

УДК 629-97

А. А. РАДКЕВИЧ**С. А. ПАВЛЮКОВЕЦ**, канд. техн. наук, доц.

Белорусский национальный технический университет (Минск, Беларусь)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПОСОБА ПРОВЕРКИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОБУСА ПО НАГРЕВУ МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ТОКА

Аннотация

Разработана имитационная модель расчёта эквивалентного тока статора тягового электропривода электробуса. На основании данной модели проведено исследование эквивалентного тока статора асинхронного двигателя ТАД-155-04-БУ1 при трёх режимах движения электробуса. Исследование показало, что двигатель подходит по нагреву, а модель может быть адаптирована для определения эквивалентных значений мощности и моментов при проверке электроприводов по нагреву.

Ключевые слова:

тяговый электропривод, электробус, метод эквивалентного тока, проверка по нагреву, асинхронный электропривод, имитационная модель.

Введение. В связи с тем, что режим работы тягового электропривода электробуса можно охарактеризовать как повторно-кратковременный с частыми пусками и электрическим торможением (S5), возникают проблемы контроля температуры обмоток электродвигателя для недопущения его перегрева. Проверка электродвигателя по нагреву определяется, в первую очередь, нагревостойкостью изоляционных материалов его обмоток. Сущность проверки двигателя по нагреву состоит в сопоставлении допустимой для него температуры с максимальной рабочей. Электродвигатель работает в допустимом тепловом режиме при соблюдении выражения

$$\tau_{РАБ} < \tau_{ДОП}, \quad (1)$$

где $\tau_{РАБ}$ – максимальный перегрев двигателя при работе, с; $\tau_{ДОП}$ – допустимый перегрев двигателя, определяемый классом его изоляции, с.

Проверка условия (1) может выполняться прямым методом путем составления математической модели теплового режима двигателя на каждом участке нагрузочной диаграммы. Однако для этого необходимо знать параметры теплоемкости, которые в процессе проектирования электропривода зачастую неизвестны.

Среди косвенных способов проверки электродвигателя по нагреву известны метод эквивалентного тока, метод эквивалентного момента, метод эквивалентной мощности, метод тепловых моделей, которые подразумевают расчёт эквивалентных значений величин на основании анализа данных каждого отрезка нагрузочной диаграммы электропривода. В некоторых случаях, в частности при расчёте электропривода электробуса, электродвигатель в

системе электропривода работает в двух зонах регулирования скорости, с изменением магнитного потока в зоне II регулирования. Следовательно, среднеквадратичный (эквивалентный) момент двигателя M_{Σ} , Н · м, не отражает его среднюю температуру нагрева. Проверку двигателя по нагреву в этом случае целесообразно осуществлять методом эквивалентного тока. Однако можно также использовать и метод эквивалентного момента, поскольку он дает запас по мощности.

При этом определение эквивалентного значения тока статора на i -м участке нагрузочной диаграммы в зоне II регулирования скорости (при относительной частоте $\alpha > 1$) при пониженном магнитном потоке и электромагнитном моменте и максимальных значениях напряжения и тока статора [1] определяется корнем квадратным из суммы векторов токов статора по осям d – q , величины которых могут быть для исследуемого электродвигателя не определены. При достижении электробусом максимальной скорости движения, в частности при разгоне под гору, и переходе электропривода в зону III регулирования напряжение статора остается неизменным, а магнитный поток и электромагнитный момент продолжают уменьшаться [2, 3]. Максимальное значение тока статора оказывается излишним для достижения максимального момента, а абсолютное значение скольжения приближается к критическому значению [4].

Исходя из этого, актуальной задачей для исследования является разработка компьютерной модели проверки электропривода электробуса по нагреву методом эквивалентного тока, которая позволила бы получить наиболее точные результаты расчёта эквивалентного тока для всех режимов движения электробуса, не прибегая к вычислениям каждого отрезка нагрузочной диаграммы.

