

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В МАТЛАВ ДВИГАТЕЛЬНОГО И ГЕНЕРАТОРНОГО РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ МАШИН ПРИ ЧАСТОТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ В СТЕНДАХ ОБКАТКИ И ИСПЫТАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ

М.А. Прищепов, докт. техн. наук, доцент, В.В. Гурин, канд. техн. наук, доцент,  
В.В. Смоленчук, аспирант (БГАТУ)

### Аннотация

*В статье предложена конструкция стенда обкатки и испытания механических передач с частотно-регулируемым асинхронным приводом, обеспечивающим рекуперацию электрической энергии от тормозной машины к приводной. Проведено математическое моделирование двигательного и генераторного режимов работы асинхронных машин предложенного стенда при частотном регулировании, позволившее определить величину рекуперации электрической энергии от тормозной машины к приводной.*

*The article considers the construction of the stand of rolling and tests of mechanical transmissions with anisochronous driving gear that provides recuperation of electrical power from a braking machine till driving. Mathematical modeling of motive and generative regimes of work of anisochronous machines of offered stand has been carried out. It has allowed defining the size of the recuperation of power from a braking machine till driving.*

### Введение

Обкатка и испытание – завершающие операции в технологическом процессе изготовления и ремонта механических передач, во многом определяющие долговечность и качество их работы при последующей эксплуатации. В реальном производстве известно широкое применение стендов для обкатки и испытания передач с использованием рекуперации электрической энергии от тормозной асинхронной машины с короткозамкнутым ротором к приводной машине постоянного тока, подключенной к сети переменного тока через регулятор напряжения и соединенный с его выходом выпрямитель [1, 2].

Основными недостатками указанных стендов являются:

- наличие дорогой приводной машины постоянного тока, имеющей невысокую надежность;
- возможность обкатки механической передачи под нагрузкой в узком диапазоне скоростей, находящемся выше синхронной частоты вращения магнитного поля статора асинхронной машины;
- невозможность имитации режима торможения транспортного средства двигателем при обкатке и испытаниях коробок передач.

В Белорусском государственном аграрном техническом университете разработана конструкция частотно-регулируемого асинхронного привода стенда для обкатки и испытания передач с рекуперацией электрической энергии, исключающая указанные недостатки [3].

Целью данной работы является математическое моделирование режимов работы приводной и тормозной машины предложенного стенда.

### Основная часть

В разработанном стенде (рис. 1, 2) предложено использование в качестве приводной и тормозной машин наиболее надежных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Стенд содержит станину (на рис. не показана) с установленной на ней испытываемой передачей 1, кинематически соединенной с дополнительной аналогичной передачей 2, при этом выходные валы испытываемой 1 и дополнительной 2 передач соединены вместе. К входному валу дополнительной передачи присоединен тормозной асинхронный двигатель 3, а к входному валу испытываемой передачи – приводной асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором 4, статорная обмотка которого через дроссель 5 и преобразователь частоты 6 подключена к питающей сети 7. Тормозной асинхронный двигатель 3 выполнен с короткозамкнутым ротором, а статорная обмотка тормозного двигателя через токоподводящие щетки 8 и контактные кольца 9, закрепленные соосно валу 10 на изоляционной втулке 11 одного из подшипниковых щитов 12, подключена к выходу преобразователя частоты 6 приводного двигателя 4 после дросселя 5. Корпус статора 13 тормозного двигателя 3 выполнен вращающимся на подшипниках 14. Он вращается в направлении, противоположном вращению ротора, вспомогательным электродвигателем 15 через самотормозящую механическую передачу. Тормозной электродвигатель установлен в подшипниковых опорах 16, жестко закрепленных на станине стенда. Самотормозящая механическая передача выполнена червячной, при этом червячное колесо 17 закреплено соосно валу 10 тормозного двигателя 3 на другом из его

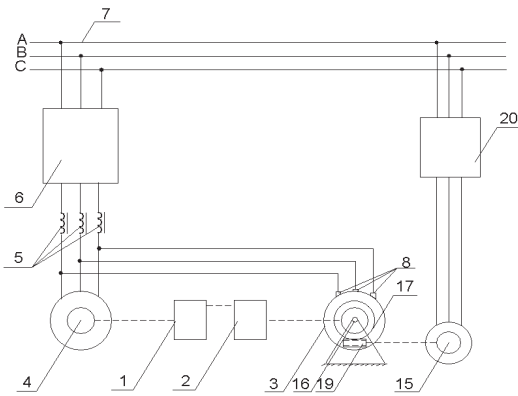


Рисунок 1. Схема стенда для обкатки и испытания механических передач

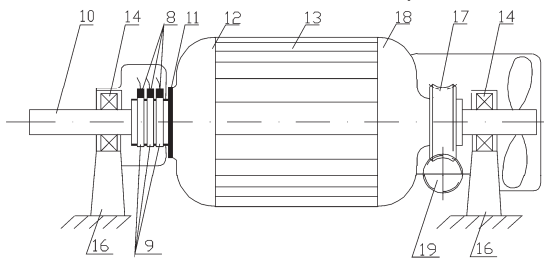


Рисунок 2. Конструкция предлагаемого тормозного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

подшипниковых щитов 18, а червяк 19 кинематически соединен с валом вспомогательного электродвигателя 15, жестко закрепленного на станине стенда и подключенного к сети 7 через регулятор частоты вращения 20. В качестве приводного 4 и тормозного 3 асинхронных двигателей используют двигатели с одинаковой номинальной частотой вращения.

