

характеристики АД в этом частотном диапазоне определяются уравнениями (1)–(3).

В результате построения механических характеристик явно прослеживается изменение характера зависимостей при двухзонном регулировании скорости: в диапазоне  $\alpha = 0,1 \dots 1$  они имеют линейный характер, а при переходе во вторую зону регулирования при  $\alpha = 1 \dots 2,4$  графики имеют нелинейный характер в соответствии с формулами (1)–(3).

#### *Литература*

1. Атаманов, Ю. Е. Определение механических характеристик частотно-регулируемого асинхронного двигателя электробуса по пропорциональному закону = Determination of mechanical characteristics of a frequency-controlled asynchronous motor of an electric bus according to the proportional law / Ю. Е. Атаманов, В. Н. Плищ, А. Д. Хилько // Автотракторостроение и автомобильный транспорт : сборник научных трудов : в 2 томах / Белорусский национальный технический университет, Автотракторный факультет ; редкол.: Д. В. Капский (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – Т. 1. – С. 175-181.

УДК 621.3.077.2

### **ПОСТРОЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОБУСА**

Радкевич А.А.

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Павлюковец С.А.

Одним из важных этапов проектирования тягового электропривода является построение его механических и электромеханических характеристик, которые необходимы при исследовании динамических свойств системы и должны учитываться при разработке системы управления электроприводом. Несмотря на то, что методика построения искусственных и естественных характеристик различных электроприводов хорошо известна как при неизменном значении частоты, так и в динамических режимах работы, применительно к тяговым электродвигателям транспортных средств данная задача исследована мало. Наиболее полно методика расчёта и построения искусственных механических характеристик тягового асинхронного электропривода электробуса изложена в статье [1]. На основании данной методики проведём построение предельных механических тяговых характеристик

асинхронного электропривода городского электробуса грузоподъёмностью 18000 кг и пассажироместимостью 72 человека.

На основании ранее определённых нагрузочных диаграмм для разных режимов движения электробуса построим график предельной тяговой характеристики электробуса  $F = f(\vartheta)$ , показанный на рис. 1.

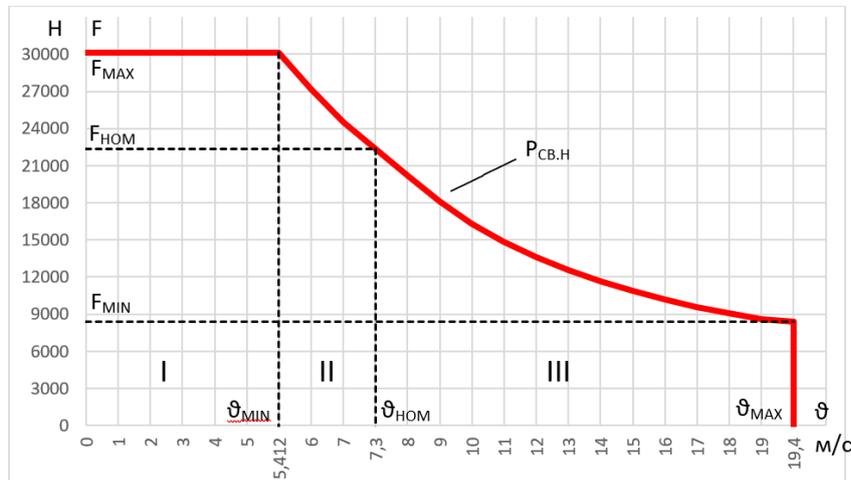


Рис.1 Предельная тяговая характеристика  $F = f(\vartheta)$  электробуса грузоподъёмностью 18 т

На данной характеристике выделяются 3 участка движения [2]:

— I участок графика соответствует постоянству тягового усилия  $F_{MAX}$ . Это соответствует разгону электробуса с постоянным ускорением и выражается уравнением

$$a = \frac{F_{MAX} - N_C}{m},$$

где  $F_{MAX}$  – максимальное тяговое усилие электробуса;  $N_C$  – сила сопротивления,  $m$  – масса электробуса.

