

КВАЗИСТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОЛНОПОТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ ШАХТНОГО ДИЗЕЛЕВОЗА

Развита методика матричного анализа трансмиссий за счет ввода базисных матриц: синхронного генератора, частотного преобразователя, асинхронного электродвигателя. Введенные базисные матрицы применены для анализа полнопоточной электрической трансмиссии

KVAZISTATIC ANALYSIS OF FULL-FLOW ELECTROMECHANICS TRANSMISSION OF MINE LOCOMOTIVE

The method matrix analysis of transmissions is developed due to the input of base matrices: synchronous generator, frequency transformer, asynchronous electric motor. The entered base matrices are applied for the analysis of full-flow electric transmission

Введение. В связи со значительным прогрессом в области создания электрических машин, разработкой новых конструкций с высокой удельной мощностью, КПД которых достигает 0,95 [1], актуальной является задача моделирования работы шахтного дизелевоза с бесступенчатой электрической (электро-механической) трансмиссией, позволяющей плавно изменять угловую скорость выходного звена при постоянной угловой скорости коленчатого вала двигателя. Кинематика, распределение моментов и мощностей, механические потери и КПД на механических звеньях электро-механической трансмиссии могут определяться с помощью существующей методики матричного трансмиссионного анализа [2].

Состояние вопроса. Основы матричного анализа трансмиссий транспортных машин даны в [2, 3], общая постановка задачи параметрического синтеза гидрообъемно-механических трансмиссий в [4], сравнение универсальных характеристик электропередачи, как альтернативного вариатора, и новых универсальных характеристик гидропривода ГСТ-90 на предмет кинематической, нагрузочной и энергетической эффективности их использования в бесступенчатых трансмиссиях шахтных дизелевозов в [5]. Однако, электрические передачи в теории матричного анализа не рассматривались, базисные матрицы электрических машин не выводились, что не позволяет проводить построение произвольных структурных схем электро-механических трансмиссий и их параметрический синтез в составе конкретного транспортного средства. Работы по анализу эффективности электрических бесступенчатых трансмиссий на шахтных дизелевозах в литературе отсутствуют.

Цель работы – развитие метода трансмиссионного матричного анализа с точки зрения определения базисных матриц синхронного генератора с возбуждением постоянными магнитами, частотного преобразователя, асинхронного двигателя, электрической передачи в целом, и применение введенных базисных матриц для анализа полнопоточной электрической трансмиссии дизелевоза.

Материалы исследований. Принципиальная электрическая схема замещения системы «синхронный генератор – частотный преобразователь – асинхронный электродвигатель» представлена на рис. 1.

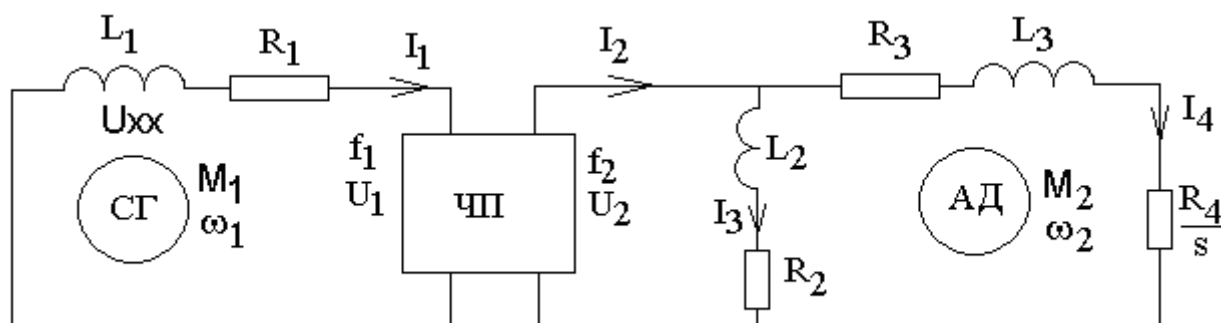


Рис. 1 – Схема замещения электрической передачи

С учетом потерь мощности на активном сопротивлении R , кинестатические уравнения, описывающие установившийся режим работы синхронного генератора с возбуждением постоянными магнитами, имеет вид:

$$\begin{cases} \omega_1 k_u = U_1 + I_1 R_1; \\ f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi}; \\ 2\eta_{\Gamma} M_1 = -I_1 k_u, \end{cases} \quad (1)$$