Работает стенд следующим образом. Напряжение от трехфазной сети 7 переменного тока через преобразователь частоты 6 и дроссель 5 подается на статорные обмотки как приводного 4, так и тормозного 3 асинхронных двигателей, которые кинематически соединены с ведущими валами соответственно испытываемой передачи 1 и дополнительной передачи 2. Так как суммарное передаточное отношение встречно-последовательно соединенных обкатываемой 1 и дополнительной 2 передач равно единице, то скорость вращения приводного 4 и тормозного 3 двигателей одна и та же и определяется частотой питающего напряжения на выходе частотного преобразователя 6. Испытываемая передача 1 работает в этом случае на холостом ходу.

Для испытания передачи 1 под нагрузкой через регулятор частоты вращения 20 подключается к трехфазной сети 7 вспомогательный двигатель 15, вал которого кинематически соединен с червяком 19 и червячным колесом 17, приводя во вращение статор 13 тормозного двигателя 3 в направлении, противоположном направлению вращения его ротора. Тем самым изменяется скольжение ротора тормозного электродвигателя. Оно определяется по формуле:

$$s = \frac{(\omega_0 - \omega_{cm}) - \omega}{(\omega_0 - \omega_{cm})}, \quad (1)$$

где  $\omega_0$  – синхронная скорость вращения электромагнитного поля асинхронного двигателя, рад/с;

$\omega_{cm}$  – скорость вращения статора тормозного двигателя в сторону, противоположную вращению ротора, рад/с;

$\omega$  – скорость вращения ротора асинхронного двигателя, рад/с.

При неподвижном статоре тормозного электродвигателя  $\omega_{cm} = 0$ , имеем известную формулу скольжения асинхронного двигателя:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}. \quad (2)$$

При вращении статора со скоростью  $\omega_{cm} = \omega_0 - \omega$  скольжение тормозного электродвигателя станет равным нулю. Это значит, что тормозной электродвигатель перешел в режим идеального холостого хода.

При дальнейшем увеличении скорости вращения статора тормозного двигателя скольжение станет отрицательным, и тормозной электродвигатель перейдет в режим генератора с рекуперацией электрической энергии к обмоткам статора приводного электродвигателя. Таким образом, изменяя скорость вращения статора тормозного электродвигателя, можно изменить тормозной момент на валу передачи 1.

Изменение режимов нагружения передачи 1, т.е. угловой скорости вращения и тормозного момента, осуществляют соответственно преобразователем частоты 6 и регулятором 20 вспомогательного двигателя 15. При этом угловая скорость статора 13 тормозного электродвигателя должна изменяться в небольших пределах для обеспечения номинального тормозного момента:

$$\omega_{cm} = 2 \cdot \omega_0 \cdot s_n, \quad (3)$$

где  $s_n$  – номинальное скольжение тормозного электродвигателя, о.е.

Номинальная мощность вспомогательного электродвигателя 15 зависит от диапазона изменения скорости  $\omega_{cm}$  и развиваемого тормозного момента:

$$P_{всп} = \frac{M_n \cdot \omega_{cm}}{\eta_{пер}} = \frac{M_n \cdot 2 \cdot \omega_0 \cdot s_n}{\eta_{пер}} = \frac{2 \cdot P_n \cdot s_n}{\eta_{пер}}, \quad (4)$$

где  $M_n$  – номинальный момент тормозного электродвигателя, Н·м;

$\eta_{пер}$  – КПД передачи вспомогательного электродвигателя, о.е.;

$P_n$  – номинальная мощность тормозного электродвигателя, Вт.

С увеличением мощности асинхронных двигателей их номинальное скольжение уменьшается (до 0,04...0,02), следовательно, вспомогательный электродвигатель должен иметь небольшую мощность.

При аналогичном вращении статора 13 тормозного двигателя 3 в направлении вращения его ротора процесс нагружения передачи 1 изменится на обратный. Приводным станет двигатель 3, а тормозным – двигатель 4 и соответственно изменится направление рекуперации электрической энергии.

При уменьшении частоты тока преобразователя  $\omega_0$  уменьшится синхронная скорость электромагнитного поля  $\omega_0$  приводного и тормозного электродвигателей, но диапазон изменения момента (до  $M_n$ ) не изменится. Следовательно, не изменится и величина скольжения электродвигателя  $S_n$  в тормозном режиме. Однако диапазон изменения скорости вспомогательного электродвигателя уменьшится, поскольку уменьшилось значение  $\omega_0$  (формула 3). Требуемая для привода статора 13 мощность вспомогательного электродвигателя 15 также уменьшится (формула 4). Наибольшая мощность на валу вспомогательного электродвигателя 15 соответствует частоте 50 гц на приводном электродвигателе.

Таким образом, предлагаемый стенд позволяет осуществлять нагружение передачи в широком диапазоне частот вращения, использовать тормозной двигатель в качестве приводного, и наоборот, обеспечивать рекуперацию электрической энергии непосредственно от тормозного двигателя, работающего в генераторном режиме, к приводному, что в свою очередь обеспечивает возможность использования маломощного преобразователя частоты 6 и минимальные потери энергии при обкатке передачи 1 под нагрузкой.

