

6. **Pugachev, I. N.**, Kulikov, Yu. I. & Markelov, G. Ya. (2011) Usage of Navigation Satellite Systems in Management of Automobile Transportation. *Gruzovoye i Passazhirskoye Avtokhozyastvo* [Cargo-Carrying and Passenger Transport Service], 4, 64–69 (in Russian).

7. **Pugachev, I. N.**, Markelov, G. Ya., & Pavlenko, A. A. (2014) Principles for Designing Intellectual Management System. *Modernization of Road Traffic Organization and Passenger and Cargo-Carrying Transport Service: Collection of Scientific Papers Adapted from International Scientific-Practical Conference*. Minsk: BNTU, 32–40 (in Russian).

8. **Pugachev, I. N.**, & Markelov, G. Ya. (2014) Intellectual Management of Urban Transport Systems. *Transport and Service: Collection of Scientific Papers. Issue 2: Operation of*

Sustainable Urban Transport Systems. Kaliningrad, Publishing House Named After I. Kant, 58–66 (in Russian).

9. **Pugachev, I. N.**, Burkov, S. M., Markelov, G. Ia., & Oleinik, A. V. (2013) *Strategy for Development of Intellectual Transport System Usage in Urban Traffic Management*. Khabarovsk: Publishing House of Pacific National University, 141 p. (in Russian).

10. **Pugachev, I. N.**, Markelov, G. Ia., & Burkov, S. M. (2013) *ITS (Intellectual Transport System) Formation. Methodology for Infrastructure Investigation Using the Example of Khabarovsk*. Khabarovsk: Publishing House of Pacific National University, 126 p. (in Russian).

Поступила 18.11.2014

УДК 629.3.014

ВЫБОР СПОСОБА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ТРАКТОРА И ПОСТРОЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Канд. техн. наук, доц. ЖДАНОВИЧ Ч. И., инж. КАЛИНИН Н. В.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: knv9041986@rambler.ru

В настоящее время ведутся работы по созданию тракторов (как колесных, так и гусеничных) с электромеханической трансмиссией. От вида механической характеристики тягового электродвигателя трактора, оборудованного электромеханической трансмиссией, зависит диапазон изменения передаточного отношения трансмиссии при помощи тягового электродвигателя: если диапазон достаточно большой, то можно свести к минимуму число передач в коробке передач трактора или вообще ее не использовать. Тип применяемого тягового электродвигателя и способ регулирования им определяют вид механической характеристики (семейства характеристик) тягового электродвигателя.

В статье рассматривается тяговый асинхронный электродвигатель с частотным управлением. При частотном управлении регулировать обороты электродвигателя можно совместным изменением напряжения и его частоты. Существуют различные законы совместного изменения напряжения и частоты (законы регулирования). Выбор закона регулирования влияет на вид механической характеристики тягового электродвигателя. Применение какого-либо закона может быть допустимо лишь для определенного диапазона частоты напряжения, при выходе за который могут быть превышены какие-либо параметры (например, допустимое напряжение в обмотке статора электродвигателя). Для тягового электродвигателя трактора необходимо обеспечить требуемый момент в широких пределах. При этом потери в электродвигателе должны быть минимальными. Потери в роторе тягового асинхронного электродвигателя прямо пропорциональны его скольжению, а наилучшие тягово-динамические свойства мобильной машины будут при сохранении скольжения постоянными. По этим причинам выбор законов регулирования произведен для работы тягового асинхронного электродвигателя при номинальном скольжении, а механическая характеристика при номинальном скольжении условно названа номинальной характеристикой.

Проанализированы возможные законы совместного применения напряжения и его частоты и границы их применения. Подобрана комбинация законов для регулирования тягового асинхронного электродвигателя, обеспечивающая наиболее широкий диапазон его работы с высоким значением момента при номинальном скольжении с учетом ограничений по применению каждого из использованных законов регулирования. Для тягового асинхронного электродвигателя, регулируемого по предложенному закону, построено семейство механических характеристик: при номинальном скольжении, при критическом скольжении, при изменяющемся скольжении и без изменения напряжения и частоты.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, момент, скольжение, напряжение, частота, закон регулирования.

Ил. 4. Библиогр.: 10 назв.

SELECTION OF METHOD FOR REGULATION OF TRACTOR PROPULSION ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR AND CONSTRUCTION OF MECHANICAL CHARACTERISTICS

ZH DANOVICH Ch. I., KALININ N. V.

