

УДК 629.114

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕДАТОЧНЫХ
ОТНОШЕНИЙ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ
И НАГРУЗОЧНЫМ УСТРОЙСТВОМ ФИЗИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ
ТРАКТОРА**

**METHOD FOR DETERMINING THE GEAR RATIO BETWEEN
THE ELECTRIC MOTOR AND THE LOAD DEVICE
OF THE PHYSICAL MODEL OF THE ELECTROMECHANICAL
TRACTOR POWER TRAIN**

Жданович Ч. И.¹, канд. техн. наук, доц.,

Калинин Н. В.², ст. науч. сотр.,

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

²Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь

Ch. Zhdanovich¹, Ph. D. in Eng., Ass. Prof.,

N. Kalinin², Senior Researcher,

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

²Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy
of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Предложена методика определения передаточных отношений между электродвигателем и нагрузочным устройством физической модели электромеханической трансмиссии трактора.

A method for determining the gear ratios between the electric motor and the load device of a physical model of an electromechanical power train of a tractor is proposed.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, генератор постоянного тока, момент, передаточное отношение, сопротивление, ток, ЭДС.

Keywords: *amperage, DC generator, EMF, gear ratio, induction motor, resistance, torque.*

ВВЕДЕНИЕ

В [1] была предложена физическая модель электромеханической трансмиссии трактора BELARUS 3023, включающая в себя асинхронные электрические машины мощностью 2,2–4 кВт. Для асинхронной электрической машины, которую предполагается использовать в качестве физической модели тягового асинхронного электродвигателя трактора (МТАД), требуется нагрузочное устройство (НУ). В [2] в качестве НУ для МТАД предложено использовать электрическую машину постоянного тока независимого возбуждения, работающую в генераторном режиме. Там же установлено, что для нагружения МТАД во всем диапазоне частот его работы необходимо обеспечивать набор передаточных отношений u_p между МТАД и НУ. В [2] был выполнен расчет параметров НУ для заданных конкретных значений u_p . Задача же данной работы – вывести математические зависимости для определения диапазона значений u_p , при которых параметры НУ будут находиться в допустимых пределах.

ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ u_p

В [2] проводились расчеты для работы МТАД АИР100L6 номинальной мощностью 2,2 кВт и номинальной частотой вращения 940 об/мин [3] в диапазоне частот напряжения от 5 до 180 Гц при нагружении его машиной постоянного тока 4ПБМ160МГ04 [4], работающей в генераторном режиме.

Как видно из таблиц [2], при одних и тех же параметрах на МТАД параметры генератора 4ПБМ160МГ04 с уменьшением u_p изменяются следующим образом:

- напряжение и ЭДС $E_{ГП}$ увеличиваются;
- ток $I_{a,ГП}$ уменьшается;
- требуемое сопротивление нагрузки $R_{ц}$ увеличивается.

Значение ЭДС должно находиться в допустимых пределах. Максимальное значение ЭДС должно быть таким, чтобы не превысить допустимое напряжение на выводах генератора.

Выразим из формул [2, (5)] и [2, (8)] значение u_p через ЭДС (c – конструктивная постоянная; Φ – магнитный поток, Вб; $n_{2,МТАД}$ – частота вращения ротора МТАД, об/мин):

$$u_{p(E)} = c \cdot \Phi \cdot n_{2, \text{МТАД}} / E_{\text{ГП}}. \quad (1)$$

Значение $u_{p(E)}$, соответствующее максимально допустимой ЭДС $E_{\text{ГП, max}}$, обозначим как $u_{p(E, \text{max})}$, а значение $u_{p(E)}$, соответствующее минимально допустимой ЭДС $E_{\text{ГП, min}}$, обозначим как $u_{p(E, \text{min})}$.

Значение $u_{p(E)}$ должно находиться в пределах:

$$u_{p(E, \text{max})} \leq u_{p(E)} \leq u_{p(E, \text{min})}.$$

Обозначим как $u_{p(I)}$ передаточное отношение, определяемое по заданному значению тока $I_{a, \text{ГП}}$. Из формул [2, (4), (3)] для допустимого значения тока генератора $I_{a, \text{ГП, доп}}$:

$$u_{p(I)} = \frac{9,55 \cdot c \cdot \Phi \cdot I_{a, \text{ГП, доп}} + M_0}{M_{\text{МТАД}} \cdot \eta_p} = \frac{\frac{30}{\pi} \cdot c \cdot \Phi \cdot I_{a, \text{ГП, доп}} + M_0}{M_{\text{МТАД}} \cdot \eta_p}. \quad (2)$$

