

С.Г. Буряковский, А.С. Маслий, О.В. Пасько, В.В. Смирнов

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДА – ОСНОВНОМ ИСПОЛНИТЕЛЬНОМ ЭЛЕМЕНТЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ

*Розроблено математичні моделі електроприводу стрілочного переводу у вигляді дво- і тримасової електромеханічних систем на основі двигунів постійного і змінного струму як основного виконавчого елемента системи автоматизації залізниць. Відхилення модельних і експериментальних перехідних процесів для параметрів стрілочного переводу СП-6м не перевищують 5 %. Бібл. 10, табл. 1, рис. 10.*

*Ключові слова:* електропривод залізничного стрілочного переводу; електромеханічна система стрілочного переводу.

*Разработаны математические модели электропривода стрелочного перевода в виде двух- и трехмассовой электромеханических систем на основе двигателей постоянного и переменного тока как основного исполнительного элемента системы автоматизации железных дорог. Отклонения модельных и экспериментальных переходных процессов для параметров стрелочного перевода СП-6м не превышают 5 %. Библ. 10, табл. 1, рис. 10.*

*Ключевые слова:* электропривод железнодорожного стрелочного перевода; электромеханическая система стрелочного перевода.

**Введение:** Внедрение безопасного высокоскоростного железнодорожного движения на магистральных дорогах Украины в соответствии с «Национальной транспортной стратегией Украины на период до 2030 года» напрямую зависит от инфраструктуры и условий обеспечения скоростей движения: состояния подвижного состава, железнодорожного пути и систем автоматики. Основным исполнительным элементом систем железнодорожной автоматики, обеспечивающим пропускную способность, является стрелочный перевод (СП). Так как математическому моделированию электропривода (ЭП) стрелочного перевода на железнодорожном транспорте не уделялось достаточного внимания, моделей электромеханической системы (ЭМС) СП практически не существует.

**Целью работы** является разработка математической и имитационной модели электропривода стрелочного перевода в виде двух- и трехмассовой электромеханической системы на основе двигателей постоянного и переменного тока как основного исполнительного элемента системы автоматизации железных дорог.

**Материал исследования.** Серьезной проблемой в исследованиях электроприводов стрелочных переводов методом математического моделирования было то, что в известных моделях не учитывалась нагрузка и они рассматривались как одномассовые электромеханические системы. Стрелочные переводы СП-6, а также модификации на их основе, являются наиболее распространенными в железнодорожной транспортной системе Украины. Основные конструктивные элементы стрелочного перевода приведены на рис. 1: 1 – корпус; 2 – электродвигатель; 3 – редуктор со встроенным в том же блоке фрикционным соединением 4; 5 – главный вал с шиберами шестерней; 6 – блок автопереключателя; 7 – шибера с кулачковым запирающим механизмом.

Особенности конструкции стрелочного перевода СП-6 и связанные с ними недостатки (необходимость периодической регулировки фрикционного защитного устройства, сложность конструкции автопереключателя, наличие технологического зазора в зубчатой

передаче редуктора), приводит к увеличению времени перевода, ускоренному износу звеньев кинематической системы, что в целом влияет на безопасность железнодорожного движения.

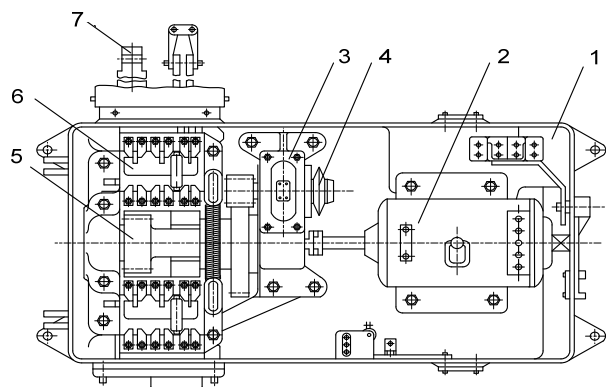


Рис. 1. Конструкция стрелочного перевода типа СП-6м

Указанные недостатки условно можно разделить на механические (фрикционная муфта, технологический зазор) и электрические (датчик положения, неконтролируемый перевод). Для исследования процессов, происходящих в электроприводе стрелочного перевода, предлагается рассматривать его как взаимосвязанную электромеханическую систему. Причем в силу его конструктивных особенностей для изучения влияния зазоров и методов управления на надежность процесса перевода целесообразно рассмотреть стрелочного перевода как многомассовой электромеханической системы, учитывающей массы электродвигателя, острияков и упругих связей.

