряжения симметричной сети электропитания; А, В, С и x, y, z – начала и концы фазных обмоток статора.

С целью удобства использования метода Трещева [5], обозначения и направления фазных напряжений и токов сохраняются такими, какими они были бы при подключении АД к трехфазной сети.

Согласно [4] векторные уравнения симметричного трехфазного АД при подключении к симметричной трехфазной электросети, записанные в системе координат $\alpha - \beta$, имеют вид:

$$\begin{cases} \underline{U}_s = \underline{I}_s R_s + \frac{d\underline{\psi}_s}{dt}, \\ 0 = \underline{I}_r R_r + \frac{d\underline{\psi}_r}{dt}, \\ u_0 = i_0 R_0 + L_0 \frac{di_0}{dt}, \\ M_{эм} = \frac{3}{2} \text{Im} \left[\underline{I}_s \cdot \underline{\psi}_s^* \right]. \end{cases} \quad (1)$$

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 потокоцеплений; 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 так

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

После преобразований получим

$$\begin{cases} i_{\alpha s} = -4i_0 \\ u_{\alpha s} = 0, 5(u_1 + u_0) \\ i_{\beta s} = 0 \end{cases}$$

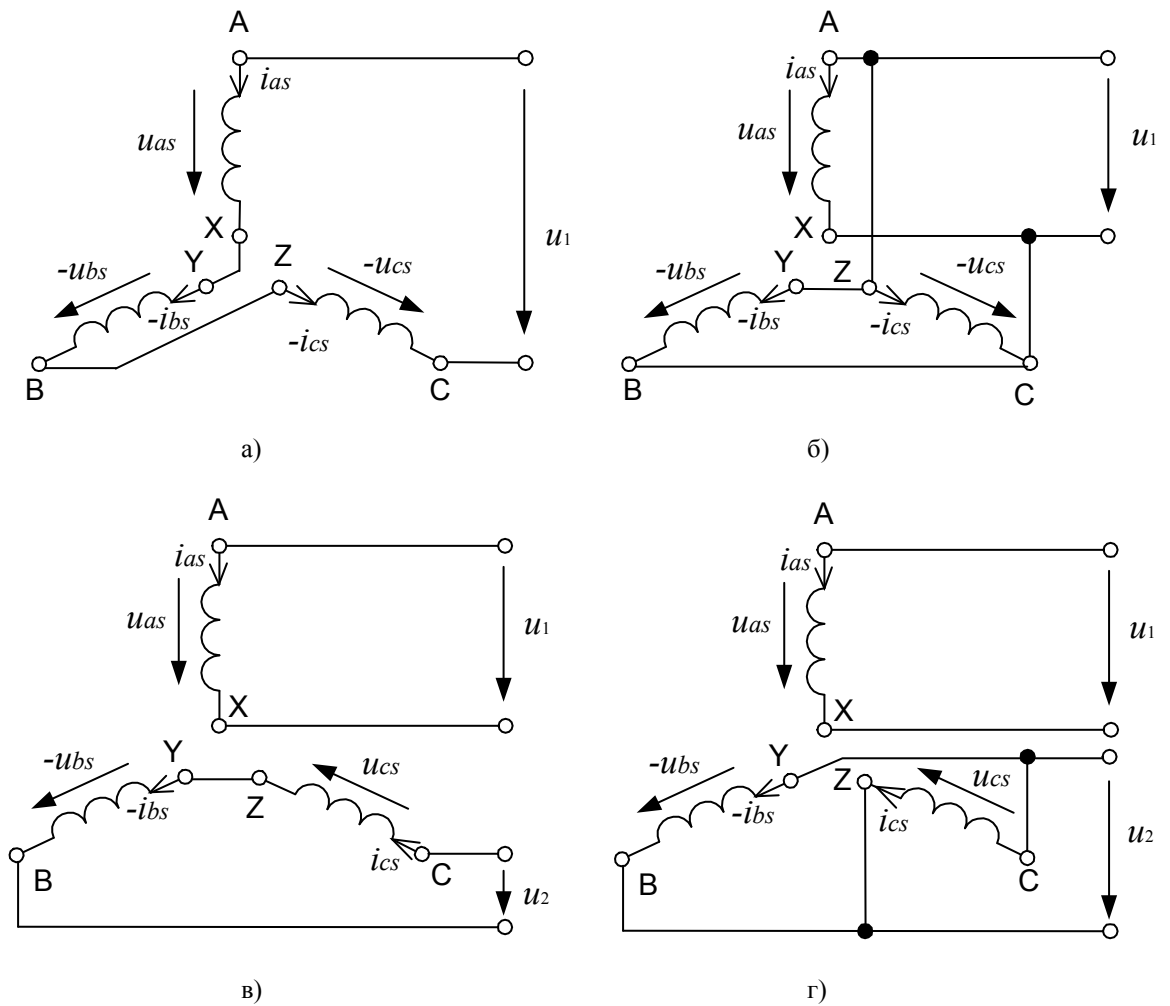


Рис. 1. Схема подключения трехфазных АД к однофазной (а, б) и двухфазной (в, г) электросети

В форме изображающих векторов условия несимметрии примут вид

$$\begin{cases} \underline{I}_s = -4i_0, \\ \underline{U}_s + \underline{U}_s^* = u_1 + u_0. \end{cases} \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим

$$\begin{cases} (u_1 + u_0) = \left(\underline{I}_s + \underline{I}_s^* \right) R_s + \frac{d \left(\underline{\psi}_s + \underline{\psi}_s^* \right)}{dt}, \\ 0 = \underline{I}_r R_r + \frac{d \underline{\psi}_r}{dt}, \\ u_0 = -\frac{1}{4} R_0 \underline{I}_s - \frac{1}{4} L_0 \frac{d \underline{I}_s}{dt}, \\ M_{эл} = \frac{3}{2} \text{Im} \left[\underline{I}_s \cdot \underline{\psi}_s^* \right]. \end{cases}$$

Исключив из системы уравнений неизвестную u_0 , преобразуем далее

