

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОВЗОВ НА ОБЩУЮ ДИНАМИКУ СОСТАВА

Д. А. Шокарев, ст. преп., Е. И. Скапа, студ.

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина

E-mail: seem@kdu.edu.ua

Приведено обоснование и предлагаемая тактика проведения аналитических исследований по оценке влияния переходных процессов в тяговых асинхронных двигателях электротехнических комплексов промышленных двухосных электровозов на общую динамику электровозного состава.

Ключевые слова: электровоз, тяговые асинхронные двигатели, переходные процессы, момент.

Введение. Тяговые электротехнические комплексы переменного тока "ISBT – инвертор – асинхронные электрические двигатели" являются перспективным направлением для разработки новых энергоэффективных и высокопроизводительных отечественных образцов промышленных электровозов [1, 2].

Анализ предыдущих исследований. Эффективность и устойчивость функционирования тяговых электротехнических комплексов двухосных электровозов во многом определяется уровнем влияния динамических процессов, происходящих в отдельных слагаемых комплексов, на динамику электровозосостава в целом как сложной электромеханической системы.

Поэтому оценка влияния этих процессов как в целом, так и в каждом конкретном случае и разработка мер по обеспечению устойчивости всего тягового комплекса является задачей актуальной.

Понимая, что получение ожидаемых уравнений для обобщенной оценки влияния всех слагаемых на общую тяговую электромеханическую систему, какой является электровозосостав, непростая задача многокритериального вида, первым шагом на пути её решения оценим влияния лишь переходных процессов в тяговых асинхронных электрических двигателях (ТАД) на динамику состава.

Цель работы. Получение аналитических соотношений, позволяющих оценить влияние электромагнитных переходных процессов в ТАД на общую динамику электровозосостава.

Материал и результаты исследования. Оценка влияния отдельных слагаемых динамических процессов на общую динамику электровозосостава может производиться на основании анализа уравнений Лагранжа [3]. При этом необходимо помнить, что анализ уравнений такого вида лежит за пределами инженерных решений, поэтому тактикой решения задачи примем дифференцирование подлежащих решению слагаемых задач.

Для этого с целью получения обобщенного решения в работе [3] предложено рассматривать весь электровозосостав состоящим из отдельных тяговых модулей, обобщенных в колёсные пары.

Учитывая конструкцию двухосных электровозов и вагонов модель можно представить в виде набора масс, связанных с колёсными парами (рис. 1).

Для упрощения решения будем считать связи между колёсными парами электровозов жесткими, а между электровозами, электровозом и вагоном, а также между вагонами – в функции сцепного устройства.

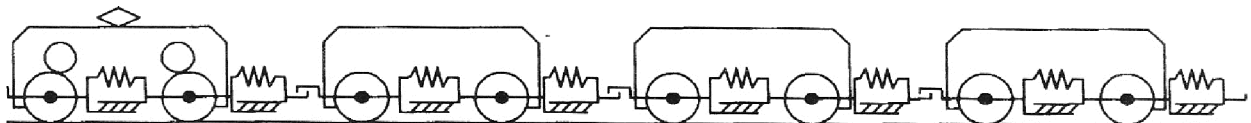


Рисунок 1 – Расчетная структура системы электровоз – вагоны

Движение отдельных колёсных пар можно описать с помощью уравнений Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial Q}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial Q}{\partial x_i} = - \frac{\partial U}{\partial x_i} - \frac{\partial R}{\partial \dot{x}_i} + F_i(t), \quad (1)$$

где h_i – коэффициент рассеяния энергии вследствие вязкости системы; $F_i(t)$ – обобщенная внешняя сила;

$R(x_i^2) = \frac{1}{2} \sum_i h_i (\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1})^2$ – функция рассеивания

энергии; $Q = \frac{1}{2} \sum_i m_i \dot{x}_i^2$ – кинетическая энергия системы в функции обобщенных координат;

$$U = \frac{1}{2} \sum_i c_i (\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1})^2 = \frac{1}{2} \sum_i c_i (s_i) s_i^2$$

c_i – жесткость вязы между i и $i+1$ элементом; s_i – перемещение связи между элементами; x_i – обобщенная координата.