Для двухмассовой электромеханической системы (рис. 2,а) в качестве первой массы  $J_1$  выступает суммарный момент инерции двигателя, редуктора и шибера. Вторую массу  $m_2$  составляет суммарная масса острияков и межострияковой тяги. В качестве упругой связи  $c_{12}$  служит рабочая тяга от шибера к первому острияку. Преобразование вращательного движения вала двигателя в поступательное перемещение шибера осуществляется в редукторе. В модели учтены

© С.Г. Буряковский, А.С. Маслий, О.В. Пасько, В.В. Смирнов

зазоры в кинематической передаче: технологический зазор  $\varphi_{tz}$  и зазоры  $l_z$  в шплицевых соединениях крепления тяги с шибером и остряком. Наличие межостряковой тяги в двухмассовой системе означает существование упругих связей между первым и вторым остряком. Поэтому далее авторы рассматривают стрелочный перевод именно как трехмассовую систему (рис. 2,б,в). Основной причиной такого подхода является то, что наличие упругих элементов связи оказывает серьезное влияние на динамические процессы в механизме [1-6], а двухмассовую модель целесообразно использовать для инженерных расчетов.

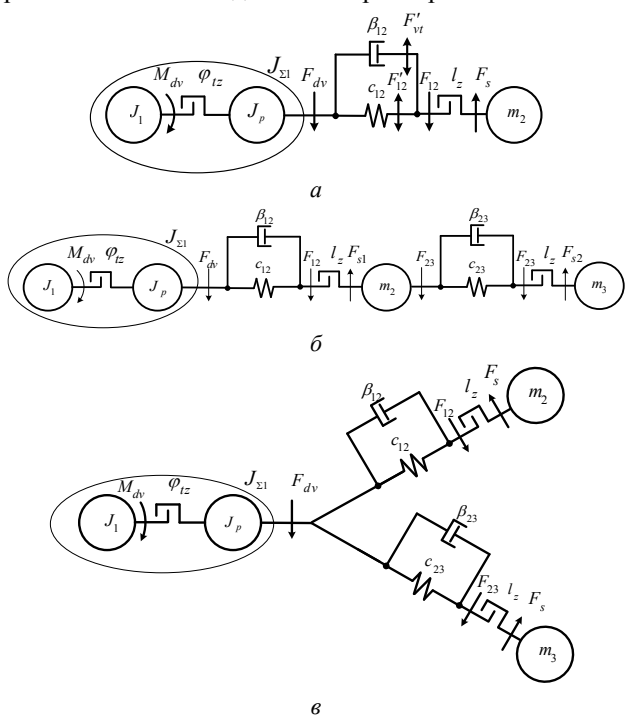


Рис. 2. Двухмассовая расчетная схема стрелочного перевода (а); трехмассовая расчетная схема стрелочного перевода с последовательным соединением упругих масс (б); трехмассовая расчетная схема стрелочного перевода с параллельным соединением упругих масс (в)

В расчетной схеме с последовательным соединением упругих масс (рис. 2,б) такой системы первую массу, как и ранее, составляют моменты инерции вала двигателя и приведенный к валу двигателя момент инерции редуктора. Второй и третьей массой являются первый и второй остряк соответственно; в качестве дополнительной упругой связи  $c_{23}$  выступает межостряковая тяга.

Кинематическая схема стрелочного перевода (рис. 3) демонстрирует, что рабочая тяга не опирается непосредственно в первый остряк, а соединяется с ним со стороны второго остряка через межостряковую тягу. Авторам наиболее целесообразным представляется рассмотрение механической части стрелочного перевода как трехмассовой расчетной схемы с последовательным соединением упругих масс, где:  $J_1$  – момент инерции ротора двигателя;  $J_p$  – момент инерции редуктора, приведенный к валу двигателя;  $J_{\Sigma 1}$  – суммарный момент инерции первой массы;  $M_{dv}, F_{dv}$  – электромагнитный момент и сила тяги двигателя соответственно;  $\varphi_{tz}, l_z$  – технологический зазор

и зазор в креплениях тяг соответственно;  $F_{12}, F_{23}$  – упругие силы в рабочей и межостряковой тягах соответственно;  $F_{s1}, F_{s2}$  – силы сопротивления первого и второго остряка соответственно;  $c_{12}, c_{23}$  – упругости рабочей и межостряковой тяг соответственно;  $\beta_{12}, \beta_{23}$  – коэффициент внутреннего вязкого трения рабочей и межостряковой тяг соответственно;  $m_2, m_3$  – вторая и третья массы соответственно (рис. 2,б). Представление стрелочного перевода как четырехмассовой системы является нецелесообразным.

