

Рисунок 2 –Схема сил, действующих на шток пневмоцилиндра и диск сцепления

Полезное сопротивление выражается в сжатии пружин пневмоцилиндра и диска сцепления.

$$N_{пол} = F_1 + F_2 = z(c_k + nc_c \frac{L_1}{L_2}),$$

Где  $F_1$ – сила, необходимая для сжатия пружины жесткостью  $c_k$ ;  $F_2$  – сила, необходимая для сжатия  $n$  пружин жесткостью  $c_c$ , соединенных параллельно;  $F_{пред}$  – сила предварительного сжатия пружин;  $L_1, L_2$  – плечи приложения полезных сил  $F_1, F_2$ ;  $Z$  – координата перемещения штока [пневмоцилиндра](#).

УДК 629.433.015 (076.5)

## ВЫБОР СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОБУСА

**Ю.Е. Атаманов, В.Н. Плищ, А.Ф. Акулич**

*Аннотация: Рассмотрены вопросы выбора закона регулирования тягового асинхронного электродвигателя для обеспечения тягово-скоростных свойств электробуса при его движении по маршруту, выполнены соответствующие расчеты.*

Хорошо известны преимущества электрического городского пассажирского транспорта, в частности троллейбуса, по сравнению с автобусом. Однако, если автобус работает не только на городских маршрутах, но и на пригородных и на междугородних, то троллейбус используется для перевозки пассажиров только в населенных пунктах. Известна всего лишь одна междугородняя работающая троллейбусная линия Симферополь-Ялта.

Развитие пригородного троллейбусного сообщения сдерживается присущими троллейбусу недостатками. В основном это зависимость от контактной линии, постройка и обслуживание которой вместе с подстанциями обходится довольно дорого. Кроме того, над проезжей частью дороги висят тонны цветного металла, не украшающих

вид современных городов. Чтобы «оторвать» электрические мобильные машины от контактной линии, на них в качестве источника электрической энергии стали применять массивные аккумуляторные батареи, что обеспечивало им автономный пробег на некоторое расстояние. Говорить об автономном движении электрического транспорта с аккумуляторными батареями даже по городским маршрутам, а тем более пригородным, не приходится.

И только с появлением новых современных накопителей электрической энергии (суперконденсаторов - ионисторов) стало возможным обеспечение автономного движения троллейбуса, которые стали называть электробусами, на требуемое расстояние. Так, в 2007 году на линии городского транспорта вышел белорусский троллейбус четвертого поколения модели 420 с тяговым асинхронным электродвигателем. Троллейбус способен без контактной сети проехать до 5 километров. На базе этого троллейбуса разработан сочлененный низкопольный электробус E43303 *Vitovt Max Electro* с тремя осями, из которых две ведущие. Этот электробус сочетает в себе возможности троллейбуса и автобуса одновременно. Кстати, в представленной конфигурации 18,75-метровый *Vitovt Max Electro*, оснащенный тяговым электродвигателем мощностью 160 кВт, может перевозить 153 пассажира (при 38 сидячих местах в салоне). Белорусский электробус, в отличие от других подобных машин, оснащен передовой системой накопителей электроэнергии на базе суперконденсаторов, позволяющих обеспечить движение машины по маршруту и быструю подзарядку источника электроэнергии на конечных остановочных пунктах с помощью специальных зарядных станций. Пробег на одной подзарядке может составлять и 20, и 30 километров - просто нужно добавить определенное количество суперконденсаторов. Но это приведет, как, к удорожанию электробуса (что не всегда устраивает заказчика), так и к увеличению снаряженной массы машины и, как следствие, к уменьшению ее пассажировместимости.

В настоящее время электробусы работают на городских маршрутах в Минске и Гродно. При работе на городских маршрутах электробусы движутся как по горизонтальным участкам дорог, так и преодолевают подъемы, спуски, трогаются и разгоняются в начале движения от остановок и на перекрестках после разрешающего сигнала светофора. Следовательно, при проектировании электробуса требуется подобрать тяговый электродвигатель необходимой мощности и систему его регулирования, т.е. систему, позволяющую изменять вращающий момент тягового электродвигателя в зависимости от числа оборотов его вала (ротора).