Дифференциальные уравнения, описывающие электромеханические процессы, происходящие в асинхронном двигателе, в системе координат  $x, y$  согласно [4], имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} U_{1x} &= R_1 \cdot i_{1x} + \frac{d\Psi_{1x}}{dt} - \omega_0 \cdot \Psi_{1y}; \\ U_{1y} &= R_1 \cdot i_{1y} + \frac{d\Psi_{1y}}{dt} + \omega_0 \cdot \Psi_{1x}; \\ 0 &= R_2 \cdot i_{2x} + \frac{d\Psi_{2x}}{dt} - (\omega_0 - \omega) \cdot \Psi_{2y}; \\ 0 &= R_2 \cdot i_{2y} + \frac{d\Psi_{2y}}{dt} + (\omega_0 - \omega) \cdot \Psi_{2x}; \\ M &= (i_{1y} \cdot i_{2x} - i_{1x} \cdot i_{2y}) \cdot p_n \cdot L_{12} = \\ &= (i_{1y} \cdot i_{2x} - i_{1x} \cdot i_{2y}) \cdot K_m \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где  $R_1, R_2$  – сопротивление обмотки статора и ротора асинхронного двигателя, Ом;

$U_{1x}, U_{1y}$  – проекции векторов напряжения статора и ротора двигателя на оси  $x$  и  $y$ , В;

$i_{1x}, i_{1y}, i_{2x}, i_{2y}$  – проекции векторов тока статора и ротора двигателя на оси  $x$  и  $y$ , А;

$\Psi_{1x}, \Psi_{1y}, \Psi_{2x}, \Psi_{2y}$  – проекции векторов потокосцеплений статора и ротора двигателя на оси  $x$  и  $y$ , Вб;

$K_m = p_n \cdot L_{12}$  – коэффициент момента, Гн;

$p_n$  – число пар полюсов электродвигателя;

$L_{12}$  – сопротивление взаимной индукции обмотки статора и ротора асинхронного двигателя, Гн.

Запишем выражения потокосцеплений асинхронного двигателя через индуктивности обмоток статора, ротора и проекции векторов тока:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{1x} &= L_1 i_{1x} + L_{12} i_{2x}; \\ \Psi_{1y} &= L_1 i_{1y} + L_{12} i_{2y}; \\ \Psi_{2x} &= L_2 i_{2x} + L_{12} i_{1x}; \\ \Psi_{2y} &= L_2 i_{2y} + L_{12} i_{1y}. \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где  $L_1, L_2$  – индуктивное сопротивление обмотки статора и приведенное индуктивное сопротивление обмотки ротора асинхронного двигателя, Гн.

Из системы уравнений (6) выразим проекции векторов тока через потокосцепления:

$$\left. \begin{aligned} i_{1x} &= \Psi_{1x} \frac{L_2}{L_1 L_2 - L_{12}^2} - \Psi_{2x} \frac{L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} = \\ &= \Psi_{1x} K_2 - \Psi_{2x} K_{12}; \\ i_{1y} &= \Psi_{1y} \frac{L_2}{L_1 L_2 - L_{12}^2} - \Psi_{2y} \frac{L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} = \\ &= \Psi_{1y} K_2 - \Psi_{2y} K_{12}; \\ i_{2x} &= \Psi_{2x} \frac{L_1}{L_1 L_2 - L_{12}^2} - \Psi_{2y} \frac{L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} = \\ &= \Psi_{2x} K_1 - \Psi_{2y} K_{12}; \\ i_{2y} &= \Psi_{2y} \frac{L_1}{L_1 L_2 - L_{12}^2} - \Psi_{2x} \frac{L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} = \\ &= \Psi_{2y} K_1 - \Psi_{2x} K_{12} \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где коэффициенты  $K_1, K_2, K_{12}$  соответственно равны

$$K_1 = \frac{L_2}{L_1 L_2 - L_{12}^2};$$

$$K_2 = \frac{L_2}{L_1 L_2 - L_{12}^2};$$

$$K_{12} = \frac{L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2}.$$

Основное уравнение движения электропривода имеет вид

$$M - M_{cm} = J_{np} \frac{d\omega}{dt}, \quad (8)$$

где  $M$  – момент, развиваемый электродвигателем, Н·м;

$M_{cm}$  – статический момент сопротивления на валу электродвигателя, Н·м;

$J_{np}$  – приведенный момент инерции электродвигателя, кг·м<sup>2</sup>.

Разрешив основное уравнение движения электропривода (8) относительно частоты вращения рото-

ра и уравнения равновесия напряжений (5) и (6) относительно потокоцеплений, и переходя к операторному описанию, получим систему уравнений асинхронного двигателя в системе координат x-y:

