

РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЧАСТОТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ

Галиновский А.М., к.т.н., доцент, Бобер В.А, инженер, Гижицкий Н.В., студент

КПИ им. Игоря Сикорского, кафедра электромеханики

Введение. В настоящее время большое внимание уделяется вопросам определения электромагнитных параметров асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (АД), необходимых для оценки рабочих и пусковых характеристик при частотном регулировании. Большинство публикаций посвящено уточнению электромагнитных параметров АД, находящихся в эксплуатации и после ремонта.

В работе [3] большое количество методов определения электромагнитных параметров АД разделены на группы, выделены особенности их применения, преимущества и недостатки.

В работе [4] отмечается, что нелинейные параметры АД при длительной эксплуатации изменяются вследствие изменения свойств электротехнической стали и других материалов. Поэтому необходим учет нелинейностей АД как на стадии проектирования АД нового поколения (в том числе для регулируемого частотного электропривода), так и на стадии эксплуатации при мониторинге состояния оборудования, а также при испытаниях АД после ремонта.

По результатам идентификации параметров АД подтверждено [4]: нелинейности активных сопротивлений и индуктивностей обмоток статора и ротора при скольжениях меньше критического практически не проявляются. Важным является учет насыщения магнитной системы АД. Ток намагничивания, зависящий от напряжения и от частоты источника питания и определяющий поток в зазоре, существенно влияет на энергетические характеристики АД.

Из вышесказанного следует: в настоящее время актуально совершенствование методик определения нелинейных параметров АД как при эксплуатации, так и при проектировании. Вместе с тем в базовых учебниках [1] и [2] («Электрические машины» и «Проектирование электрических машин») для студентов вузов, обучающихся по специальности электромеханика, расчет характеристик АД проводится по Г-образной схеме замещения в скалярной форме при ряде допущений. Поэтому неточности в определении некоторых расчетных величин могут существенно сказаться на конечных результатах расчетов.

В работе [5] приведена автоматизированная методика расчета параметров и характеристик генераторов ветроэнергетических установок на базе АД промышленного производства. Расчеты проведены по уточненной Т-образной схеме замещения с учетом нелинейности параметров АД. Приведенная методика расчета принципиально может быть применена для расчета механических характеристик АД при изменении напряжения и частоты источника питания.

Цель работы: совершенствование автоматизированной методики расчета механических характеристик АД при частотном регулировании скорости вращения.

Материалы и результаты исследований. T-образная схема замещения АД показана на рис. 1. На рисунке: U_{1c} – напряжение сети; E_{δ} – результирующая ЭДС; $I_1, I_2, I_{\delta}, I_{\delta r}, I_{\delta a}$ – токи статора, ротора и намагничивающего контура; x_1, r_1, x_2, r_2 – сопротивления обмоток статора и ротора; s – скольжение; x_m, r_m – сопротивления намагничивающего контура. Параметры ротора приведены к статору.

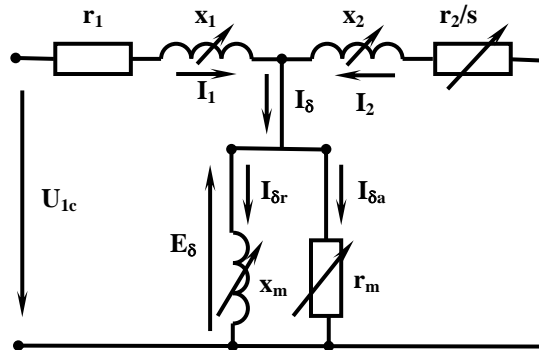


Рисунок 1 – Схема замещения АД

Алгоритм расчета АД при работе в сети рассмотрен в [5]. Вначале задаем массивом скольжения s и начальным значением ЭДС $E_{\delta H}$: $E_{\delta H} \approx 0.9 \cdot U_{1c}$. Точность задания начальной величины $E_{\delta H}$ принципиального значения не имеет.

Для определенной величины s рассчитываем токи \dot{I}_{δ} и \dot{I}_2 .

$$\text{Ток статора} \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_{\delta} - \dot{I}_2.$$

$$\text{Напряжение сети} \quad \dot{U}_{1c} = -E_{\delta H} e^{j0} + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_1.$$

$$\text{Уточненное значение ЭДС} \quad E_{\delta} = E_{\delta H} / |U_{1c} / U_1|.$$

$$\text{Погрешность расчета} \quad \varepsilon u = |1 - U_{1c} / U_1|.$$

Если погрешность εu больше заданной величины εz , повторяем расчет с уточненным значением E_{δ} . Далее расчет проводится по методикам [2, 5].