Выполнив преобразования, получим дифференциальные уравнения движения одной колёсной пары с присоединенными массами (рис. 2):

$$m_i \ddot{x}_{li} + h_{li} \dot{x}_{li} + f(s)(x_{li} - x_{li+1}) = F(t);$$

$$j \ddot{x}_{2i} + h_{2i} \dot{x}_{2i} = M(t).$$

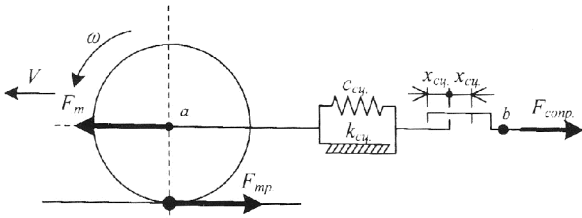


Рисунок 2 – Дифференциальные уравнения движения одной колёсной пары с присоединенными массами

В контексте анализа уравнения (1) рассмотрим влияние электромеханических переходных процессов на общее уравнение движения. Этот тезис требует своего освещения еще и потому, что отдельными исследованиями утверждается наличие разных уровней влияния на общую динамику состава разных типов ТЭТК [3].

Как известно [4], переходные процессы в ТЭТК сопровождаются возникновением вращающихся моментов и токов, которые могут достичь больших значений. Однако поскольку активные сопротивления асинхронных машин сравнительно велики, переходные процессы имеют тенденцию быстро затухать и установившийся режим имеет место на протяжении нескольких периодов.

Для учета электрических переходных процессов к уравнениям (1) следует добавить основные уравнения АД в координатной системе, вращающейся с угловой скоростью w_k , которая имеет вид:

$$\bar{U}_s = \bar{i}_s R_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} + jw_k \bar{\psi}_s; \quad (2)$$

$$\bar{U}_r = \bar{i}_r R_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} + j(w_k - w) \bar{\psi}_r;$$

$$\bar{\psi}_r = L_m \bar{i}_s + L_r \bar{i}_r;$$

$$\bar{\psi}_s = L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r,$$

где \bar{U}_s, \bar{U}_r – векторы напряжения статора и ротора; \bar{i}_s, \bar{i}_r – векторы тока статора и ротора; $\bar{\psi}_s, \bar{\psi}_r$ – векторы потокосцеплений статора и ротора; w – угловая скорость ротора; R_s, R_r – активное сопротивление статора и ротора; L_s, L_r – полные индуктивности статора и ротора; L_m – взаимная индуктивность статора и ротора.

Системы уравнений (1) в принятых допущениях будет иметь вид:

$$M = \frac{3}{2} L_m \bar{i}_r \times \bar{i}_s /.$$

Оценивая слагаемые полученного уравнения, видим, что представляет интерес возможность выяснить влияние электрических переходных процессов на вращающийся момент АД при разгоне или торможении электровозосостава.

Для некоторого упрощения анализа примем, что

ротор ТАД жестко удерживается в неподвижном состоянии. При этом свободные токи статора и ротора намагничивают машину как в одном и том же направлении (токи типа А, которые создают основной поток), так и в противоположном (токи типа В, которые возбуждают потоки рассеяния) [3].

После включения токи, протекающие в обмотках статора, становятся равными суммам соответствующих установившихся и свободных токов:

$$\bar{i}_s = \bar{I}_s e^{jw_1 t} + \bar{A}_0 e^{-\frac{t}{T_a}} + \bar{B}_0 e^{-\frac{t}{T_b}}; \quad (3)$$

$$\bar{i}_r = \bar{I}_r e^{jw_1 t} + \bar{A}_0 e^{-\frac{t}{T_a}} - \bar{B}_0 e^{-\frac{t}{T_b}},$$

$$\text{где } \bar{A}_0 = \frac{\bar{I}_s + \bar{I}_r}{2}; \quad \bar{B}_0 = \frac{\bar{I}_r - \bar{I}_s}{2}; \quad T_a = \frac{2L_m + L_e}{R};$$

$$T_b = \frac{L_e}{R}; \quad T_a \text{ и } T_b - \text{ постоянные времени затухания}$$

процессов типа А и В соответственно; L_e – индуктивность рассеяния статора и ротора; R – активное сопротивление статорной и роторной цепей; L_m – индуктивность намагничивающего контура.

Подставляя значения, получим:

$$M = \frac{3}{2} L_m (\bar{I}_r e^{jw_1 t} + \bar{A}_0 e^{-\frac{t}{T_a}} - \bar{B}_0 e^{-\frac{t}{T_b}}) \times$$

$$\times (\bar{I}_s e^{jw_1 t} + \bar{A}_0 e^{-\frac{t}{T_a}} + \bar{B}_0 e^{-\frac{t}{T_b}}).$$

При начальном перемножении векторные произведения членов, совпадающих по направлению, выпадает, а остальное произведение можно подразделить на четыре группы: $M = M_1 + M_2 + M_3 + M_4$.

