

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.**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,

**Калинин Н. В.**<sup>2</sup>, ст. науч. сотр.,

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,  
г. Минск, Республика Беларусь

Ch. Zhdanovich<sup>1</sup>, Ph. D. in Eng., Ass. Prof.,

N. Kalinin<sup>2</sup>, Senior Researcher,

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Joint 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;  $\Phi$  – 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)]:

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

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

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

откуда значение  $u_p$ :

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

Если пренебречь  $M_0$ , то уравнение переписется в виде:

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

откуда:

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

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  $\Sigma r$  всех обмоток генератора, включённых последовательно в цепь якоря генератора, погрешность будет тем больше, чем меньше значение  $R_{\Pi}$ , поэтому при значениях  $R_{\Pi}$ , близких к  $\Sigma r$ , ошибка будет существенной и не учитывать  $\Sigma r$  будет нельзя.

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

Работа при  $u_p < u_{p(R,max)}$  возможна, но потребуется большее значение сопротивления  $R_{\Pi}$ , 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  $f_1$ ,  $n_{2,\text{МТАД}}$  и  $M_{\text{МТАД}}$  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  $M_{\text{МТАД}}$  и обороты вала МТАД  $n_{2,\text{МТАД}}$  для заданной частоты напряжения  $f_1$  при условии, что значения параметров НУ (ЭДС  $E_{\text{ГП}}$ , ток  $I_{a,\text{ГП}}$ , сопротивление нагрузки  $R_{\text{ГП}}$ ) 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. науч. 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/](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