$$\begin{cases} u_1 = \underline{I}_s \left(2R_s + \frac{1}{4}R_0 \right) + \frac{1}{4}L_0 \frac{d\underline{I}_s}{dt} + 2 \frac{d \left(\underline{\psi}_s + \underline{\psi}_s^* \right)}{dt}, \\ 0 = \underline{I}_r R_r + \frac{d\underline{\psi}_r}{dt}, \\ M_{эм} = \frac{3}{2} \operatorname{Im} \left[\underline{I}_s \cdot \underline{\psi}_s^* \right]. \end{cases} \quad (3)$$

Связь пространственных векторов потокоцеплений 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; M , $L_{s\zeta}$, $L_{r\zeta}$ – взаимная индуктивность и индуктивности рассеяния обмоток.

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:

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

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

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

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

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

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 увеличиваются 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

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

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

Таблица 1

| Параметры | 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 | $\sqrt{3}M$ | $\frac{\sqrt{3}}{2}M$ |

Список литературы

1. Чернопяттов 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. – Минск: Вышэйшая школа, 1991. – 160 с.
3. Иванова Г.И. О параметрах и величинах в несимметричных системах асинхронных двигателей //Электротехника. – 1972. – № 8. – С. 58-61.
4. Луковников В.И., Веппер Л.В. Исследование автоколебательного движения однофазного асинхронного электродвигателя с линейной пружиной на валу //Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2001. – № 2. – С. 33-42.
5. Трещев И.И. Электромеханические процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия, 1980. – 344 с.
6. Левин М.С., Куц П.В. О сопротивлении нулевой последовательности асинхронного электродвигателя //Электричество. – 1953. – № 2.

Получено 13.02.2004 г.