$$\left. \begin{aligned} \overline{\omega} &= \frac{1}{p} \cdot \left( \frac{\overline{M} - \overline{M}_{cm}}{J} \right) \\ \overline{\Psi}_{1x} &= \frac{1}{p} (\overline{U}_{1x} - R_1 \overline{i}_{1x} + \omega_0 \overline{\Psi}_{1y}); \\ \overline{\Psi}_{1y} &= \frac{1}{p} (\overline{U}_{1y} - R_1 \overline{i}_{1y} - \omega_0 \overline{\Psi}_{1x}); \\ \overline{\Psi}_{2x} &= \frac{1}{p} (-R_2 \overline{i}_{2x} + (\omega_0 - \omega) \cdot \overline{\Psi}_{2y}); \\ \overline{\Psi}_{2y} &= \frac{1}{p} (-R_2 \overline{i}_{2y} - (\omega_0 - \omega) \cdot \overline{\Psi}_{2x}); \\ \overline{i}_{1x} &= \overline{\Psi}_{1x} K_2 - \overline{\Psi}_{2x} K_{12}; \\ \overline{i}_{1y} &= \overline{\Psi}_{1y} K_2 - \overline{\Psi}_{2y} K_{12}; \\ \overline{i}_{2x} &= \overline{\Psi}_{2x} K_1 - \overline{\Psi}_{1x} K_{12}; \\ \overline{i}_{2y} &= \overline{\Psi}_{2y} K_1 - \overline{\Psi}_{1y} K_{12}; \\ \overline{M} &= (\overline{i}_{1y} \cdot \overline{i}_{2x} - \overline{i}_{1x} \cdot \overline{i}_{2y}) \cdot K_m \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

На рис. 3 представлена структурная схема асинхронного двигателя в осях x-y, составленная по уравнениям (9).

Далее структурная схема будет использована при построении имитационных моделей подсистем «Приводной АД», «Тормозной АД» и «Вспомогательный АД».

Для моделирования режимов работы асинхрон-

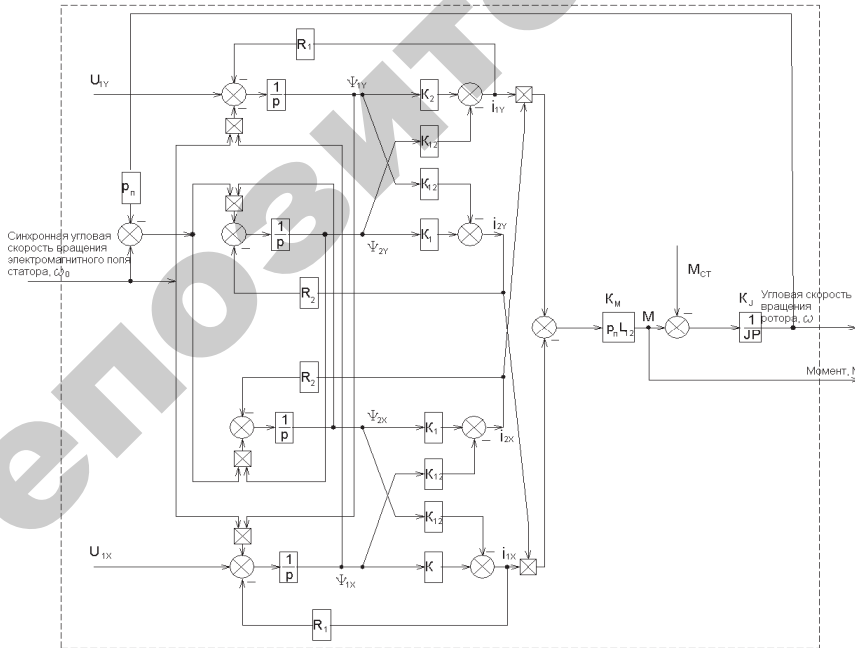


Рисунок 3. Структурная схема асинхронного двигателя в осях x-y

ных машин необходимо вычислить их параметры по следующим общеизвестным выражениям [5]:

Критическое скольжение [5]:

$$s_{кр.} = s_n \cdot (m_{max} + \sqrt{m_{max}^2 - 1}), \quad (10)$$

где  $m_{max}$  – кратность максимального момента электродвигателя, о.е.

Угловая скорость вращения электромагнитного поля статора:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p_n}, \text{ рад/с}, \quad (11)$$

где  $f$  – частота тока преобразователя, Гц.

Номинальная угловая частота вращения ротора:

$$\omega_n = \omega_0 \cdot (1 - s_n), \text{ рад/с} \quad (12)$$

Номинальный момент электродвигателя:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}, \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (13)$$

Максимальный момент электродвигателя:

$$M_{max} = m_{max} \cdot M_n, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (14)$$

где пусковой момент:

$$M_n = m_n \cdot M_n, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (15)$$

где  $m_n$  – кратность пускового момента электродвигателя, о.е.

Механические потери принимаются равными

$$\Delta P_{мех} = 0,02 \cdot P_n, \text{ Вт}. \quad (16)$$

Коэффициент приведения С в первом приближении равным  $C=1,02$ .

Приведенное активное сопротивление обмотки ротора [5]:

$$R_2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_n + \Delta P_{мех}}{I_n^2 \cdot \frac{1 - s_n}{s_n}}, \text{ Ом}, \quad (17)$$

где  $I_n$  – номинальный ток электродвигателя, А.

Активное сопротивление обмотки статора [5]:

$$R_1 = \frac{U \cdot \cos \varphi \cdot (1 - \eta)}{I_n} - C^2 \cdot R_2 - \frac{\Delta P_{мех}}{3 \cdot I_n^2}, \text{ Ом}, \quad (18)$$

где  $U$  – напряжение питания электродвигателя, В;

$\cos \varphi$  – коэффициент мощности электродвигателя;

$\eta$  – коэффициент полезного действия электродвигателя;

$C$  – коэффициент приведения.