Определять $u_{p(I)}$ предлагается для номинального тока, чтобы обеспечить работу НУ в режиме S1 по [5]. Чтобы не были превышены значения ЭДС и тока, должно выполняться условие:

$$u_{p(E, \text{max})} \leq u_p \leq u_{p(I)}.$$

Если $u_{p(I)} < u_{p(E, \text{max})}$, то принимается $u_{p(I)} = u_{p(E, \text{max})}$. При этом будет превышено значение тока, соответствующего $u_{p(I)}$. В таком случае для $u_p = u_{p(E, \text{max})}$ выполняется расчет тока $I_{a, \text{ГП}}$ по формуле [2, (4)], либо рассчитывается $u_{p(I, \text{max})}$ для максимально допустимого тока $I_{a, \text{max}}$ для НУ, при котором он может работать в кратковременном режиме. Если значение тока $I_{a, \text{ГП}}$ будет настолько высоким, что двигатель не сможет работать даже в кратковременном режиме, либо будет $u_{p(I, \text{max})} < u_{p(E, \text{max})}$, то мощность выбранной электрической машины недостаточна для использования её в качестве НУ для МТАД.

В рассматриваемой схеме вся энергия, выработанная генератором НУ, гасится через реостаты. Как видно из таблиц [2], требуется разное значение сопротивления нагрузки $R_{\text{Ц}}$ при одном и том же режиме нагружения МТАД, но разных значениях u_p . Если же допу-

стимый диапазон передаточных отношений ($u_{p(E,\max)} \leq u_p \leq u_{p,l}$ при соблюдении $u_p \leq u_{p(E,\min)}$) достаточно широк, можно выбрать u_p таким, чтобы получить значение $R_{Ц}$ в определенных пределах. Чем меньше диапазон $R_{Ц}$ – тем меньше требуется резисторов, а значит, установка будет проще и дешевле.

В формулу [2, (7)] для определения сопротивления $R_{Ц}$ подставим формулы [2, (3)] и [2, (8)]:

$$R_{Ц} = \frac{9,55 \cdot (c \cdot \Phi)^2 \cdot n_{2,МТАД}}{u_p \cdot (M_{МТАД} \cdot u_p \cdot \eta_p - M_0)} - \sum r. \quad (3)$$

Формулу (3) преобразуем в квадратное уравнение для определения u_p :

$$M_{МТАД} \cdot \eta_p \cdot (R_{Ц} + \sum r) \cdot u_p^2 - M_0 \cdot (R_{Ц} + \sum r) \cdot u_p - 9,55 \cdot (c \cdot \Phi)^2 \cdot n_{2,МТАД} = 0,$$

откуда значение u_p :

$$u_{p(r)} = \frac{R_{Ц} \pm \sqrt{(R_{Ц} M_0)^2 + 4 R_{Ц} M_{МТАД} \eta_p (1 + \sum r) (9,55 (c \Phi)^2 n_{2,МТАД} - M_0 \sum r)}}{2 R_{Ц} M_{МТАД} \eta_p}.$$

Если пренебречь M_0 , то уравнение переписется в виде:

$$M_{МТАД} \cdot \eta_p \cdot (R_{Ц} + \sum r) \cdot u_p^2 - 9,55 \cdot (c \cdot \Phi)^2 \cdot n_{2,МТАД} = 0,$$

откуда:

$$u_{p(R)} \approx c \cdot \Phi \cdot \sqrt{\frac{9,55 \cdot n_{2,МТАД}}{M_{МТАД} \cdot \eta_p \cdot (R_{Ц} + \sum r)}}. \quad (4)$$

Если пренебречь M_0 и $\sum r$, то

$$u_{p(R)} \approx c \cdot \Phi \cdot \sqrt{(9,55 \cdot n_{2,MTAD}) / (M_{MTAD} \cdot \eta_p \cdot R_{\Pi})}.$$

M_0 – это момент, который развивает генератор при отсутствии нагрузки на валу. Чем больше момент генератора, нагружающий МТАД – тем меньше влияет учет M_0 на точность. Поэтому можно обеспечить расчет с достаточной точностью при пренебрежении M_0 . В [6] при расчете момента электрической машины значением M_0 и вовсе предлагается пренебречь.

При пренебрежении сопротивлением Σr всех обмоток генератора, включённых последовательно в цепь якоря генератора, погрешность будет тем больше, чем меньше значение R_{Π} , поэтому при значениях R_{Π} , близких к Σr , ошибка будет существенной и не учитывать Σr будет нельзя.

Таким образом, можно рассчитать диапазон значений $u_{p(R)}$, задавая значения R_{Π} от 0 (при этом $R_{\Pi} + \Sigma r = \Sigma r$; обозначим такое u_p как $u_{p(R=0)}$) до некоторого желаемого предельного значения R_{Π} (обозначим такое u_p как $u_{p(R,max)}$):

$$u_{p(R,max)} \leq u_{p,R} \leq u_{p(R=0)}$$

Работа при $u_p > u_{p(R=0)}$ невозможна, поскольку значение $R_{\Pi} + \Sigma r$ не может быть меньше Σr .