Проанализируем каждое слагаемое последнего уравнения.

Произведение установившихся токов представляет собой пусковой момент без учета уравнительных процессов (момент при коротком замыкании); его мгновенная величина постоянна:

$$M_1 = \frac{3}{2} L_m (\bar{I}_r e^{jw_1 t}) \times (\bar{I}_s e^{jw_1 t}) = \frac{3}{2} L_m \bar{I}_r \times \bar{I}_s. \quad (5)$$

Множитель $e^{jw_1 t}$ при каждом из двух сомножителей может быть опущен, так как заключенный между векторами-сомножителями угол и величина векторного произведения не меняются при повороте их на один и тот же угол.

Произведение аperiodических составляющих равно:

$$M_2 = \frac{3}{2} L_m (\bar{A}_0 e^{-\frac{t}{T_a}} - \bar{B}_0 e^{-\frac{t}{T_b}}) (\bar{A}_0 e^{-\frac{t}{T_a}} + \bar{B}_0 e^{-\frac{t}{T_b}}).$$

Произведя перемножение и учитывая, что произведения сомножителей одинакового направления равны нулю, а перемена порядка множителей меняет знак произведения на обратный, получим:

$$M_2 = \frac{3}{2} L_m 2 \bar{A}_0 \times \bar{B}_0 e^{-\frac{(T_a T_b)}{T_a + T_b} t}. \quad (6)$$

Эта составляющая вращающегося момента убывает по экспоненциальному закону с постоянной времени:

$$T_2 = \frac{T_a T_b}{T_a + T_b}.$$

Поскольку $T_a \gg T_b$, то с реальным приближением можно принять $T_2 \approx T_b$.

Следовательно, в первом приближении составляющая M_2 затухает с той же скоростью, что и поток рассеяния составляющей тока вида В \approx (Т2 0,01-0,03 сек). Ею можно пренебрегать по истечении нескольких периодов после включения.

Произведение установившихся токов и аперидических токов вида А равно:

$$M_3 = \frac{3}{2} L_m \bar{A}_0 \times (\bar{I}_s - \bar{I}_r) e^{j\omega_1 t} e^{-\frac{t}{T_a}}. \quad (7)$$

Величины свободных токов определяются по начальным условиям, согласно которым в момент времени $t=0$ токи в обмотках статора и ротора должны быть равны нулю, поскольку имеется ввиду включение обесточенной машины. После подстановки

$$\bar{I}_s - \bar{I}_r = -2\bar{B}_0$$

тогда получим:

$$M_3 = -\frac{3}{2} L_m 2\bar{A}_0 \times (\bar{B}_0 e^{j\omega_1 t}) e^{-\frac{t}{T_a}}.$$

Сравнивая это выражение с (2.35), видим, что при $t=0$ $M_3 = -M_2$.

Выполняя векторное умножение с помощью вектора, сопряженного с первым множителем, получим:

$$M_3 = -\frac{3}{2} L_m 2e^{-\frac{t}{T_a}} I_m \{A_0 \bar{B}_0 e^{j\omega_1 t}\}.$$

Таким образом, составляющая момента M_3 пульсирует синусоидально с частотой сети, а ее амплитуда затухает медленнее, чем M_2 , соответственно постоянной времени, равной $T_a \approx$ (Та 0,2–0,3 с).

Произведение установившихся токов и аперидических токов вида В равно:

$$M_4 = \frac{3}{2} L_m \left[(\bar{I}_s + \bar{I}_r) e^{j\omega_1 t} \right] \times \bar{B}_0 e^{-\frac{t}{T_b}}.$$

Аналогично выполняем подстановку

$$\bar{I}_s + \bar{I}_r = -2\bar{A}_0$$

и получаем:

$$M_4 = -\frac{3}{2} L_m 2(\bar{A}_0 e^{j\omega_1 t}) \times \bar{B}_0 e^{-\frac{t}{T_b}}. \quad (8)$$

Составляющая вращающего момента M_4 пульсирует так же, как и M_3 , но опережает последнюю на фазовый угол $2\varphi_k$ и затухает значительно быстрее с постоянной времени, равной T_b .