Приведенная индуктивность рассеяния обмоток статора и ротора:

$$L_{1p} = L_{2p} = \frac{U}{4 \cdot \pi \cdot f \cdot (1 + C^2) \cdot k_i \cdot I_n}, \text{ Гн, (19)}$$

где  $k_i$  – кратность пускового тока электродвигателя.  
Индуктивность обмоток статора и ротора [5]:

$$L_1 = L_2 = \frac{U}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_H \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} - \frac{2}{3} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot M_{\max}}{p_n \cdot U} \cdot \frac{s_H}{s_{кр}}}, \text{ Гн, (20)}$$

Индуктивность цепи намагничивания:

$$L_{12} = L_1 - L_{1p}, \text{ Гн (21)}$$

По окончании расчета определяется коэффициент приведения  $C_1$  и сравнивается с ранее принятым  $C=1,02$

$$C_1 = 1 + \frac{L_{1p}}{L_{12}}.$$

При необходимости расчет следует повторить, изменив значение  $C$ , добиваясь минимальной разницы между  $C$  и  $C_1$ .

Полученная система уравнений (9) справедлива как для приводного асинхронного двигателя, так и для вспомогательного. Для тормозного двигателя в третье и четвертое уравнения системы (9) необходимо ввести величину угловой скорости вращения статора тормозного двигателя  $\omega_{cm}$ . В результате система уравнений для тормозного асинхронного двигателя в системе координат x-y примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \frac{1}{p} \cdot \left( \frac{\overline{M} - \overline{M}_{cm}}{J_{mp}} \right) \\ \overline{\Psi}_{1x} &= \frac{1}{p} (\overline{U}_{1x} - R_1 \overline{i}_{1x} + \omega_0 \overline{\Psi}_{1y}); \\ \overline{\Psi}_{1y} &= \frac{1}{p} (\overline{U}_{1y} - R_1 \overline{i}_{1y} - \omega_0 \overline{\Psi}_{1x}); \\ \overline{\Psi}_{2x} &= \frac{1}{p} (-R_2 \overline{i}_{2x} + (\omega_0 - \omega_{cm} - \omega) \overline{\Psi}_{2y}); \\ \overline{\Psi}_{2y} &= \frac{1}{p} (-R_2 \overline{i}_{2y} - (\omega_0 - \omega_{cm} - \omega) \overline{\Psi}_{2x}); \\ \overline{i}_{1x} &= \overline{\Psi}_{1x} K_2 - \overline{\Psi}_{2x} K_{12}; \\ \overline{i}_{1y} &= \overline{\Psi}_{1y} K_2 - \overline{\Psi}_{2y} K_{12}; \\ \overline{i}_{2x} &= \overline{\Psi}_{2x} K_1 - \overline{\Psi}_{1x} K_{12}; \\ \overline{i}_{2y} &= \overline{\Psi}_{2y} K_1 - \overline{\Psi}_{1y} K_{12}; \\ \overline{M} &= (\overline{i}_{1y} \cdot \overline{i}_{2x} - \overline{i}_{1x} \cdot \overline{i}_{2y}) \cdot K_M \end{aligned} \right\} (22)$$

Статический момент, действующий на тормозной электродвигатель:

$$M_{cm, \text{торм.}} = \frac{2 \cdot M_{кр} \cdot (1 + a \cdot s_{кр})}{s_{кр} / s + s / s_{кр} + 2 \cdot a \cdot s_{кр}}, \text{ Н} \cdot \text{м, (23)}$$

где

$$a = \frac{R_1}{R_2}.$$

Статический момент, действующий на приводной электродвигатель, равен сумме моментов действующего на тормозной электродвигатель и момента потерь  $M_{\text{пот.}}$  в передачах:

$$M_{cm, \text{пр.}} = -M_{cm, \text{торм.}} + M_{\text{пот.}}, \text{ Н} \cdot \text{м. (24)}$$

После вычисления параметров асинхронных двигателей будет произведено моделирование обкаточного стенда с помощью программного обеспечения MATLAB в пакете SIMULINK.

Тогда имитационная модель обкаточного стенда будет иметь вид, представленный на рис. 4.

Далее на рис. 5-8 представлены подсистемы, входящие в состав имитационной модели обкаточного стенда.

По разработанной имитационной модели было произведено моделирование во времени характеристик приводного и тормозного асинхронных двигателей экспериментального обкаточного стенда.

На рис. 9-14 представлены графики изменения во времени задающей частоты питающего напряжения, частоты вращения роторов и изменения мощности соответственно приводного, тормозного и вспомогательного электродвигателей.

Из графиков (рис. 11, 13) видно, что при разгоне приводного и тормозного двигателя без нагрузки, частота вращения этих двигателей близка к частоте вращения холостого хода и равна 156 рад/с, а потребляемая мощность – 380Вт каждым из электродвигателей, обусловленная наличием механических и электрических потерь. В момент времени  $t=4$ с начинает вращаться вспомогательный двигатель, а соответственно и статор тормозного двигателя, что приводит к работе тормозного двигателя в генераторном режиме. При задающей частоте напряжения питания вспомогательного двигателя 17Гц, приводной электродвигатель выходит на работу с номинальной мощностью 4000Вт и с частотой вращения ротора приводного и тормозного двигателей равной 146 рад/с. При этом тормозной электродвигатель работает в генераторном режиме с рекуперацией энергии на приводной двигатель, и, как видно из рис. 12, рекуперлируемая мощность равна 3500Вт. Потребляемая мощность вспомогательного двигателя равна 150Вт (рис. 14). При полном останове вспомогательного двигателя (момент времени  $t=8$ с) мощность, потребляемая приводным и тормозным двигателями, становится равной мощности потерь, а частота вращения – частоте вращения холостого хода.