С развитием полупроводниковой техники и созданием надежных, малогабаритных статических преобразователей частоты самым эффективным и достаточно экономичным способом регулирования скорости вращения асинхронных электродвигателей является частотный способ. При выборе тягового электродвигателя и преобразователя частоты необходимо учитывать следующие параметры:

- диапазон регулирования частоты вращения вала электродвигателя с целью определения числа полюсов двигателя и номинальной частоты вращения вала двигателя;
- нагрузочную характеристику, которая определяет ограничения, связанные с охлаждением двигателя и выходом в зону ослабленного поля, т.е. на частоту вращения вала двигателя выше его номинальной частоты по техническим условиям на двигатель;
- требуемый вращающий момент тягового электродвигателя с целью определения мощности двигателя;
- тип и мощность преобразователя частоты должен учитывать будет осуществляться управление одним двигателем или группой двигателей.

Мощность тягового электродвигателя  $P_{дв}$  должна быть больше мощности нагрузки (сопротивления движению электробуса)  $P_{нагр}$ , т.е.  $P_{дв} > P_{нагр}$ . Мощность преобразователя частоты выбирается так, чтобы номинальный ток двигателя ( $I_{дв}$ ) был меньше или равен току на выходе преобразователя частоты ( $I_{пч}$ ),  $I_{пч} \geq I_{дв}$ .

Частотное регулирование обычно применяют в тех случаях, когда требуется изменять частоту вращения и электромагнитный момент двигателя в широких пределах. Такие условия возникают, например, в транспортных машинах (автомобилях, троллейбусах, электробусах) с электрической трансмиссией.

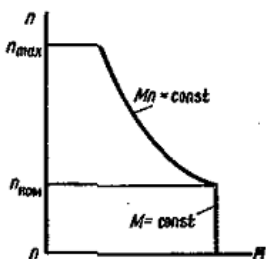


Рисунок 1. Механическая характеристика электродвигателя для транспортной машины с электрической трансмиссией

После определения потребной мощности и выбора тягового электродвигателя, строят его механическую характеристику. Под механической характеристикой принято понимать зависимость частоты вращения вала (ротора)  $n$  в функции от электромагнитного момента ( $M$ ),  $n = f(M)$ . Эту характеристику можно получить, используя зависимость вращающего момента двигателя от скольжения, пересчитав частоту вращения ротора при различных значениях скольжения. На рисунке 1 приведена механическая характеристика тягового электродвигателя,

требуемая для машины с электромеханической трансмиссией. На начальном участке механической характеристики, т. е. в период разгона машины от  $n = 0$  до  $n = n_{\text{ном}}$ , необходимо поддерживать постоянный момент ( $n_{\text{ном}}$  – номинальная частота вращения вала двигателя). Затем при изменении частоты от  $n_{\text{ном}}$  до  $n_{\text{max}}$  нужно работать при постоянной мощности, т. е. постепенно уменьшать момент двигателя с возрастанием частоты вращения, выполняя условие  $M_{\text{дв}} n_{\text{дв}} = \text{const}$ .

Чтобы получить требуемую характеристику двигателя, следует изменять не только частоту питающей сети, но и значение напряжения, подводимого к двигателю. Они должны иметь определенную зависимость, при которой обеспечивается устойчивая работа тягового электродвигателя, не происходит его чрезмерной нагрузки по току и магнитному потоку и т. п. Выбранный закон управления тяговым электродвигателем необходимо реализовать посредством достаточно простого и надежного автоматического устройства.

Одной из тенденций в области энергосберегающих технологий последних лет является применение частотно-регулируемых приводов на основе асинхронных короткозамкнутых электродвигателей и полупроводниковых преобразователей частоты, снижающих потребление электрической энергии, повышающих степень автоматизации, удобство эксплуатации электропривода.