— II участок графика соответствует разгону двигателя от  $\vartheta_{MIN}$  до  $\vartheta_{НОМ}$ . На данном участке свободная мощность РСВ поддерживается на номинальном уровне.

— III участок графика соответствует постоянству усилия  $F_{MIN}$ .

Тяговая характеристика электробуса описывается системой уравнений

$$\begin{cases} F = F_{MAX}, 0 \leq \vartheta \leq \vartheta_{MIN}; \\ F = \frac{P_{CB,H} \cdot \varepsilon_{\eta}}{\vartheta}, \vartheta_{MIN} \leq \vartheta \leq \vartheta_{MAX}; \\ \vartheta = \vartheta_{MAX}; F \leq F_{MIN}. \end{cases}$$

Для получения тяговой характеристики электродвигателя необходимо привести тяговое усилие к моменту.

Реализация тяговой характеристик обеспечивается соответствующим регулированием угловой скорости  $\omega_{ДОП}$  по выражению

$$\omega_{ДОП} = \frac{P_{СВ.Н} \cdot \eta_{ДВ}}{M_{ДОП}}.$$

На основании построенной предельной тяговой характеристики электробуса и нагрузочных диаграмм электробуса можно построить предельную механическую характеристику тягового электропривода. В качестве электродвигателя рассмотрим асинхронный тяговый электродвигатель ТАД 155-04-БУ1 производства ОАО «Могилёвлифтмаш». Поскольку в системе электропривода используется векторное частотное управление электродвигателем, возможна реализация двухзонного регулирования момента и скорости двигателя. Оно подразумевает две зоны изменения скорости [1]:

- I зона с постоянством динамического момента:  $0 \leq \omega \leq \omega_{НОМ}$ ;
- II зона с постоянством мощности:  $\omega_{НОМ} \leq \omega \leq \omega_{МАХ}$ .

При векторном управлении механические характеристики электродвигателя принимают вид, близкий к линейным зависимостям, а график предельной тяговой характеристики электродвигателя  $M_{ДОП} = f(\omega)$ , изображённый на рис. 2, повторяет форму графика предельной тяговой характеристики электробуса  $F = f(\vartheta)$ .

Учитывая, что двигатель ТАД 155-04-БУ1 имеет независимую вентиляцию, то его допустимый момент не зависит от угловой скорости при работе в I зоне регулирования. Во II зоне регулирования допустимый момент изменяется в соответствии с системой выражений

$$\begin{cases} M_{ДОП} = F_{МАХ}, 0 \leq \omega \leq \omega_{MIN}; \\ M_{ДОП} = \frac{P_{СВ.Н} \cdot \varepsilon \eta}{\vartheta}, \omega_{MIN} \leq \omega \leq \omega_{МАХ}; \\ \omega = \omega_{МАХ}; M_{ДОП} \leq M_{MIN}. \end{cases}$$