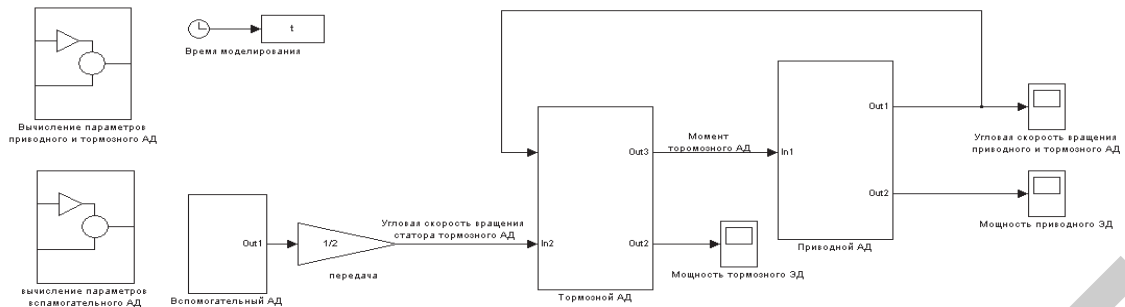


Рисунок 4. Имитационная модель обкаточного стенда

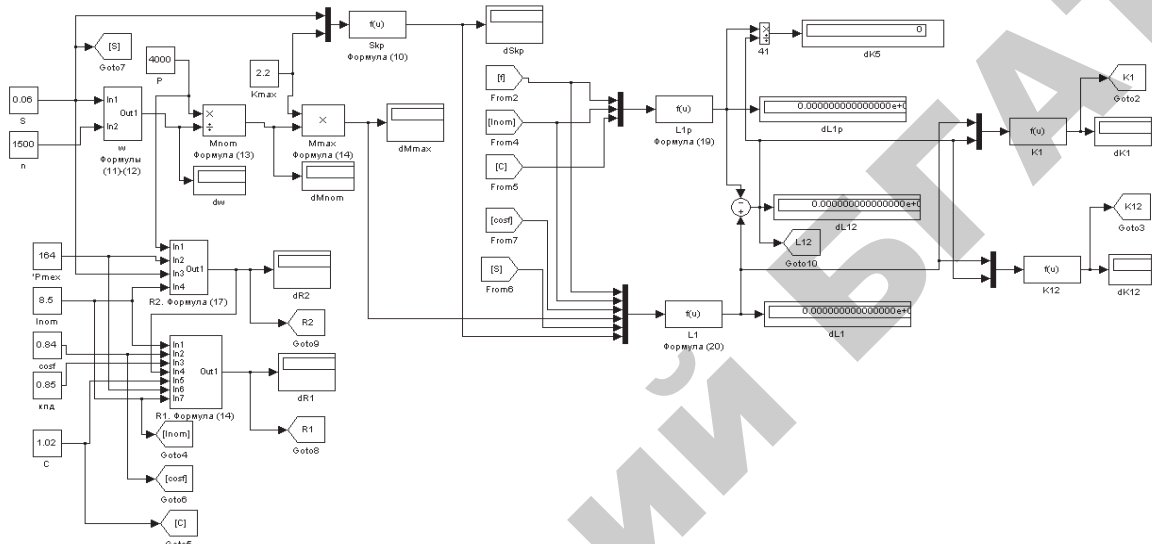


Рисунок 5. Имитационная модель подсистемы «Вычисление параметров приводного и тормозного АД», составленная по уравнениям (10)-(21)

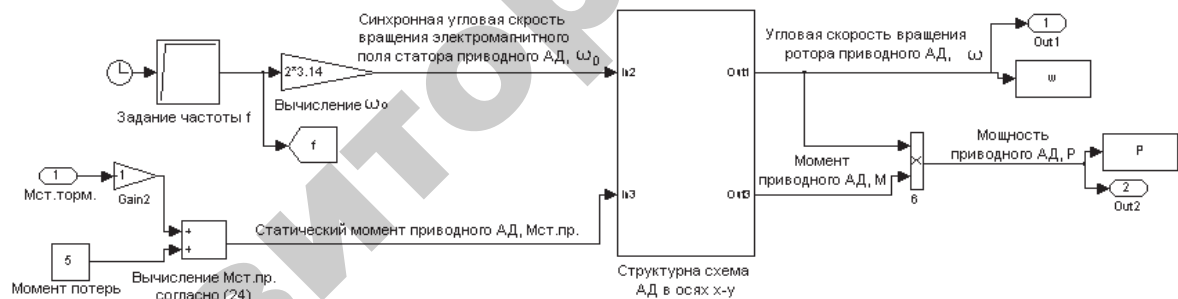


Рисунок 6. Имитационная модель подсистемы «Приводной АД», соответствующая системе уравнений (9) и уравнению (24)

