

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА СТАТОРА ТЯГОВОГО
АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ТРАКТОРА
CALCULATION OF THE STATOR CURRENT OF A TRACTOR
PROPULSION INDUCTION MOTOR**

Ч.И. Жданович¹, канд. техн. наук, доц., **Н.В. Калинин²**,

¹Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь,

²Объединённый институт машиностроения НАН Беларуси
СН. Zhdanovich¹, Ph.D. in Engineering, Associate professor, N. Kalinin,

¹ Belarusian national technical University, Minsk, Belarus,

² United Institute of mechanical engineering of NAS of Belarus

В статье выведены зависимости для определения тока статора тягового асинхронного электродвигателя трактора с электромеханической трансмиссией для заданных значений частоты, напряжения, скольжения, параметров схемы замещения и при известном значении номинального намагничивающего тока.

The article shows the dependences for determining the stator current of a traction induction electric motor of a tractor equipped with an electromechanical power train for given values of frequency, voltage, slip, equivalent circuit parameters and at a known value of the nominal magnetizing current.

Ключевые слова: ток статора, ток ротора, ток намагничивания.

Key words: stator current, rotor current, magnetizing current.

ВВЕДЕНИЕ

Для определения теоретической скорости движения трактора по [1] и момента ТАД (тягового асинхронного электродвигателя) по [2, 3], нужного для расчёта значения момента на колёсах трактора по [1], не было необходимости рассчитывать токи ТАД. Однако для определения потребляемой ТАД мощности, электрических потерь в статоре и роторе согласно [2] и допустимого скольжения исходя из ограничения по передаваемой ТАД мощности согласно [4] ток статора должен быть рассчитан. В [2, 4, 5] для этого были использованы формулы, полученные путём преобразования зависимостей [6, 7].

Как именно были получены нужные формулы для расчёта тока статора ТАД — покажем в данной статье.

ВЫВОД ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ РАСЧЁТА ТОКА СТАТОРА

Формула [6, с. 161, (12.25)] для расчёта приведённого тока ротора не учитывает то, что индуктивные сопротивления рассеяния пропорциональны частоте (т.е. не подходит для регулирования с отклонением частоты f_1 от номинального значения $f_{1,н}$). В формуле [7, с. 62, (3,9)] для расчёта приведённого тока ротора это учтено (индуктивные сопротивления умножены на k_f согласно [7, с. 30]), а также не принимается $c_1 \approx 1$ (коэффициент c_1 можно найти по [3]) в отличие от [6, с. 161, (12.25)], но расчёт ведётся для номинального скольжения s_n . Подставив в [7, с. 62, (3,9)] вместо s_n скольжение s аналогично [6, с. 161, (12.25)] (или изменив [6, с. 161, (12.25)] с учётом $c_1 \neq 1$ и k_f по [7, с. 30]) и представив напряжение U_1 как $U_{1,н} \cdot k_U$, получим формулу определения приведённого тока ротора:

$$I'_2 = U_{1,н} \cdot k_U / \sqrt{(r_1 + (c_1 \cdot r'_2) / s)^2 + k_f^2 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x'_2)^2}, \quad (1)$$

где r_1 — сопротивление фазы статора в номинальном режиме; r'_2 — приведённое активное сопротивление ротора; x_1, x'_2 — индуктивное сопротивление фазы статора и приведённое индуктивное сопротивление ротора при номинальной частоте питающего напряжения $f_{1,н}$.

Коэффициент k_U равен отношению напряжения U_1 к номинальному напряжению $U_{1,н}$, а коэффициент k_f — отношению частоты f_1 напряжения к её номинальному значению $f_{1,н}$ [3].

Полный ток статора I_1 [7, с. 64, (3.19a)]:

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2} = \sqrt{(I_0 \cdot \cos \varphi_0 + I'_2 \cdot \cos \varphi')^2 + (I_0 \cdot \sin \varphi_0 + I'_2 \cdot \sin \varphi')^2},$$

где I_{1a} и I_{1p} — его активная и реактивная составляющие.