Разработка имитационной модели. Суть метода эквивалентного тока заключена в выполнении неравенства

$$I_{\Sigma KB} \leq I_{НОМ},$$

где $I_{\Sigma KB}$ – изменяющийся во времени эквивалентный по условиям нагрева действительному изменяющемуся во времени току двигателя ток, А; $I_{НОМ}$ – номинальный ток двигателя, А.

Значение эквивалентного тока за цикл работы электродвигателя $I_{\Sigma KB}$ определяется исходя из формулы [5]

$$I_{\Sigma KB} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_{\Sigma II}^2 \cdot t_I}{\sum_{i=1}^n t_{III} \cdot \beta_{OXI}}}, \quad (2)$$

где $I_{\Sigma II}$ – значение эквивалентного тока статора на i -м участке нагрузочной диаграммы, А; t_I – время интервала в цикле, с; t_{III} – время цикла каждого из

участков движения, с; β_{OXI} – коэффициент охлаждения на i -м участке нагрузочной диаграммы; n – число участков в цикле.

Для проверки электродвигателя по нагреву, поскольку применяется двухзонное регулирование скорости, необходимо использовать метод эквивалентного тока. Для этого визуализируем формулу (2) и соберем подсистему определения эквивалентного тока в имитационной модели тягового электропривода электробуса в программном пакете Matlab Simulink. Полученная модель показана на рис. 1.

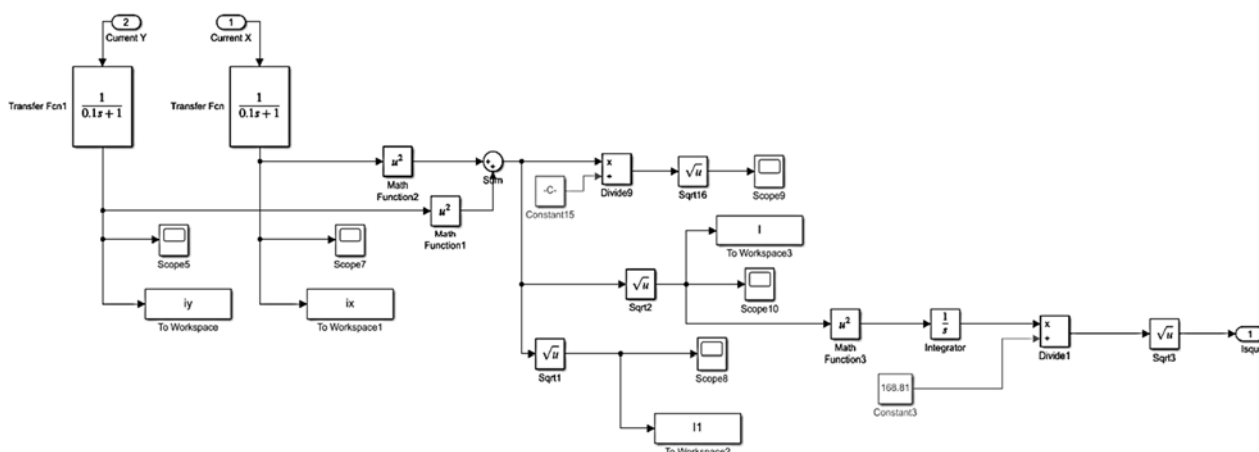


Рис. 1. Имитационная модель определения эквивалентного тока тягового электропривода электробуса в Matlab Simulink

Моделирование проверки электропривода по нагреву. Произведём моделирование способа проверки асинхронного тягового электропривода ТАД-155-04-БУ1 городского электробуса в соответствии с разработанной имитационной моделью, изображённой на рис. 1.

Номинальные параметры электродвигателя ТАД-155-04-БУ1, согласно техническим характеристикам, следующие: номинальная мощность $P_H = 155$ кВт; номинальная частота вращения $n_H = 1500$ об/мин; номинальный линейный ток статора $I_H = 300$ А; изоляция обмоток соответствует классу нагревостойкости Н, допустимая температура нагрева которых составляет до 180 °С.