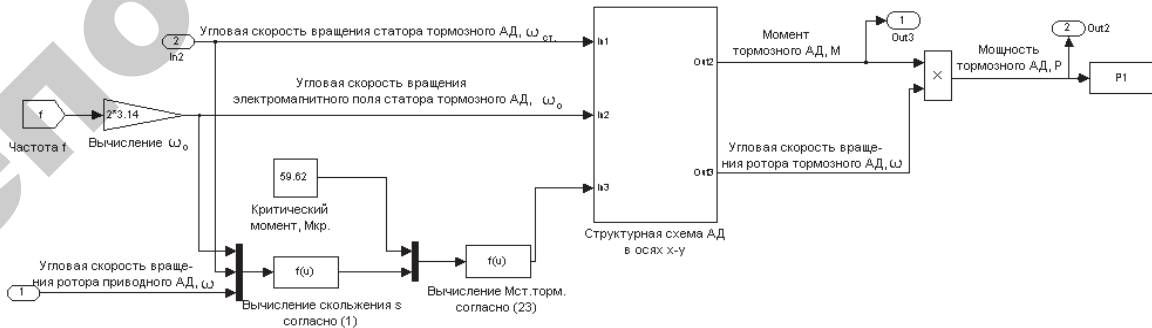


Рисунок 7. Имитационная модель подсистемы «Тормозной АД», соответствующая системе уравнений (22) и уравнениям (1), (23)

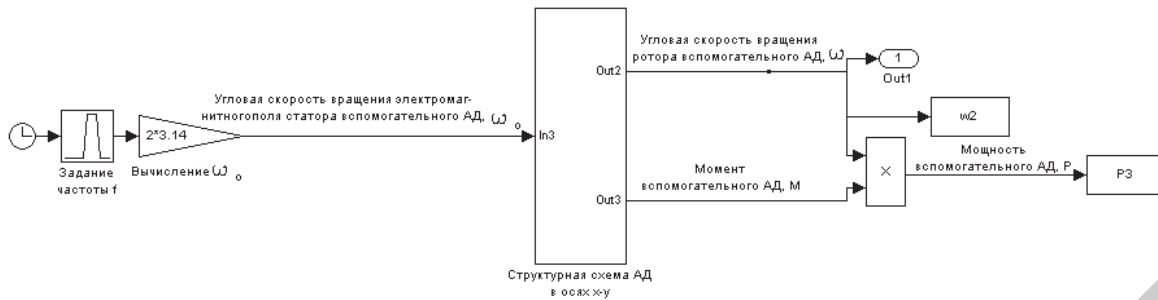


Рисунок 8. Имитационная модель подсистемы «Вспомогательный АД», соответствующая системе уравнений (9)

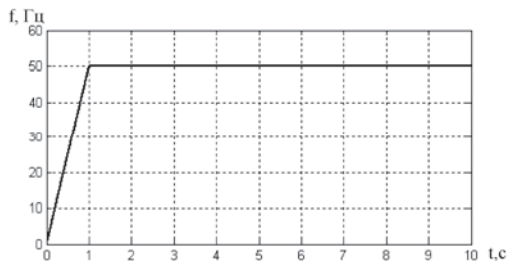


Рисунок 9. График изменения задающей частоты питающего напряжения приводного двигателя

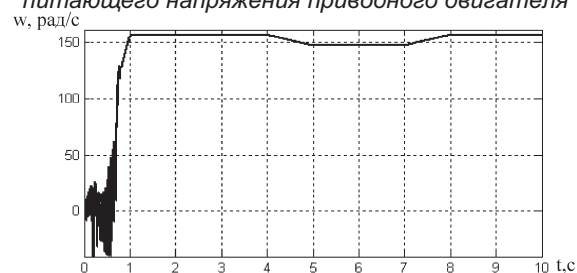


Рисунок 11. График изменения частоты вращения роторов приводного и тормозного двигателей

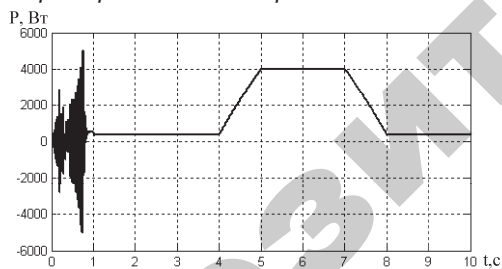


Рисунок 13. График изменения мощности приводного двигателя

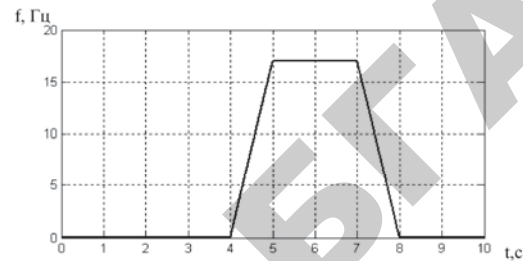


Рисунок 10. График изменения задающей частоты питающего напряжения вспомогательного двигателя

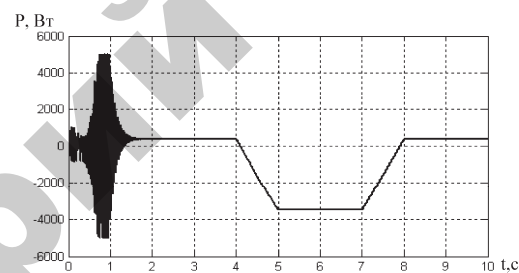


Рисунок 12. График изменения мощности тормозного двигателя

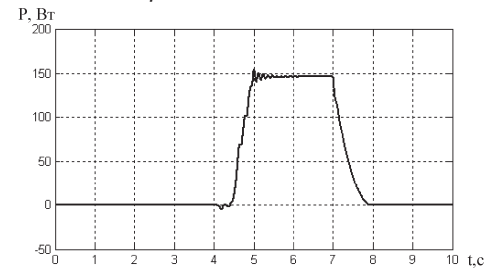


Рисунок 14. График изменения мощности вспомогательного двигателя

Из анализа полученных расчетных данных видно, что величина рекуперированной электроэнергии от тормозного к приводному электродвигателю достигает 80%, что практически совпадает с результатами экспериментальных исследований.