А по [7, с. 64, (3.19б)], где учтено, что $\sin \varphi_0 \approx 1$ [7, с. 64]:

$$I_1 = \sqrt{(I'_2 \cdot \cos \varphi')^2 + (I_0 + I'_2 \cdot \sin \varphi')^2} \quad (2)$$

Т.е. выражение $I_0 \cdot \cos \varphi_0 + I'_2 \cdot \cos \varphi'$ превратилось в $I'_2 \cdot \cos \varphi'$, а выражение $I_0 \cdot \sin \varphi_0 + I'_2 \cdot \sin \varphi'$ — в $I_0 + I'_2 \cdot \sin \varphi'$ (φ' — фаза ротора). Значит, формулы [7, с. 64, (3.18)] для I_{1a} и I_{1p} примут вид:

$$I_{1a} = I'_2 \cdot \cos \varphi' \quad (3)$$

$$I_{1p} = I_0 + I'_2 \cdot \sin \varphi' \quad (4)$$

Определим $\sin \varphi'$ и $\cos \varphi'$ путём преобразований имеющейся формулы [7, с.10 (1.17)] расчёта $\operatorname{tg} \varphi'$. Чтобы формула [7, с.10, (1.17)] стала пригодной для определения $\operatorname{tg} \varphi'$ при отклонении от частоты f_1 от $f_{1,н}$, заменим в ней $x_1 + c_1 x_2'$ на $k_f \cdot (x_1 + c_1 x_2')$ согласно [7, с. 30]:

$$\operatorname{tg} \varphi' = k_f (x_1 + c_1 \cdot x_2') / (r_1 + (c_1 \cdot r_2') / s), \quad (5)$$

Использував тригонометрическое соотношение $\operatorname{tg}^2 \alpha + 1 = 1 / \cos^2 \alpha$, преобразованное к виду $\cos^2 \alpha = 1 / (\operatorname{tg}^2 \alpha + 1)$, найдём из (5) $\cos \varphi'$:

$$\cos \varphi' = (r_1 + (c_1 \cdot r_2') / s) / \sqrt{k_f^2 (x_1 + c_1 \cdot x_2')^2 + (r_1 + (c_1 \cdot r_2') / s)^2} \quad (6)$$

Используя соотношение $\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha = 1$, откуда $\sin^2 \alpha = 1 - \cos^2 \alpha$, найдём $\sin^2 \varphi'$ и затем $\sin \varphi'$ из формулы (6):

$$\sin \varphi' = k_f (x_1 + c_1 \cdot x_2') / \sqrt{k_f^2 (x_1 + c_1 \cdot x_2')^2 + (r_1 + (c_1 \cdot r_2') / s)^2} \quad (7)$$

Подставим (6) и (1) в (3), а (7) и (1) — в (4), получим (8) и (9):

$$I_{1a} = \frac{U_{1н} \cdot k_U \cdot (r_1 + (c_1 \cdot r_2') / s)}{(r_1 + (c_1 \cdot r_2') / s)^2 + k_f^2 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x_2')^2}, \quad (8)$$

$$I_{1p} = I_0 + \frac{U_{1н} \cdot k_U \cdot k_f \cdot (x_1 + c_1 \cdot x_2')}{(r_1 + (c_1 \cdot r_2') / s)^2 + k_f^2 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x_2')^2}, \quad (9)$$

Полный ток тогда можно найти по формуле [7, с. 64, (3.19а)]:

$$I_{1a} = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2} \quad (10)$$

Для определения тока I_0 используем кривую намагничивания [7, с. 62] (рисунок 1 [7, с. 62, рисунок 3.1]), на горизонтальной оси кривой намагничивания отложено отношение намагничивающего тока I_0 к номинальному намагничивающему току $I_{0,н}$. Обозначим это отношение как i_0 , т.е. $i_0 = I_0 / I_{0,н}$. Тогда:

$$I_0 = I_{0,н} \cdot i_0 \quad (11)$$

На вертикальной оси отложено отношение магнитного потока Φ к номинальному магнитному потоку Φ_n , которому согласно [7, с. 62] приближённо равно отношение k_U / k_f . Определяем I_0 так: находим отношение k_U / k_f , откладываем его по вертикальной оси графика кривой намагничивания и далее по горизонтальной оси находим значение i_0 , после по формуле (11) рассчитываем I_0 .