Асинхронный двигатель общего применения сконструирован так, что оптимальная плотность электромагнитного потока достигается у него при номинале питающего напряжения  $U = 200$  В и частоте  $f = 50$  Гц. Если изменяется частота питающего напряжения, то одновременно требуется изменять напряжение питания электродвигателя. Это необходимо для поддержания постоянной величины скольжения. Управление асинхронным электродвигателем с изменением частоты вращения называется управлением с постоянным отношением напряжения к частоте  $U/f$ . На практике применяют линейные и квадратичные отношения  $U/f$ .

**Отношение  $U/f$  - линейное.** Напряжение на тяговом электродвигателе растет линейно с увеличением частоты вращения вала двигателя. Номинальное напряжение подается на двигатель при номинальной частоте. Линейное отношение  $U/f$  используется в электроприводах с постоянным моментом сопротивления на валу (не зависящим от скорости рабочего органа).

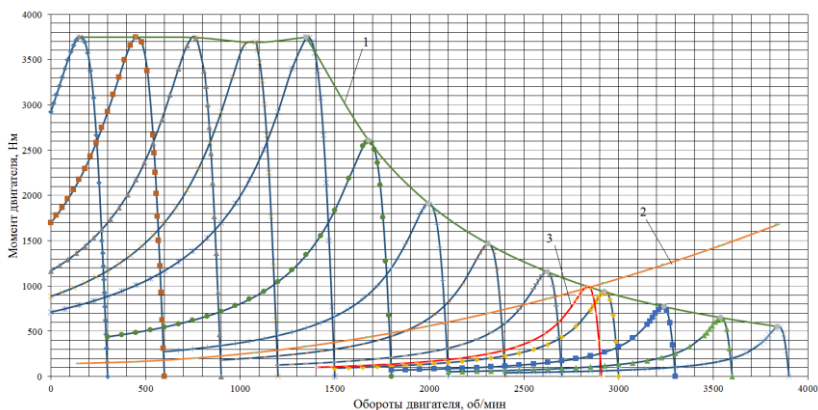
**Отношение  $U/f$  - квадратичное.** Напряжение электродвигателя изменяется по квадратичной зависимости по мере возрастания частоты вращения вала от  $f = 0$  Гц до номинальной частоты  $f_{\text{ном}}$  питающего напряжения двигателя. При этом на двигатель подается номинальное напряжение при номинальной частоте. Электродвигатель работает с уменьшенным магнитным потоком на частотах ниже номинальной

частоты. Он имеет меньший критический вращающий момент, чем при линейном отношении  $U/f$ , и создает меньше шума. Квадратичное соотношение  $U/f$  используется для приводов, в которых требуемый вращающий момент (момент сопротивления) пропорционален квадрату скорости. Таковым является аэродинамический момент сопротивления движению транспортной машины.

Из сказанного следует, что система управления тяговым асинхронным электродвигателем транспортной машины с электромеханической трансмиссией, в нашем случае электробусом, должна регулировать отношения  $U/f$  как по линейному, так и по квадратичному законам. Однако при движении в городских условиях скорости движения невелики и в первом приближении аэродинамическим моментом сопротивления пренебрегают, а момент сопротивления движению принимают постоянным.

Исследовался гипотетический электробус на 153 пассажира снаряженной массой 1,76 т с асинхронным электродвигателем ДТА-1У1, номинальная мощность которого равна 180 кВт, с тиристорно-импульсной системой управления. Расчеты выполнялись при движении электробуса по маршруту с номинальным заполнением салона пассажирами.

Закон управления асинхронным электродвигателем получим, дополнив график механических характеристик тягового асинхронного электродвигателя при регулировании по частоте, кривыми динамического фактора и изменением сопротивления движению (рисунок 2).



1 – динамический фактор; 2 – момент сопротивления движению;  
3 – подобранная частота

Рисунок 2 – К выбору закона управления тяговым асинхронным электродвигателем ДТА-1У1

На семействе механических характеристик электродвигателя отмечаем точки пересечений нисходящих ветвей характеристики на каждой частоте с кривой момента сопротивления, что позволяет определить скорость движения электробуса в зависимости от частоты преобразователя (таблица 1, рисунок 3).