### Выводы

Частотное регулирование в предложенных стендах обкатки механических передач обеспечивает возможность обкатки передач под нагрузкой при различных частотах вращения, обеспечивая при этом

рекуперацию электрической энергии от тормозного асинхронного двигателя к приводному до 80%.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Стенд для испытания передач: а. с. 624132 СССР, G 01 М 13/02; 1977/Л.А. Калинин, П.Т. Шипуль.
2. Способ испытания механических передач в электрическом стенде: а. с. 1525525 СССР, G 01 М 13/02; 1989/ А.И. Школьников, В.П. Караухов.
3. Стенд для обкатки и испытания передач с рекуперацией электрической энергии: пат. ВУ 7667

Респ. Беларусь, G 01 М 13/02; 2012/ М.А. Прищепов, В.В. Гурин, В.В. Смоленчук, Е.М. Прищепова.

4. Фираго, Б.И. Теория электропривода: учеб. пособ./ Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Мн.: ЗАО «Техноперспектива», 2004. – 527 с.

5. Черных, И.В. "SimPowerSystems: моделирование электротехнических устройств и систем в Simulink"/ И.В. Черных [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/simpower>. – Дата доступа: 14.11.2012 г.

УДК 631.371: 621.31

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 06.03.2012

## СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК $Y/Y_N$ СО СПЕЦИАЛЬНЫМ СИММЕТРИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ ( $Y/Y_N$ СУ)

Г.И. Янукович, канд. техн. наук, профессор, И.В. Протосовицкий, канд. техн. наук, доцент, Н.Г. Королевич, канд. эконом. наук, доцент (БГАТУ)

### Аннотация

*Для анализа несимметричных режимов работы трансформаторов с помощью метода симметричных составляющих необходимо построить его схему замещения. В данной статье получены выражения, на основе которых построены схемы замещения трансформатора  $Y/Y_N$ СУ для токов прямой, обратной и нулевой последовательности.*

*It has been stressed in the article that it's essential to have a scheme of substitution for the analysis of dissymmetrical operating regime of transformers with the help of symmetrical components. The expressions have been received on the basis of which the schemes of substitution of the transformer  $Y/Y_N$ СУ for currents of straight, reverse and zero succession are based.*

### Введение

В Белорусском государственном аграрном техническом университете на кафедре электроснабжения была разработана новая схема соединения обмоток трансформатора: «звезда-звезда-нуль с симметрирующим устройством» ( $Y/Y_N$ СУ) [1].

Трансформатор с указанной схемой соединения обмоток содержит обмотки высшего напряжения 1, обмотки низшего напряжения 2 и компенсационную обмотку 3, охватывающую все основные обмотки. Один конец компенсационной обмотки подключен к нейтрали обмоток низшего напряжения, а другой конец выведен наружу (рис. 1).

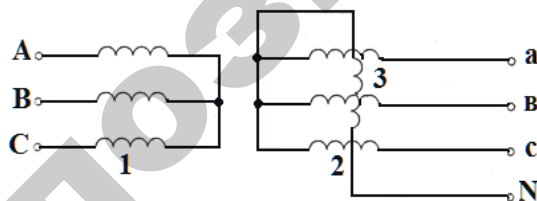


Рисунок 1. Схема соединения обмоток трансформатора «звезда-звезда-нуль с симметрирующим устройством»: 1 – обмотка высшего напряжения трансформатора; 2 – обмотка низшего напряжения трансформатора; 3 – компенсационная обмотка

Сопротивление нулевой последовательности данного трансформатора уменьшается более чем в десять раз, при этом существенно улучшается качество напряжения. Этот трансформатор обладает все-

ми достоинствами трансформатора со схемой «звезда-звезда-разомкнутый треугольник с нулем». Однако он более удобен при его изготовлении. Данный трансформатор улучшает также форму кривой напряжения, так как компенсирует высшие гармонические напряжения, кратные трем, имеющие нулевую последовательность.

### Основная часть

Обмотка симметрирующего устройства (СУ) рассматриваемого трансформатора намотана поверх обмоток высшего напряжения и охватывает все три стержня. Она включена встречно обмоткам низшего напряжения. По ней протекает только ток нулевой последовательности, равный утроенной величине тока нулевой последовательности. Этот ток создает встречный компенсирующий магнитный поток нулевой последовательности, создаваемый обмотками низшего напряжения трансформатора. При равенстве потоков от обмотки СУ и обмоток низшего напряжения будет иметь место полная компенсация потоков нулевой последовательности:

$$\Phi_{O_a} + \Phi_{O_b} + \Phi_{O_c} + \Phi_{O_{CY}} \cdot e^{j180} = 0,$$

где  $\Phi_{O_{(a,b,c)}}$  – магнитный поток нулевой последовательности в стержнях магнитопровода трансформатора от фазных обмоток низшего напряжения;

$\Phi_{O_{CY}}$  – магнитный поток нулевой последовательности от обмотки симметрирующего устройства.