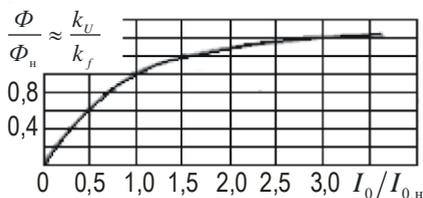


Рисунок 1 — Кривая намагничивания

Для определения значений намагничивающего тока при помощи ЭВМ можно задать кривую намагничивания таблицей $i_0(k_U / k_f)$ и определять промежуточные значения i_0 интерполяцией.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА СТАТОРА

Перед расчётом задаются значения параметров схемы замещения $x_1, x_2', r_1, r_2', x_0$ (x_0 — индуктивное сопротивление магнитной цепи) и номинальный намагничивающий ток $I_{0,н}$, определяется коэффициент c_1 по формуле [7, с.10] или [3].

Далее для каждого расчётного значения напряжения и частоты:

- 1) считаются коэффициенты k_f, k_U по [3] и их отношение k_U / k_f ;

2) определяется $i_0=I_0/I_{0,n}$ по кривой намагничивания (рисунок 1) исходя из отношения k_U/k_f и намагничивающий ток I_0 по (11);

3) рассчитываются значения активного I_{1a} и реактивного I_{1p} тока статора по формулам (8), (9);

4) рассчитывается полный ток статора I_1 по формуле (10).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Путём преобразования зависимостей, приведённых в [6, 7], были получены формулы для расчёта тока статора ТАД для заданных значений частоты, напряжения, скольжения, номинального намагничивающего тока и параметров схемы замещения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жданович Ч.И., Калинин Н.В. Определение максимального момента на колёсах трактора с электромеханической трансмиссией / Ч.И. Жданович, Н.В. Калинин // Проблемы проектирования и развития тракторов, мобильных машин, городского электротранспорта: материалы Международной научно-технической конференции, посвящённой 60-летию кафедры «Тракторы» БНТУ, Минск, 23–24 ноября 2013 / Белорусский национальный технический университет; редкол.: В.П. Бойков, Ч.И. Жданович. — Минск, 2013. — с. 54–59.

2. Жданович Ч.И., Калинин Н.В. Зависимость характеристик трактора с электромеханической трансмиссией от температуры обмоток тягового электродвигателя / Ч.И. Жданович, Н.В. Калинин // Проблемы проектирования и развития тракторов, мобильных машин, городского электротранспорта: материалы Международной научно-технической конференции, посвящённой 60-летию кафедры «Тракторы» БНТУ, Минск, 23–24 ноября 2013 / Белорусский национальный технический университет; редкол.: В.П. Бойков, Ч.И. Жданович. — Минск, 2013. — с. 60–67.

3. Жданович, Ч.И., Калинин Н.В. Выбор способа регулирования тягового асинхронного электродвигателя трактора и построение механической характеристики / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // Наука и техника. 2015. № 3. С. 60–64.

4. Калинин, Н.В. Определение ограничения потребляемой мощности тягового электродвигателя исходя из максимальной мощности

применяемого ДВС / Н.В. Калинин // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 16-й Международной научно-технической конференции. – Минск : БНТУ, 2018. – Т. 2. – С. 9.

5. Жданович, Ч.И., Калинин Н.В. Анализ эффективности использования накопителей энергии на тракторе с электромеханической трансмиссией / Ч.И. Жданович, Н.В. Калинин // Наука и техника. – 2017. – № 1. – С. 73–82.

6. Кацман М.М. Электрические машины: учеб. для студентов средн. проф. учебных заведений – 3 изд., испр. – М.М. Кацман. – Москва, Высшая школа, 2000. – 463с.

7. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников; под ред. Л.Г. Мамиконянца – Москва: Энергоатомиздат, 1984. – 240с.

Представлено 15.05.2020