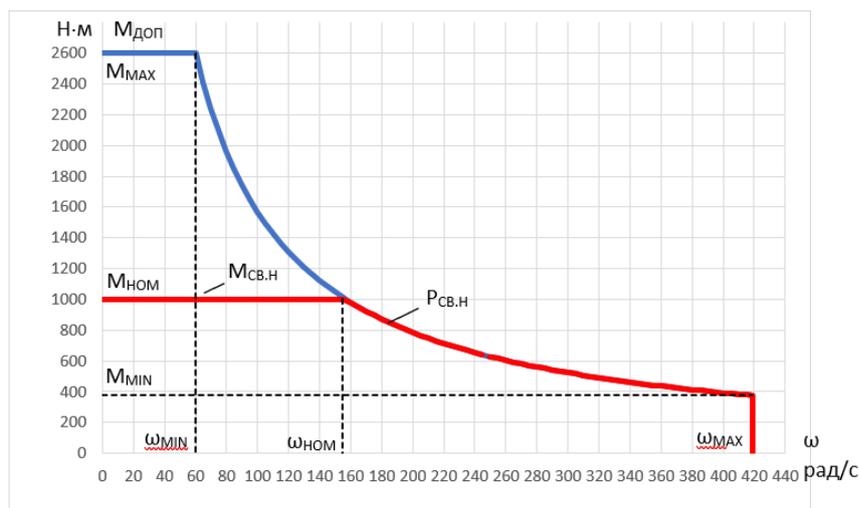


Рис.2 Предельная механическая тяговая характеристика тягового электродвигателя ТАД 155-04-БУ1 электробуса  $M_{доп} = f(\omega)$

На рис. 2 красным цветом показана предельная механическая тяговая характеристика электродвигателя при его работе в номинальном режиме, синим цветом изображена предельная характеристика двигателя при работе с максимальной скоростью и максимальным моментом. Однако, такой режим работы двигателя в электробусе не используется, а максимальный момент двигателя ограничивается на уровне  $1,5 \cdot M_{НОМ}$  по условиям нагрева ведущего моста.

Полученные предельные характеристики электропривода определяют пределы работы двигателя по скорости и моменту, и позволяют перейти к построению статических искусственных характеристик электродвигателя, что необходимо при дальнейшем проектировании системы управления.

### Литература

1. Атаманов, Ю. Е. Построение механической характеристики асинхронного двигателя электробуса = Construction of the mechanical characteristics of the electric bus asynchronous motor / Ю. Е. Атаманов, В. Н. Плищ, А. Д. Хилько // Автотракторостроение и автомобильный транспорт : сборник научных трудов : в 2 томах / Белорусский национальный технический университет, Автотракторный факультет ; редкол.: Д. В. Капский (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2021. – Т. 1. – С. 158 – 165.

2. Атаманов, Ю. Е. Определение механических характеристик частотно-регулируемого асинхронного двигателя электробуса по закону стабилизации потокосцепления ротора = Determination of mechanical characteristics of a frequency-controlled asynchronous motor of an electric bus according to the law of stabilization of the flow coupling of the rotor / Ю. Е. Атаманов, В. Н. Плищ, А. Д. Хилько // Автотракторостроение и

автомобильный транспорт : сборник научных трудов : в 2 томах / Белорусский национальный технический университет, Автотракторный факультет ; редкол.: Д. В. Капский (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – Т. 1. – С. 155-163.

УДК 621.313.13

## **ПРОБЛЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ**

Абразовская Д.А., Савко Н.О.

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Павлюковец С.А.

Современные технологии в области электромеханических систем и автоматизации требуют точного и надежного позиционирования двигателей. Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) представляют собой эффективные и компактные устройства, которые находят применение во многих отраслях промышленности. Однако, позиционирование таких двигателей может столкнуться с рядом сложных проблем.

### ***Рассмотрим основные проблемы позиционирования***

#### ***1. Начальный запуск и инициализация***

Для успешного позиционирования СДПМ необходимо провести точную инициализацию начальной позиции. Это может быть сложной задачей, особенно если двигатель используется в условиях переменных нагрузок или вибраций. Необходимы методы и алгоритмы, которые позволяют надежно определить начальное положение ротора.

#### ***2. Подавление вибраций***

СДПМ могут столкнуться с проблемой вибраций при позиционировании, особенно на низких скоростях. Эти вибрации могут оказать негативное воздействие на точность позиционирования и срок службы двигателя. Разработка алгоритмов подавления вибраций является важным аспектом решения этой проблемы.

#### ***3. Точность и устойчивость***

СДПМ могут иметь неточности, связанные с неоднородностью магнитных полей и другими факторами, что может повлиять на точность позиционирования. Устойчивость работы двигателя при изменяющихся условиях также может быть вызовом.