Уравнения электромагнитного момента асинхронной машины.

Ток вторичной обмотки асинхронной машины (АМ)

$$I_2 = \frac{E_{\delta}}{\sqrt{x_2^2 + (r_2/s)^2}} = \frac{k_E \cdot U_{1c}}{\sqrt{x_2^2 + (r_2/s)^2}}, \quad (1)$$

где $k_E = E_{\delta} / U_{1c}$.

Электромагнитная мощность

$$P_{\text{ЭМ}} = m_1 \cdot I_2^2 \cdot r_2 / s = m_1 \cdot \frac{k_E^2 \cdot U_{1c}^2 \cdot r_2 / s}{x_2^2 + (r_2/s)^2}. \quad (2)$$

Электромагнитный момент

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{p}{\omega_1} \cdot P_{\text{ЭМ}} = \frac{m_1 \cdot p}{\omega_1} \cdot \frac{k_E^2 \cdot U_{1c}^2 \cdot r_2 / s}{x_2^2 + (r_2/s)^2} = \frac{m_1 \cdot p}{\omega_1} \cdot \frac{k_E^2 \cdot U_{1c}^2 \cdot r_2 \cdot y}{x_2^2 + r_2^2 \cdot y^2}, \quad (3)$$

где $y = 1/s$.

При $\frac{dM_{\text{ЭМ}}}{dy} = 0$ $y = \mp \frac{x_2}{r_2}$. Критическое скольжение

$$s_k = \pm \frac{r_2}{x_2}. \quad (4)$$

Максимальный электромагнитный момент

$$M_{\text{ЭМmax}} = \pm \frac{m_1 \cdot p}{\omega_1} \cdot \frac{k_E^2 \cdot U_{1c}^2}{2x_2}. \quad (5)$$

В уравнениях (4) и (5) знак «+» ставится для АМ в режиме двигателя, знак «-» – в режиме генератора.

$M_{\text{ЭМmax}}$ в генераторном режиме больше, чем в двигательном режиме.

Для иллюстрации сказанного приводим результаты исследований АМ типа 4А112МА8У3 ($P_{2N} = 2.2$ кВт, $U_{1N} = U_{1c} = 220$ В = 1 о.е., $I_{1N} = 5.86$ А = 1 о.е.).

На рис. 2 показаны диаграммы напряжений и токов АМ при изменении тока статора от $I_{1ND} = 1$ о.е. в режиме двигателя до $I_{1NG} = 1$ о.е. в режиме генератора. На рисунке: $E_{\delta ND}$, $E_{\delta NG}$ – вектора результирующих ЭДС при токах I_{1ND} и I_{1NG} ; I_{XX} , $E_{\delta XX}$ – ток и ЭДС идеального холостого хода; I_1 – линия тока статора; E_{δ} – линия ЭДС.

Как следует из результатов исследований, в диапазоне скольжения $-s_k < s < +s_k$ всегда $|E_{\delta G}| > |E_{\delta D}|$, $|k_{EG}| > |k_{ED}|$.