Таблица 1 – Данные для определения закона управления двигателем

$f$ , Гц	$M=M_c$ , Н·м	$n$ , об/мин	$\omega$ , сек <sup>-1</sup>	$v$ , км/ч
0	0,000	0,000	0,000	0,000
10	156,000	297,000	31,086	5,482
20	158,000	597,000	62,486	11,018
30	234,000	896,000	93,781	16,537
40	311,000	1194,000	124,972	22,037
50	387,000	1493,000	156,267	27,555
60	480,000	1793,000	187,667	33,092
70	575,000	2080,000	217,707	38,389
80	730,000	2375,000	248,583	43,834
90	885,000	2663,000	278,727	49,149
97	980,000	2840,000	297,253	52,416

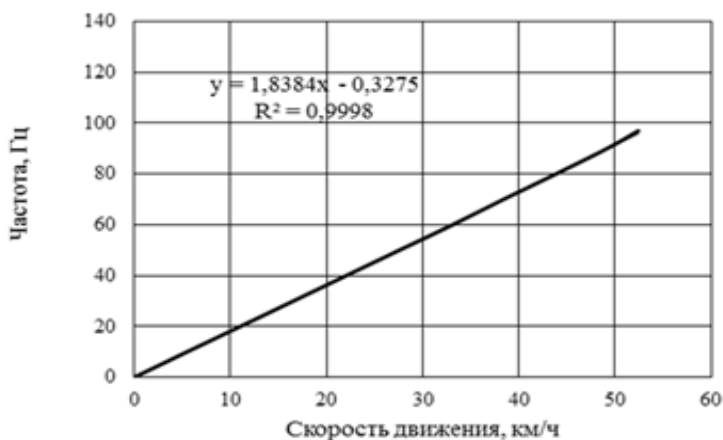


Рисунок 3 – Зависимость частоты преобразователя от скорости электробуса

Учитывая условия эксплуатации, приведенный момент сопротивления движению  $M_c$ , полученные характеристики электродвигателя (рисунок 2) и статистические методы, было найдено аналитическое выражение,

определяющее значения частоты  $f$  преобразователя для управления асинхронным тяговым электродвигателем электробуса в зависимости от скорости электробуса:

$$f = 1,8384v - 0,3275; \quad (1)$$

где  $v$  – скорость движения электробуса, км/ч.

Отметим, что частота преобразователя равная 97 Гц (таблица 1), подобрана так, чтобы при этой частоте было максимально приближены точки пересечения кривых динамического фактора и механической характеристики электродвигателя при данной частоте с кривой момента сопротивления движению. Эта частота является наибольшей для регулирования тяговым электродвигателем, так как задавать более высокую частоту питающего напряжения преобразователем нецелесообразно, поскольку в дальнейшем *вращающий момент тягового электродвигателя меньше приведенного момента сопротивления движению.*

Управление асинхронным электродвигателем по предлагаемому закону позволит обеспечить требуемые тягово-скоростные свойства электробуса. Применение частотно-регулируемого электропривода на электробусе позволяет обеспечить снижение потребляемой мощности до 30% по сравнению с контакторно-резисторной системой управления.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Технический справочник по городскому электротранспорту. Том 3./ Под ред. А. Н. Трофимова. – М.: Министерство коммунального хозяйства РСФСР, 1963. – 723 с.

2. Минский городской исполнительный комитет. УП «Белкоммунмаш». Троллейбусы моделей 321, 32102 [Электрон. ресурс] - Мн., 2008. - Режим доступа: [http://www.minsk.gov.by/cgi-bin/org\\_ps.pl?k\\_org=103&mode=doc&doc=1031\\_3](http://www.minsk.gov.by/cgi-bin/org_ps.pl?k_org=103&mode=doc&doc=1031_3)

УДК 378.147.227

#### **ИНТЕРАКТИВНОЕ ОБУЧЕНИЕ В ДИЗАЙНЕ ТРАНСПОРТА**

***В.Н. Лукьянчик, В.П. Бойков***

*Аннотация: Рассмотрены методики обучения промышленному дизайну, выявлены направленности и содержания интерактивных методов обучения на основе зарубежного опыта, разработана модель методики интерактивного обучения с использованием модульных технологий в процессе изучения дисциплины «Компьютерное проектирование», разработан электронный образовательный ресурс.*