где k_u – коэффициент, зависящий от конструктивных характеристик генератора, в частности, от магнитного потока постоянных магнитов, суммарной длины обмотки, зазора между ротором и статором, В рад/с; ω_1 – угловая скорость вала генератора, рад/с; M_1 – момент нагрузки на валу генератора, Н·м; U_1 – амплитудное значение напряжения, В; I_1 – амплитудная величина силы тока, А; f_1 – частота напряжения, Гц; η_{Γ} – постоянная составляющая КПД генератора, не учитывающая потери мощности на активном сопротивлении в обмотках статора, поскольку генератор работает в режиме постоянной угловой скорости, то его $\cos \varphi$ также является постоянным и учитывается в данном коэффициенте; R_1 – активное сопротивление обмоток статора, Ом.

Согласно принятой аксиоматике о знаках мощностей на элементах или узлах трансмиссии [2], считается, что мощность, входящая в синхронный генератор формально отрицательна, а выходящая – положительна (при этом $|N_2| < |N_1|$). Исходя из условия $\omega_1 > 0$ (угловая скорость коленчатого вала двигателя, с которым непосредственно соединен генератор) при формально отрицательной входной мощности, необходимо принять $M_1 < 0$. Поэтому в третьем уравнении системы (1) имеет место знак «–». Система уравнений (1) может быть переписана в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} -k_u & 0 & 1 & 0 & R_1 \\ -1 & 0 & 0 & 2\pi & 0 \\ 0 & 2\eta_r & 0 & 0 & k_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ M_1 \\ U_1 \\ f_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

В отличие от гидрообъемных передач, при описании электрических машин не наблюдается деления на базисные силовые и кинематические матрицы, поскольку кинематические переменные в электрических машинах порождают нагрузочные и энергетические. Таким образом, матричное уравнение (2) описывает работу синхронного генератора с возбуждением постоянными магнитами в стационарном режиме и является его полной матричной системой.

Аналогично, для частотного преобразователя группа уравнений, описывающих его работу имеет вид:

$$\begin{cases} U_2 = k_e U_1 \\ f_2 = e f_1 \\ I_2 = \frac{\eta_q I_1}{k_e} \end{cases} \quad (3)$$

где $e \in [0;2]$ – параметр регулирования, $k_e \in [0;1]$ – коэффициент трансформации, отражающий способность частотного преобразователя регулировать напряжение на выходе (при этом данное напряжение не может превышать величины напряжения на входе); U_1, U_2 – напряжение на входе и выходе преобразователя, В; I_1, I_2 – сила тока на входе и выходе преобразователя, А; η_q – постоянный КПД преобразователя.

Полная матричная система для частотного преобразователя имеет вид:

$$\begin{bmatrix} -k_e & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -e & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \eta_q & 0 & 0 & k_e \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ f_1 \\ I_1 \\ U_2 \\ f_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Электрическая мощность, присутствующая на выходе генератора, на входе и выходе частотного преобразователя, а также на входе электродвигателя, определяется как среднеинтегральная величина произведения напряжения на силу тока:

$$\begin{aligned}
N_{\vartheta} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U(t)I(t)dt = \frac{1}{2\pi} U_A I_A \int_0^{2\pi} \sin^2(\omega t) dt = \\
&= \frac{1}{4\pi} U_A I_A \int_0^{2\pi} (1 - \cos(2\omega t)) dt = \frac{2\pi}{4\pi} U_A I_A = \frac{1}{2} U_A I_A
\end{aligned} \tag{5}$$

где U_A, I_A – амплитудные значения переменного напряжения и тока соответственно.