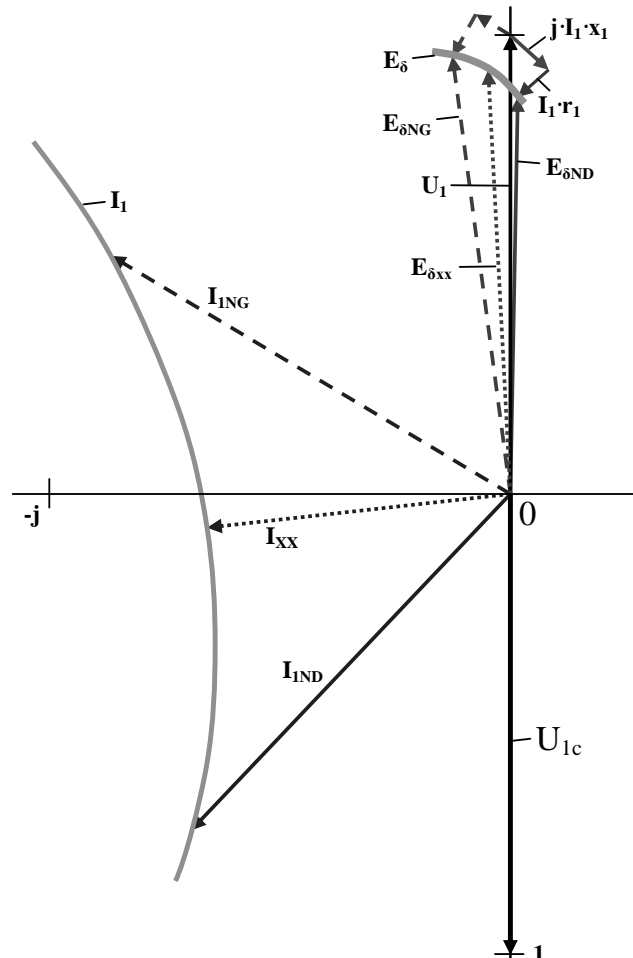


Рисунок 2 – Диаграммы напряжений и токов АМ 4А112МА8У3

Определение индуктивного сопротивления намагничивающей цепи при изменении частоты и величины результирующей ЭДС. На рис. 3 показаны характеристики $x_m = f(E_\delta)$ при разных частотах сети для АД типа 4А225М8У3 ($P_N = 30$ кВт). Характеристики рассчитаны отдельно для каждой частоты при изменении величины ЭДС (1-й метод расчета).

Проведем прямую OL через начало координат. Пересечения линии OL с кривыми $x_m = f(E_\delta)$ определяют характерные точки – точки с одинаковыми значениями намагничивающего тока ($I_{\delta r} = E_\delta / x_m$), а, следовательно, точки с одинаковым результирующим потоком Φ асинхронной машины.

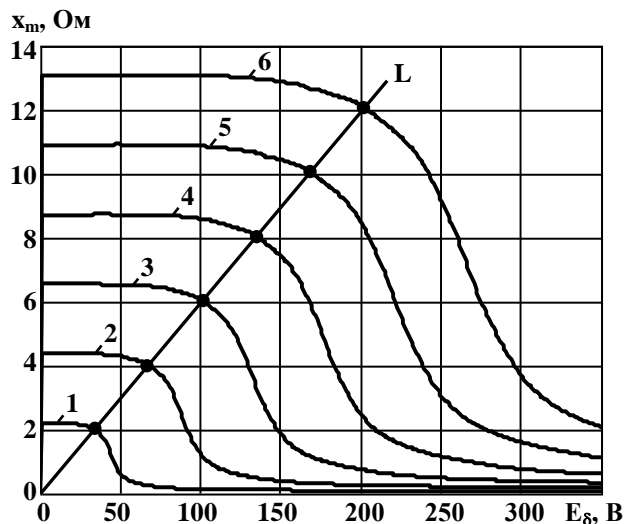


Рисунок 3 – Характеристики $x_m = f(E_\delta)$ при частотах: 1 – 10 Гц; 2 – 20 Гц; 3 – 30 Гц; 4 – 40 Гц; 5 – 50 Гц; 6 – 60 Гц;

2-й метод расчета характеристик. В программе Mathcad вначале рассчитываем характеристику $x'_m = f(E'_\delta)$ при частоте сети $f = 50$ Гц. Для построения характеристик при других частотах источника питания f_i используем функцию линейной интерполяции:

$$x_{mfi} = \text{lint exp} \left(\frac{E'_\delta \cdot f_i}{50}, \frac{x'_m \cdot f_i}{50}, E_\delta \right) \quad (6)$$

Характеристики $x_m = f(E_\delta)$, рассчитанные двумя методами, совпадают. Функция линейной интерполяции (6) применима при построении частотных характеристик АД с разными законами регулирования.

Напряжения источника питания при частотном регулировании скорости вращения АД с постоянным моментом на валу. При $M_{эм} = M_{эмN} = \text{const}$ целесообразно поддерживать $\Phi = \text{const}$ [1], а, следовательно, и $E_\delta / f_i = \text{const}$. Однако, в работе [1] принято $U_1 = E_\delta = 4.44 f w_1 k_{обл} \Phi$, что при низких частотах может привести к существенным ошибкам.

Применим функцию линейной интерполяции (6) при определении напряжения источника питания АД с указанным выше законом регулирования.