Belarusian National Technical University

Nowadays the work is in progress to develop wheeled and caterpillar tractors with electromechanical transmission. Range of changes in transmission gear ratio while using propulsion electric motor depends on mechanical characteristics of a tractor propulsion electric motor which is equipped with electromechanical transmission. In case when the range is rather high then it is possible to minimize number of gearings in the tractor gearing box or exclude its usage at all. Type of the applied propulsion electric motor and regulation method specify type of mechanical characteristics (characteristics family) of the propulsion electric motor.

The paper considers a propulsion asynchronous electric motor with frequency control. While using frequency control it is possible to regulate electric motor revolutions by mutual changes in voltage and voltage frequency. There are various laws of mutual changes in voltage and frequency (regulation laws). Selection of a regulation law influences on type of mechanical characteristics of a propulsion electric motor. Application of any law can be admissible only for some specific range of voltage frequency otherwise it is possible to exceed some parameters (for example, admissible voltage in the winding of electric motor stator). It is necessary to ensure the required moment within wide range for a tractor propulsion electric motor. In this case losses in the electric motor must be minimal. Losses in the rotor of the propulsion asynchronous electric motor are directly proportional to its sliding and its best propulsion and mechanical properties of a mobile machine will be ensured in the case when sliding is preserved at a constant value. According to these reasons selection of regulation laws has been carried out for operation of the propulsion asynchronous electric motor with nominal sliding and mechanical characteristics at nominal sliding is conventionally called a nominal characteristics.

The paper analyzes the possible laws of mutual application of voltage and voltage frequency and their application boundaries. A combination of laws for regulation of the propulsion asynchronous electric motor has been selected in the paper. The combination ensures the widest operational range of the electric motor with high moment value at nominal sliding and due account of limitations on application of every used regulation law. The following mechanical characteristics family has been constructed for the propulsion asynchronous electric motor regulated in accordance with the proposed law: at nominal sliding, at critical sliding, at changeable sliding and without changes in voltage and frequency.

Keywords: propulsion electric motor, moment, sliding, voltage, frequency, regulation law.

Fig. 4. Ref.: 10 titles.

Введение. Тяговый электродвигатель (ТЭД) может обеспечить бесступенчатое регулирование передаточного отношения электромеханической трансмиссии трактора в пределах, определяемых типом ТЭД и способом регулирования им. Задача исследований – проанализировать возможные способы регулирования тягового асинхронного электродвигателя (ТАД) трактора с частотным управлением и подобрать такой способ регулирования, при котором был бы обеспечен наиболее широкий диапазон изменения передаточного отношения трансмиссии при помощи электродвигателя, что позволило бы свести к минимуму число передач в коробке передач трактора либо вообще ее не использовать.

Определение зависимостей для построения характеристик ТАД. По виду механической и мощностной характеристик можно определить, насколько оптимальным будет тот или иной закон регулирования для ТАД трактора. Для их построения преобразуем пред-

ставленные в [1] зависимости так, чтобы получить формулы для нахождения момента и мощности ТАД при отклонении напряжения и частоты от номинальных значений. Отношение текущего значения частоты f_1 к ее номинальному значению $f_{1,н}$ будет обозначено k_f , а отношение текущего значения напряжения U_1 к его номинальному значению как k_U :

$$k_U = \frac{U_1}{U_{1,н}}; \quad k_f = \frac{f_1}{f_{1,н}}$$

При $f_1 = f_{1,н}$ критическое скольжение $s_{кр}$ и электромагнитную мощность P_a можно определить по зависимостям [1]; при этом принимается допущение, что сопротивления r_1, r_2', x_1, x_2' не зависят от скольжения s [1, с. 28]. Для расчета $s_{кр}, P_a$ при переменной частоте f_1 необходимо учесть, что индуктивные сопротивления x_1 и x_2' пропорциональны частоте f_1 . Для этого в [1] выражение $(x_1 + cx_2')$ заменим на выражение $k_f(x_1 + cx_2')$ [1, с. 30] и получим формулы:

$$s_{кр} = \frac{c_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + k_f^2 (x_1 + c_1 x_2')^2}}; \quad (1)$$

$$P_a = \frac{m_1 U_{1,н}^2 k_U^2 r_2'}{s \left[\left(r_1 + \frac{c_1 r_2'}{s} \right)^2 + k_f^2 (x_1 + c_1 x_2')^2 \right]}, \quad (2)$$

где c_1 – коэффициент, показывающий, во сколько напряжение U_1 статора больше ЭДС E_1 статора, $c_1 = 1,02–1,05$ [1, с. 12; 2, с. 161] и приближенно рассчитывается по формуле [1, с. 10]

$$c_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_0},$$

x_0 – индуктивное сопротивление магнитной цепи при $f_{1,н}$; x_1 – индуктивное сопротивление фазы статора при $f_{1,н}$; x_2' – индуктивное сопротивление ротора при $f_{1,н}$; r_1 – активное сопротивление фазы статора в номинальном режиме; r_2' – приведенное активное сопротивление ротора; m_1 – число фаз обмотки статора.