Работа при $u_p < u_{p(R,max)}$ возможна, но потребуются большее значение сопротивления R_{Π} , чем то, при котором было определено значение $u_{p(R,max)}$.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА

1. Задается частота напряжения f_1 для МТАД.
2. Определяется момент МТАД M_{MTAD} и обороты МТАД $n_{2,MTAD}$.
3. Рассчитываются значения $u_{p(E,max)}$ и $u_{p(E,min)}$ по формуле (1).
4. Рассчитывается $u_{p(I)}$ по формуле (2).
5. Если $u_{p(I)} = u_{p(E,max)}$, то принимается $u_p = u_{p(I)} = u_{p(E,max)}$.

Если $u_{p(I)} < u_{p(E,max)}$, то принимается $u_p = u_{p(E,max)}$ и при $u_p = u_{p(E,max)}$ определяется ток. Если при $u_p = u_{p(E,max)}$ ток превысит допустимое значение для работы в кратковременном режиме, то выполнять опыт для данных значений f_1 , $n_{2,MTAD}$ и M_{MTAD} невозможно.

Для случая $u_{p(I)} > u_{p(E,max)}$ диапазон передаточных отношений u_p :

$$u_{p(E,max)} \leq u_p \leq \min(u_{p(E,min)}, u_{p(I)}).$$

6. Выполняется расчет $u_{p(R,max)}$ и $u_{p(R=0)}$ по формуле (4).

7. В случае $u_{p(R=0)} < u_{p(E,max)}$ выполнить опыт при заданных значениях f_1 , $n_{2,MTAD}$ и M_{MTAD} невозможно.

При $u_{p(R=0)} = u_{p(E,max)}$ принимается $u_p = u_{p(R=0)} = u_{p(E,max)}$.

В случае $u_{p(R,max)} \geq \min(u_{p(E,min)}, u_{p(I)})$ выбирается $u_{p(R,max)} = \min(u_{p(E,min)}, u_{p(I)})$. Если $u_{p(R,max)} > \min(u_{p(E,min)}, u_{p(I)})$, то потребуется большее значение сопротивления, чем то, для которого определяли $u_{p(R,max)}$.

Если $u_{p(E,max)} < u_{p(R=0)} < \min(u_{p(E,min)}, u_{p(I)})$, то выбирается u_p из диапазона:

$$\max(u_{p(R,max)}, u_{p(E,max)}) \leq u_p \leq \min(u_{p(E,min)}, u_{p(I)}, u_{p(R=0)}).$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика и получены зависимости (1), (2), (4) для определения передаточного отношения u_p между МТАД и НУ, обеспечивающего требуемый момент МТАД M_{MTAD} и обороты вала МТАД $n_{2,MTAD}$ для заданной частоты напряжения f_1 при условии, что значения параметров НУ (ЭДС $E_{ГП}$, ток $I_{a,ГП}$, сопротивление нагрузки $R_{ГП}$) будут находиться в допустимых пределах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жданович, Ч. И. Обоснование параметров физической модели электромеханической трансмиссии трактора / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // Актуальные вопросы машиностроения: сб. научн. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С. Н. Поддубко [и др.]. – Минск, 2023. – Вып. 12. – С. 121–126.

2. Жданович, Ч. И. Определение параметров нагрузочного устройства физической модели трактора с электромеханической трансмиссией / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // Научные решения проблем развития тракторной техники, многоцелевых колесных и гусеничных машин, электрического транспорта : сборник научных

трудов научно-практической конференции, посвященной 70-летию кафедры «Тракторы», 22–23 января 2024 / редкол.: В. П. Бойков (отв. ред.), Ч. И. Жданович, А. С. Поварехо ; сост.: В. П. Бойков, Ч. И. Жданович, А. С. Поварехо. – Минск : БНТУ, 2024. – С. 37-53.

3. Трехфазные двигатели серии АИР : [сайт]. – URL: <https://www.mez.by/catalog/asinkhronnye-dvigateli-serii-air-aire/trekhfaznye-dvigateli-serii-air/> (дата обращения: 16.01.2024).

4. Электродвигатель 4ПБМ160МГ 8 кВт 3070/4000 об. 220/110В IM3001 : [сайт]. – URL: https://energo1.com/catalog/elektrodvigateli_postoyannogo_toka/elektrodvigateli_postoyannogo_toka_serii_4p/elektrodvigateli_serii_4pbm/14703/ (дата обращения: 18.01.2024).

5. Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики: ГОСТ ИЕС 60034-1-2014. – Взамен ГОСТ МЭК 60034-1-2007; введ. 01.05.2017. – Минск : Госстандарт. – 58 с.

6. Сыромятников, И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И. А. Сыромятников; под ред. Л. Г. Мамиконянца. – 4-е изд. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

Представлено 25.06.2024