Моделирование проверки электропривода будет производиться при трех режимах движения электробуса: без уклона (статический момент $M_C = 142,2$ Н · м); в гору с уклоном 18 % ($M_C = 728,064$ Н · м); под гору с уклоном 18 % ($M_C = -484,902$ Н · м). Рассматриваемые режимы включают в себя разгон, в том числе в зоне II регулирования скорости и до максимальной скорости, выбег и торможение. Графики результатов моделирования при трёх режимах движения электробуса, полученные в программном пакете Matlab Simulink, показаны на рис. 2–4.

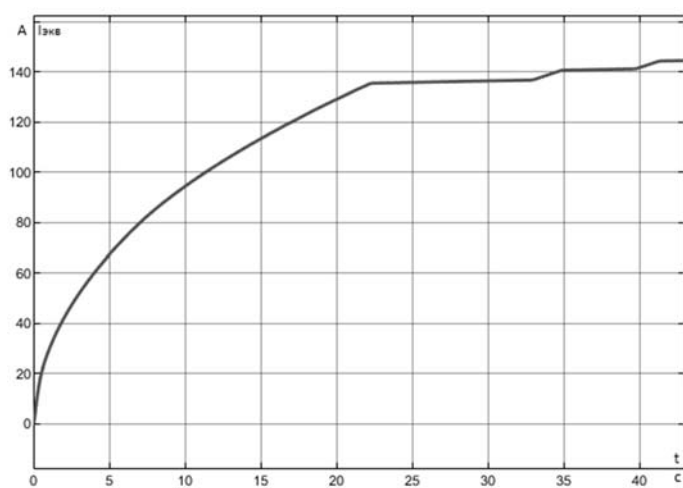


Рис. 2. График эквивалентного тока за цикл работы электропривода в режиме движения без уклона

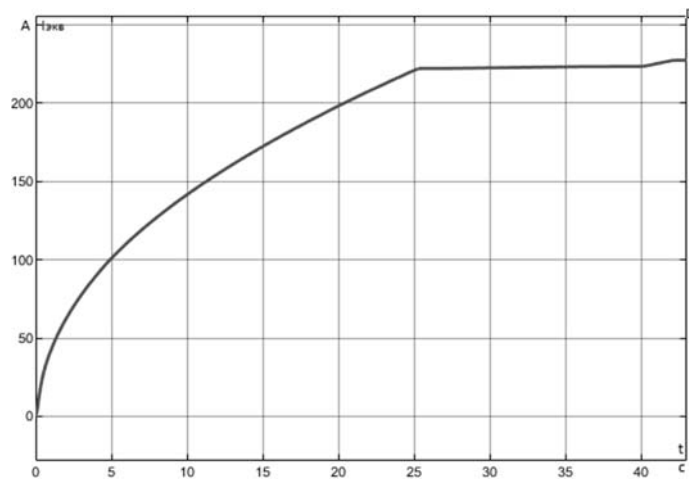


Рис. 3. График эквивалентного тока за цикл работы электропривода в режиме движения в гору с уклоном 18 %

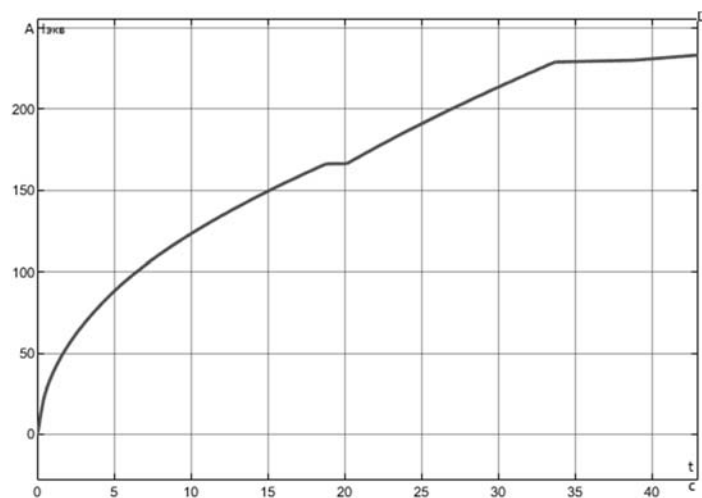


Рис. 4. График эквивалентного тока за цикл работы электропривода в режиме движения под гору с уклоном 18 %