Для нахождения электромагнитного момента M_a на валу ТАД подставим (2) в [1] и из полученного выражения выразим M_a

$$M_a = \frac{m_1 U_{1,н}^2 k_U^2 r_2' p_1}{2\pi f_{1,н} k_f s \left[\left(r_1 + \frac{c_1 r_2'}{s} \right)^2 + k_f^2 (x_1 + c_1 x_2')^2 \right]}, \quad (3)$$

где p_1 – число пар полюсов.

При $s = s_n$, $f_1 = f_{1,н}$ и $U_1 = U_{1,н}$ электромагнитный момент ТАД M_a примет номинальное значение. При $s_{кр}$ момент будет максимальным.

Устойчивой работа ТАД будет только при $s \leq s_{кр}$ [2, с. 169], поэтому случай $s > s_{кр}$ рассматривать не будем.

Определение законов регулирования. Для совместного регулирования частоты вращения ТАД и момента существуют следующие законы регулирования: $k_U = k_f$ [3, с. 28; 4, с. 304; 5, с. 54]; $k_U^2 = k_f$ [3, с. 128] и $k_U = 1$ при изменении частоты без изменения напряжения [1, с. 65].

При повышении частоты сверх номинальных значений применим только закон $k_U = 1$, поскольку недопустимо повышать напряжение более номинальных значений.

При понижении частоты питающего напряжения область применения законов $k_U = 1$ и $k_U^2 = k_f$ ограничена допустимыми значениями намагничивающего тока и магнитного потока. Отношение k_U/k_f с достаточной точностью определяет зависимость намагничивающего тока [1, с. 62, рис. 3.1; с. 60]. Чтобы намагничивающий ток не оказался слишком большим, должно соблюдаться условие $k_U/k_f \leq 1,1–1,2$ [1; 6, с. 74].

Для наглядного определения интервалов применимости каждого из законов регулирования по формулам (2), (3) построим графические зависимости на рис. 1 (здесь и далее расчет производили для ТАД, аналогичного применяемому на тракторе [7]). Пересечение трех кривых на графиках – это точка, в которой $f = f_{1,н}$, $U_1 = U_{1,н}$. Штриховыми линиями обозначены участки кривых, на которых работа ТАД возможна лишь теоретически, поскольку на данных участках превышаются предельно-допустимые значения некоторых параметров.

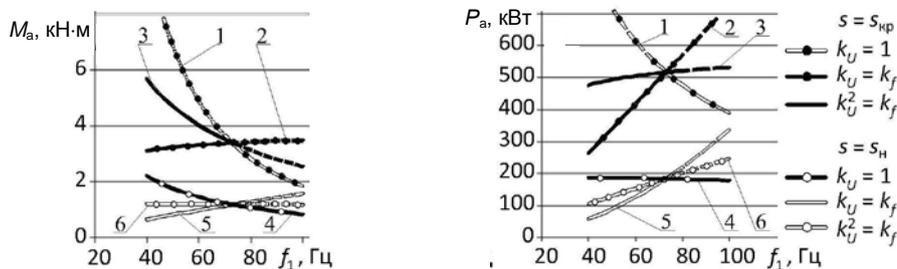


Рис. 1. Изменение электромагнитного момента M_a и активной электромагнитной мощности P_a в зависимости от f_1 при $s = s_n$ и $s_{кр} = f(f_1)$ для различных законов регулирования ТАД:

1 – $s = s_{кр}$, закон регулирования $k_U = 1$; 2 – $s = s_{кр}$, $k_U = k_f$; 3 – $s = s_{кр}$, $k_U^2 = k_f$; 4 – $s = s_n$, $k_U = 1$;

5 – $s = s_n$, $k_U = k_f$; 6 – $s = s_n$, закон регулирования $k_U^2 = k_f$

Выбор закона регулирования. ТАД трактора должен обеспечить главным образом требуемый вращающий момент в широких пределах. Поскольку с увеличением скольжения ТАД возрастают электрические потери в роторе [2, с. 163; 8, с. 151; 9, с. 503], желательно обеспечить требуемое значение момента при скольжении, не превышающем или незначительно превышающем s_n . Кроме того, наилучшие тягово-динамические свойства мобильной машины будут при сохранении скольжения постоянным [10, с. 442–445]; по этим причинам характеристику при $s = s_n$ назовем номинальной. Для непродолжительных режимов работы трактора (пуск-разгон) ТАД может работать в неэкономичном режиме, но при этом должен развить требуемый момент и не превысить предельно допустимые параметры ТАД.