Группа уравнений, описывающих работу асинхронного двигателя, имеет вид:

$$\begin{cases} \omega_2 = 2\pi f_2(1-s) \\ M_2 + k_I \eta_D I_2 = 0 \end{cases} \tag{6}$$

где k_I – коэффициент пропорциональности между током и моментом, Н·м/А:

$$k_I = \frac{M_2}{I_2} = \frac{N\omega_2^{-1}}{2NU_2^{-1}} = \frac{U_2}{2\omega_2} = \frac{U_2}{4\pi f_2}, \tag{7}$$

где U_2 – напряжение на входе электродвигателя, В; f_2 – частота напряжения, Гц; I_2 – сила тока на входе электродвигателя; s – скольжение электродвигателя; ω_2 – угловая скорость вала электродвигателя, рад/с; M_2 – момент на валу электродвигателя, Н·м.

Полная матричная система для электродвигателя имеет вид:

$$\begin{bmatrix} 0 & 2\pi(s-1) & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & k_I \eta_D & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_2 \\ f_2 \\ I_2 \\ \omega_2 \\ M_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{8}$$

Механический КПД электродвигателя определяется как отношение реального активного момента M_2 к теоретическому M_0 :

$$M_0 = \frac{I_2 U_2}{4\pi f_2} = I_2 k_I; \tag{9}$$

$$M_2 = \frac{\alpha I_2 U_2}{4\pi f_2} \cos \varphi = M_0 \alpha \cos \varphi; \tag{10}$$

$$\eta = \alpha \cos \varphi, \tag{11}$$

где α – отношение силы тока в цепи статора электродвигателя к общему потребляемому току:

$$\alpha = \frac{\sqrt{R_2^2 + (2\pi L_2 f_2)^2}}{\sqrt{R_2^2 + (2\pi f_2 L_2)^2} + \sqrt{(R_3 + R_4 s^{-1})^2 + (2\pi f_2 L_3)^2}}; \quad (12)$$

$$\varphi = \arctan \frac{\operatorname{Im} Z_5}{\operatorname{Re} Z_5}; \quad (13)$$

$$Z_5 = \frac{R_2 + R_3 + R_4 s^{-1} + j2\pi f_2 (L_3 + L_2)}{(R_3 + R_4 s^{-1} + j2\pi f_2 L_3)(R_2 + j2\pi f_2 L_2)}. \quad (14)$$

Матричная система для электрической передачи в моноблочном исполнении (как единый элемент, на входе и выходе которого присутствует механическая мощность), имеет вид:

$$\begin{bmatrix} e(1-s) & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \eta & 0 & e \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ M_1 \\ \omega_2 \\ M_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

где η – произведение КПД генератора, частотного преобразователя и механического КПД асинхронного электродвигателя.

Заменяя в структурной схеме дизельпоезда Д8-600 отдельную гидросистему на систему «генератор – частотный преобразователь – электродвигатель» (рис. 2), и применив введенные базисные матрицы, получим новые матричные шаблоны – кинематический и силовой – электрической трансмиссии. При этом необходимо добавить согласующие редукторы, поскольку угловая скорость валов электродвигателей в 4 раза выше, чем угловая скорость валов гидромоторов. Кроме того, в новой структурной схеме полнопоточной электрической трансмиссии добавлена возможность переключения между тяговым и транспортным скоростным диапазоном.

Матричные шаблоны переводятся в полное матричное уравнение, с помощью которого можно проанализировать работу полнопоточной электрической трансмиссии дизельпоезда. Результаты анализа представлены на рис. 3. Матричные шаблоны и матричное уравнение ранга 40 затруднительно представить в явном виде, поэтому в статье не приводится, однако методика преобразования рассмотрена в [2] и продемонстрирована в [3].