По полученным графикам определим максимальные значения тока за цикл в каждом из режимов движения. В режиме движения без уклона $I_{ЭКВ}$ составляет 145 А, в режиме движения в гору с уклоном 18 % $I_{ЭКВ} = 225$ А, в режиме движения под гору с уклоном 18 % $I_{ЭКВ} = 230$ А. Далее подставим полученные значения в формулу (2):

$$I_{ЭКВ} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 145^2 \cdot 43,207 + 225^2 \cdot 43,207 + 230^2 \cdot 43,396}{129,81}} = 203,7 \text{ А.}$$

Поскольку рассчитанное значение $I_{ЭКВ} = 203,7 \text{ А} < I_H = 300 \text{ А}$, то тяговый асинхронный электродвигатель ТАД-155-04-БУ1 подходит по нагреву для использования в электробусе.

Заключение. Таким образом, в результате исследования разработана компьютерная модель определения эквивалентного тока статора тягового электропривода электробуса, учитывающая данные, полученные при моделировании режимов движения на основании нагрузочных диаграмм электропривода, не прибегая к вычислениям. На примере моделирования асинхронного двигателя ТАД-155-04-БУ1 были определены значения эквивалентных токов статора при трёх режимах движения электробуса и сделан вывод о том, что этот двигатель подходит по нагреву. Данный способ является более точным определением эквивалентного тока, чем непосредственный расчёт каждого участка нагрузочной диаграммы по формуле (2), поскольку для его выполнения нет необходимости рассчитывать значения токов в зоне II регулирования скорости, что зачастую является проблематичным, а разработанная компьютерная модель может быть адаптирована для определения эквивалентных значений мощности и моментов при проверке электроприводов по нагреву.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богдан, Н. В. Троллейбус. Теория, конструирование, расчет / Н. В. Богдан, Ю. Е. Атаманов, А. И. Сафонов; под ред. Н. В. Богдана. – Минск: Ураджай, 1999. – 346 с.
2. Peng, Z. Analysis and Implementation of Constrained MTPA Criterion for Induction Machine Drives / Z. Peng // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 176445–176453.
3. Трехзонная система векторного частотного управления асинхронным электроприводом / Р. Т. Шрейнер [и др.] // VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – С. 433–437.
4. Opeiko, O. F. Reference Input Signals Formation for Induction Motor Control in Traction Drive / O. F. Opeiko // *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* – 2023. – № 66 (3). – P. 205–214.
5. Improved Online Optimization-Based Optimal Tracking Control Method for Induction Motor Drives / Tarvirdilu-Asl R [et al.] // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2020. – № 35. – P. 10654–10672.

Контакты:

artyomradkevichbntu@gmail.com (Радкевич Артём Андреевич);
s.pauliukavets@gmail.com (Павлюковец Сергей Анатольевич).

A. A. RADKEVICH, S. A. PAULIUKAVETS

SIMULATION OF A METHOD FOR CHECKING THE ELECTRIC BUS TRACTION DRIVE BY HEATING BY THE EQUIVALENT CURRENT METHOD

Abstract

A simulation model has been developed for calculating the equivalent stator current of an electric bus traction drive. Based on this model, a study of the equivalent stator current of the ТАД-155-04-БУ1 asynchronous motor was carried out in three modes of electric bus movement. The study showed that the motor is suitable for heating, and the model can be adapted to determine equivalent power and torque values when testing electric drives for heating.

Keywords:

traction electric drive, electric bus, equivalent current method, heating test, asynchronous electric drive, simulation model.