Предлагается ТАД регулировать таким образом. При $f_1 > f_{1,n}$ используется только закон $k_U = 1$ (участок OC на рис. 2 и OC_1 на рис. 3). При номинальном скольжении момент будет изменяться обратно пропорционально частоте f_1 , а мощность с изменением частоты f_1 останется практически постоянной.

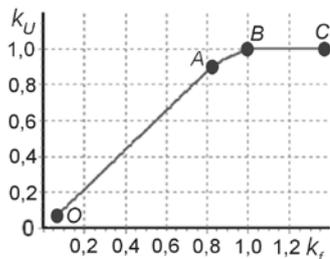


Рис. 2. Зависимость k_U от k_f в пределах регулирования ТАД до $f_1 = 100$ Гц

При $f_{1,lim} < f_1 < f_{1,n}$ используется закон $k_U^2 = k_f$ (участок AB на рис. 2, 3). Частота $f_{1,lim}$ – это такая, ниже которой при регулировании по закону $k_U^2 = k_f$ будет превышено условие $k_U/k_f \leq 1,1-1,2$; $f_{1,lim}$ можно выбрать произвольно, но при этом данное условие обязательно должно выполняться. При номинальном скольжении P_a будет снижаться с убыванием f_1 , а момент останется практически неизменным.

При $f_1 < f_{1,lim}$ используется закон $k_{U1} = k_{f1}$ (участок OA на рис. 2, 3), где $k_{f1} = f_1/f_{1,lim}$; $k_{U1} = U_\phi/U_{lim,\phi}$; $U_{lim,\phi} = U_\phi((f_1/f_{1,lim})^{0,5})$. При сохране-

нии скольжения и мощность, и момент будут убывать вместе со снижением частоты.

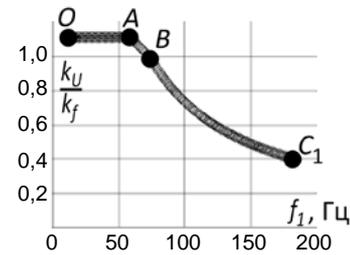


Рис. 3. Зависимость k_U/k_f от f_1 в пределах регулирования ТАД до $f_1 = 182$ Гц

На рис. 2 и 3 частоте $f_{1,n}$ соответствует точка B , частоте $f_{1,lim}$ – точка A .

Механические характеристики ТАД при таком регулировании показаны на рис. 4.

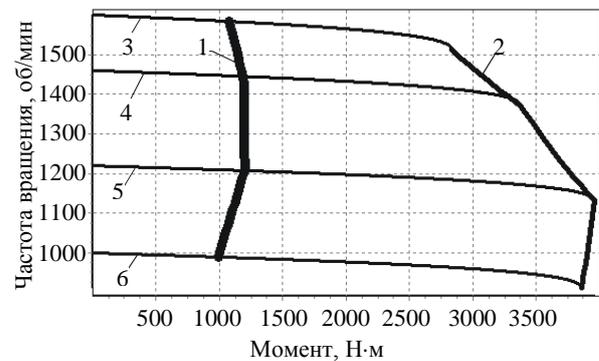


Рис. 4. Механические характеристики ТАД

Кривая 1 соответствует режиму работы ТАД при $s = s_n = const$ и $f_1 = var$, кривая 2 при $s = s_{кр}$ и $f_1 = var$. Назовем кривую 1 условно-вертикальной направляющей, а кривую 2 – ограничивающей. Остальные кривые соответствуют режиму работы при s , изменяющемся от минимально возможного до $s_{кр}$. Для данных кривых $f_1 = const$ и соответствует: для 4 – частоте $f_{1,n}$; для 3 – максимальной частоте f_1 ; для 6 – минимальной частоте f_1 ; для 5 – частоте $f_{1,lim}$. Назовем эти кривые условно-горизонтальными направляющими. Если изменяется нагрузка на валу ТАД без изменения f_1 и U_1 , то изменяется s , а точка на графике сместится по условно-горизонтальной направляющей. Если при изменении f_1 изменяется U_1 по принятому для данного участка закону регулирования, а нагрузка на валу ТАД остается постоянной, то точка на графике сместится строго вертикально; скольжение также изменится (незначительно на