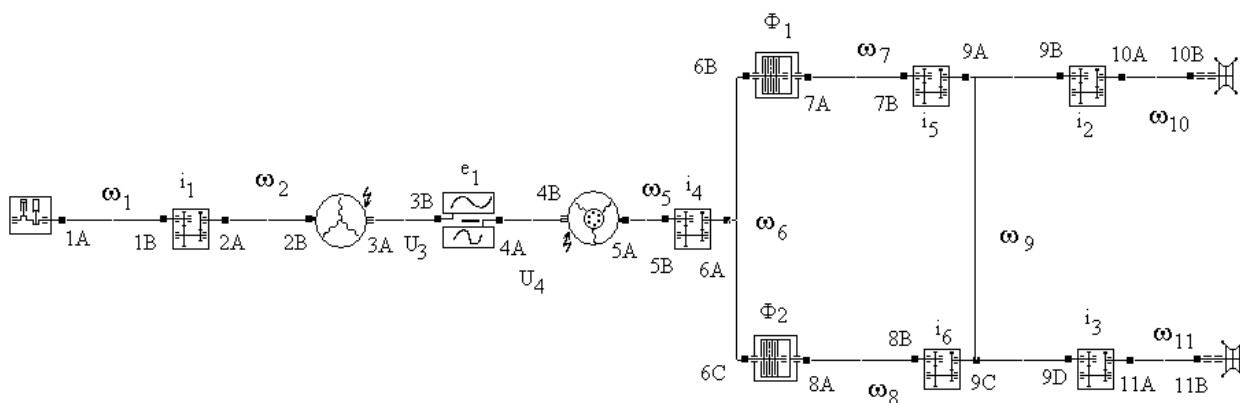


Рис. 2 – Структурная схема полнопоточной электрической трансмиссии

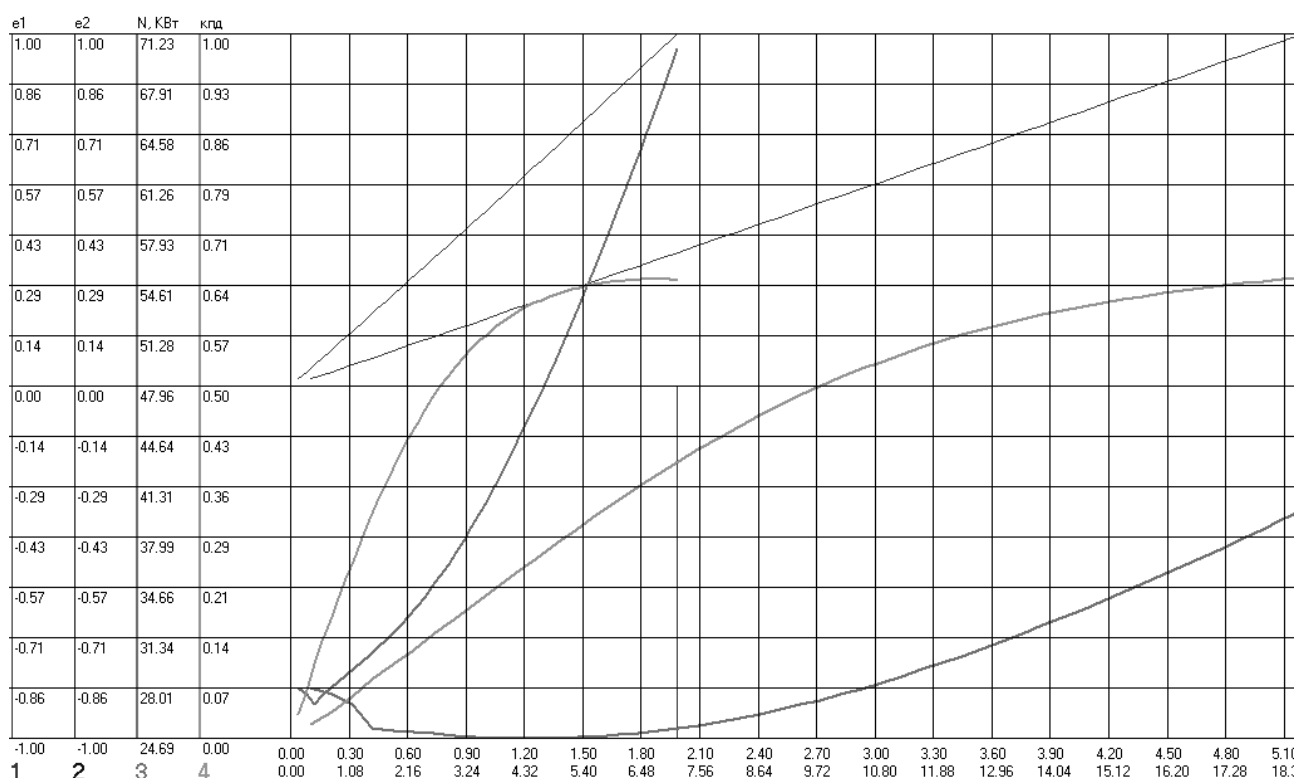


Рис. 3 – Результаты анализа полнопоточной электрической трансмиссии Д8-600

Для расчета были выбраны следующие исходные данные: масса дизелевоза 10 тонн; коэффициент сцепления в тяговом режиме $f = 0,23$; $i_1=29/23$; $i_2=i_3=14/68$; $i_4 = 13/53$, $i_5 = 27/53$, $i_6 = 46/35$; радиус ведущего колеса $r = 0,3$ м; мощность двигателя $N = 73,6$ кВт.

По электрическим машинам исходные данные выбраны следующим образом: $\omega_{01} = 266$ рад/с; $U_{XX} = 460$ В; сопротивление статора генератора $R_1=100$ мОм; сопротивление цепи намагничивания $R_2 = 10$ Ом; индуктивность цепи намагничивания $L_2 = 200$ мГн; сопротивление статора двигателя $R_3 = 200$ мОм; индуктивность статора двигателя $L_3 = 2$ мГн; сопротивление ротора двигателя

$R_4 = 100$ мОм; КПД генератора $\eta_{\Gamma} = 0,9$; КПД частотного преобразователя $\eta_{\text{ч}} = 0,95$. Параметр регулирования изменяется в интервале $e \in [0,01;1,0]$.

Выводы

1. Развита методика матричного анализа трансмиссий за счет ввода базисных матриц новых элементов: синхронного генератора, частотного преобразователя, асинхронного электродвигателя. Введенные базисные матрицы применены для анализа полнопоточной электрической трансмиссии.

2. В результате применения полнопоточного варианта электротрансмиссии, как и в случае полнопоточной ГОМТ [3] получен весьма низкий КПД трансмиссии, который регламентируется невысоким максимальным КПД электропередачи. В свою очередь, последний не превышает 0,71, а с учетом КПД редукторов общий КПД трансмиссии не более 0,64.