Сумма четырех составляющих вращающего момента равна действительному вращающему моменту M , который развивал бы АД с неподвижным ротором, при одновременном включении трех фаз, в предположении, что параметры статора и ротора одинаковы и перед включением машина была обесточена.

С качественной точки зрения явления протекают

сходным образом так же и в случае, когда статор и ротор имеют разные параметры. В случае медленно затухающих токов вида А можно пренебречь сопротивлениями индуктивностей рассеяния по сравнению с активными сопротивлениями статора R_s и ротора R_r .

Параллельно соединены активные сопротивления статорной и роторной цепей, исходя из схемы замещения АД, можно заменить результирующим сопротивлением и определить точное значение постоянной времени для токов вида А:

$$T_a = \frac{L_m}{R} = L_m \left(\frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_r} \right). \quad (9)$$

Так как индуктивностями рассеяния можно пренебречь по сравнению с индуктивностью основного потока, то

$$\frac{L_m}{R_s} \approx \frac{L_m + L_{sl}}{R_s} = \frac{L_s}{R_s} = T_{so}.$$

Величина T_{so} представляет собой постоянную времени холостого хода статора.

Постоянная времени T_b для быстро затухающих токов вида В с достаточной степенью приближения может быть принята равной:

$$T_b \approx \frac{L_{sl} + L_{rl}}{R_s + R_r}. \quad (10)$$

Как видим, постоянная времени T_a стремится к постоянной времени холостого хода T_{so} тока статора и равна ей при пуске ТАД.

При этом учтем, что постоянная времени холостого хода незначительна и имеет величину порядка десятой доли секунды [3].

При реверсировании и торможении двигателя с номинальной скоростью вращения также получают лишь быстро затухающие составляющие общего момента.

Если ротор ТАД вращается, значительная часть вращающегося момента расходуется на его ускорение, вследствие чего вал двигателя подвергается воздействию значительно меньшего момента, чем определенного по формуле (4). Величина этого момента определяется соотношением момента инерции ротора и внешних ускоряемых масс.

При соотношениях 1/30–1/50, как это имеет место в нашем случае, переходные процессы практически не влияют на характер разгона механизма. В дальнейшем отметим, что при плавном пуске и торможении ТЭТК, что имеет место при импульсном управлении нагрузки питания ТАД, влияние электрических переходных процессов еще более существенно уменьшается, таким образом можно утверждать, что переходные процессы в ТАД не влияют на общую динамику электровозосостава.

Выводы. Влияние электромагнитных переходных процессов в тяговых асинхронных двигателях электротехнических комплексов электровозов не оказывает видимого воздействия на динамику электровозосостава.

Существенное влияние на динамику электровозосостава оказывают механические переходные процессы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иньков Ю.М. Расчет и проектирование статического преобразователя подвижного состава – М.: МИИТ, 1985. – 117 с.
2. Синчук О.Н., Юрченко Н.Н., Чернышев А.А., Синчук И.О. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов – К., 2006. – 250 с.

3. Элин С.В. Исследования динамики комплекса коксотушильного вагона. Автореферат диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Х., 1971. – 19 с.

Стаття надійшла 25.03.2011 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Сінчуком О.М.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ТЯГОВИХ ДВИГУНАХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ НА ЗАГАЛЬНУ ДИНАМІКУ ПОТЯГА

Д. А. Шокар'єв, ст. викл., Е. І. Скапа, студ.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна

E-mail: seem@kdu.edu.ua

Приведено обґрунтування й запропоновано тактику проведення аналітичних досліджень за оцінкою впливу перехідних процесів у тягових асинхронних двигунах електротехнічних комплексів промислових двовісних електровозів на загальну динаміку складу електровозу.

Ключові слова: електровоз, тягові асинхронні двигуни, перехідні процеси, момент.

ANALYSIS OF INFLUENCING OF TRANSITIONAL PROCESSES IN HAULING ENGINES ON GENERAL DYNAMICS COMPOSITION OF ELECTRICAL ENGINEERINGS COMPLEXES OF INDUSTRIAL ELECTRIC LOCOMOTIVES

D. Shokarev, Sen. Lect., E. Skapa, stud.

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, 39600, Kremenchuk, Ukraine

E-mail: seem@kdu.edu.ua

A ground and offered tactic of conducting of analytical researches is resulted as evaluated by influencing of transitional processes in the hauling asynchronous engines of electrical engineerings complexes of industrial biaxial electric locomotives on the general dynamics of electric locomotive composition.

Key words: electric locomotive, hauling asynchronous engines, transitional processes, moment.