участке регулирования по закону $k_U^2 = k_f$ и более значительно – на других участках). В случае возникновения режима $s = \text{const}$ и $f_1 = \text{var}$ точка на графике сместится по условно-вертикальной направляющей. Работа ТАД может быть только слева по графику от ограничивающей кривой 2. Для наглядности характеристики взят небольшой диапазон частот f_1 – от 50 до 80 Гц, частота $f_{1,\text{lim}}$ находится на уровне 60 Гц.

ВЫВОДЫ

1. Проанализированы основные законы частотного регулирования тягового асинхронного электродвигателя и определены их возможные диапазоны применения.

2. Предложен способ регулирования тягового асинхронного электродвигателя, позволяющий максимально использовать этот двигатель по моменту и учитывающий границы применения различных законов регулирования.

3. Показан способ представления механической характеристики тягового асинхронного электродвигателя и построена механическая характеристика для предложенного способа его регулирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сыромятников, И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И. А. Сыромятников; под ред. Л. Г. Мамиконянца. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
2. Кацман, М. М. Электрические машины: учеб. / М. М. Кацман. – М.: Высш. шк., 2000. – 463 с.
3. Дементьев, Ю. Н. Автоматизированный электропривод: учеб. пособие / Ю. Н. Дементьев, А. Ю. Чернышев, И. А. Чернышев. – Томск: Из-во Томского политехн. ун-та, 2009. – 224 с.
4. Вешеневский, С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе / С. Н. Вешеневский. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.
5. Масандилов, Л. Б. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей / Л. Б. Масандилов, В. В. Москаленко. – М.: Энергия, 1978. – 96 с.

6. Электрические трансмиссии пневмоколесных транспортных средств / И. С. Ефремов [и др.]. – М.: Энергия, 1976. – 256 с.

7. Трактор-3023 [Электронный ресурс] // Официальный интернет-портал ПО «Минский тракторный завод». – Режим доступа: <http://www.belarus-tractor.com/ru/main.aspx?guid=45893&mode=fullinfo>. – Дата доступа: 08.04.2013.

8. Копылов, И. П. Электрические машины: учеб. для вузов / И. П. Копылов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.

9. Вольдек, А. И. Электрические машины: учеб. / А. И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

10. Белоусов, Б. Н. Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности. Конструкция. Теория. Расчет / Б. Н. Белоусов, С. Д. Попов. – М.: Изд-во МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2006. – 728 с.

REFERENCES

1. Syromiatnikov, I. A., & Mamikonians, L. G. (1984) *Operational Modes of Asynchronous and Synchronous Motors*. Moscow, Energoatomizdat. 240 p. (in Russian).
2. Katsman, M. M. (2000) *Electrical Machines*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 463 p. (in Russian).
3. Dementiev, Yu. N., Tchernyshev, A. Yu., & Tchernyshev, I. A. (2009) *Automatic Electric Drive*. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University. 224 p. (in Russian).
4. Veshenevsky, S. N. (1977) *Motor Characteristics in Electric Drive*. Moscow, Energia Publ. 432 p. (in Russian).
5. Masandilov, L. B., & Moskalenko, V. V. (1978) *Regulation of Revolution Frequency in Asynchronous Motors*. Moscow, Energia Publ. 96 p. (in Russian).
6. Yefremov, I. S., Prolygin, A. P., Andreev, Iu. M., & Mindlin, A. B. (1976) *Electrical Transmission of Rubber-Tyred Transport Facilities*. Moscow, Energia Publ. 256 p.
7. Tractor-3023. Official Web-Portal of OJSC "Minsk Tractor Works". Available at: <http://www.belarus-tractor.com/ru/main.aspx?guid=45893&mode=fullinfo>. (accessed 08 April 2013). (in Russian).
8. Kopylov, I. P. (1986) *Electrical Machines*. Moscow, Energoatomizdat. 360 p. (in Russian).
9. Voldek, A. I. (1978) *Electrical Machines*. Leningrad, Energia Publ. 832 p. (in Russian).
10. Belousov, B. N., & Popov, S. D. (2006) *Wheeled Transport Facilities of Rather High Load-Capacity. Design. Theory. Calculation*. Moscow, Bauman MSTU Publishing House. 728 p. (in Russian).

Поступила 24.12.2014