На рис. 4 показаны зависимости $U_1, E_\delta, I_1, I_{\delta r}, I_{2a}, (o.e.), s, 1/k_E$ от частоты f при разных способах определения сопротивления намагничивающего контура:

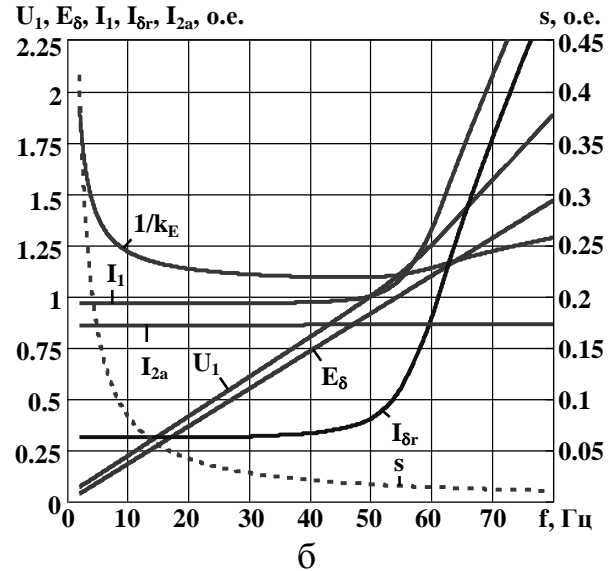
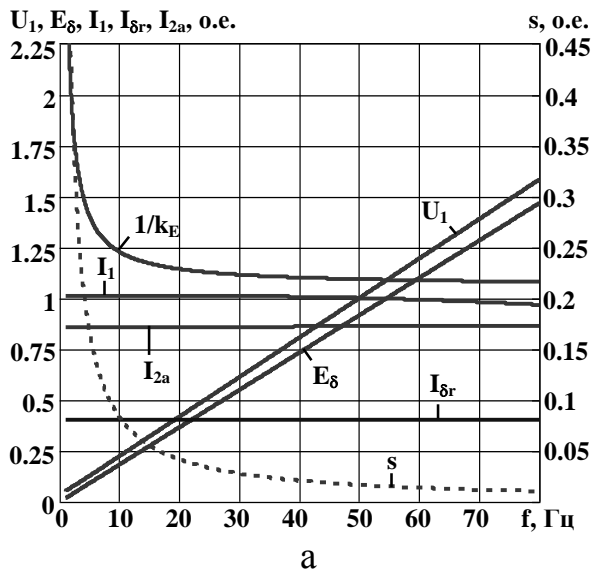


Рисунок 4 – Расчетные величины АД типа 4А225М8У3 в зависимости от частоты источника питания при $\Phi = \Phi_N = \text{const}$ и $M_{эм} = M_{эмN} = \text{const}$

$$a - x_{mfi} = \text{linc} \operatorname{erp} \left(\frac{E'_\delta \cdot f_i}{50}, \frac{x'_m \cdot f_i}{50}, E_\delta \right); \quad б - x_{mfi} = \text{linc} \operatorname{erp}(E'_\delta, x'_m, E_\delta) \cdot f / 50.$$

Из результатов исследований следует: величина $\Phi = \Phi_N = \text{const}$ ($I_{\delta r} = \text{const}$) при $M_{эм} = M_{эмN} = \text{const}$ сохраняется только при определении индуктивного сопротивления x_m по функции линейной интерполяции (6).

Выводы:

1. Предложено уравнение электромагнитного момента асинхронной машины, отличающегося высокой точностью и простотой.
2. Установлена функция линейной интерполяции, позволяющая определять индуктивное сопротивление намагничивающего контура x_m при расчете характеристик асинхронных машин с изменяющимися величинами результирующей ЭДС и частоты (в том числе частотных характеристик АД).
3. Показано определение зависимости $U_{1i} = F(f_i)$, необходимой для поддержания закона частотного регулирования $E_\delta/f_i = \text{const}$ при $M_{эм} = M_{эмN} = \text{const}$.

Перечень ссылок

1. Вольдек А.И. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов / А.И. Вольдек, В.В. Попов – СПб.: Питер, 2008. – 350 с.
2. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перер. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2011. – 767 с.
3. Родькин Д.И. Классификация методов оценивания параметров асинхронных двигателей / Д.И. Родькин, Ю.В. Ромашихин, Н.А. Руденко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2015. – № 4. – С. 25-32.
4. Родькин Д.И., Оценка нелинейных параметров асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором / Д.И. Родькин, Ю.В. Ромашихин, Н.А. Руденко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2016. – № 4. – С. 54-65.
5. Галиновский А.М. Параметры и характеристики генераторов ветроэнергетических установок малой мощности на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором / А.М. Галиновский // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – НТУ «ХПІ», 2018, – № 32. – С. 45-50.