3. В выбранной электропередаче сила тока (аналог давления нагрузки в ГОП) оценивается амплитудной величиной 165А на тяговом режиме и вызывает интенсивные потери в активном сопротивлении статоров генератора и электродвигателя. Данные потери можно уменьшить путем повышения напряжения на выходе генератора, увеличивая передаточное число i_1 . При этом для уменьшения угловой скорости ведущего колеса необходимо уменьшать передаточные отношения i_5, i_6 .

4. Особо следует отметить отсутствие реверса электрической трансмиссии (отсутствие заднего хода) путем регулировки частотного преобразователя. В случае электротрансмиссии обеспечение заднего хода достигается дополнительными конструктивными усложнениями схемы. Для гидрообъемных полнопоточных ГОМТ реверс, определяемый знаком угла наклона шайбы регулирования гидронасоса, является безусловным достоинством.

5. Обобщая выводы данной работы и [3], можно констатировать следующее: полнопоточные гидрообъемно-механические и электрические бесступенчатые трансмиссии имеют неприемлемо низкий КПД и низкие тяговые и технико-экономические характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.Л. Кислицын. Синхронные машины. Учебное пособие. Ульяновск: Электромеханика, 2000. – 109 с.
2. Самородов В.Б. Основы матричного анализа трансмиссий транспортных машин // Информационные технологии: наука, техника, технология, оборудование, здоровье. – Харьков, 1997. –С.378-379.
3. Таран И.А. Теоретические основы автоматизированного структурного синтеза и технология матричного моделирования трансмиссий // Науковий вісник НГУ. –2009. –№11. –С. 46-53.
4. Динамика транспортно-тяговых колесных и гусеничных транспортных машин / Самородов В.Б., Александров Е.Е., Лебедев А.Т. и др. – Харьков: ХГАДТУ.– 2001.– 642 с.
5. Таран И.А. Сравнение универсальных характеристик объемных и электрических передач как основных элементов трансмиссии дизелевоза // Науковий вісник НГУ. –2009. –№10. –С. 70-72.