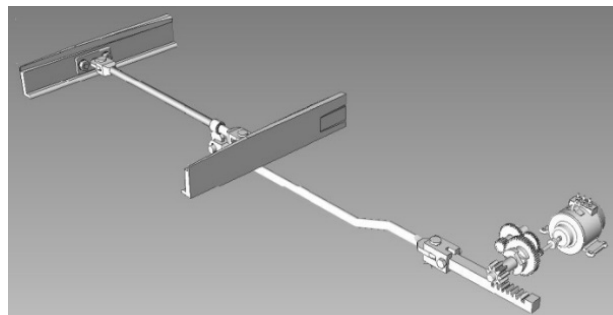


Рис. 3. Кинематическая схема стрелочного перевода СП-6м

При переводе стрелки (рис. 4) перемещаются ее остряки 2 и 7, связная (межостряковая) тяга 3, рабочая тяга 4, контрольные тяги 5 и 6 стрелочной гарнитуры и детали крепления. Усилие перевода стрелки затрачивается на преодоление: сопротивления перемещаемых частей по переводным поверхностям 1 и сопротивления в шарнирах.

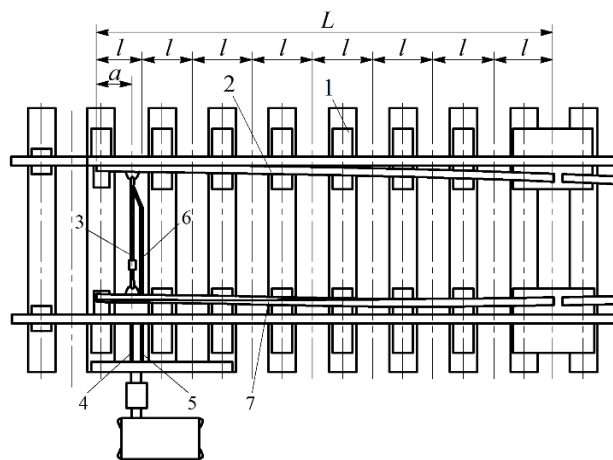


Рис. 4. Общий вид механизма для определения усилия перевода стрелки: 1 – переводная поверхность; 2, 7 – остряки; 3 – связная тяга; 4 – рабочая тяга; 5 – первая контрольная тяга; 6 – вторая контрольная тяга

Необходимое для преодоления трения перемещаемых частей стрелки усилие определяется силой трения, возникающей при движении. Ее величину можно определить следующим образом. Разделим стрелку на  $n$  равных элементов длиной  $l$  каждый. Обозначим через  $q_1, q_2, \dots, q_k$  вес каждого элемента. Вес элементов будет различный как за счет изменения веса частей остряков 2 и 7, так и за счет наличия или отсутствия связных тяг, стрелочной гарнитуры и других перемещаемых частей в пределах элементов.

Полагая, что остряк лежит не на отдельных подушках, а на сплошном основании и коэффициент трения между остряками и основанием одинаков по

всей длине острьяка и равен  $\psi$ , найдем элементарные силы трения:

$$F_1 = \psi \cdot q_1, F_2 = \psi \cdot q_2, \dots, F_k = \psi \cdot q_k. \quad (1)$$

Моменты элементарных сил относительно корня острьяков:

$$M_1 = \psi \cdot q_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot l, M_2 = \psi \cdot q_2 \cdot \frac{3}{2} \cdot l, \dots, M_k = \psi \cdot q_k \cdot \frac{2k-1}{2} \cdot l. \quad (2)$$

Суммарный момент силы трения:

$$M_1 = \sum_{k=1}^n M_k = \frac{1}{2} \cdot \psi \cdot l \cdot \sum_{k=1}^n q_1 + 3q_2 + \dots + (2k-1)q_k. \quad (3)$$

Следовательно, усилие, которое необходимо для преодоления сил трения перемещаемых частей, приложенное на расстоянии  $L-a$  от корня (начала) острьяка, составляет

$$F = \frac{M_T}{L-a} = \frac{1}{2} \cdot \psi \cdot \frac{l}{L-a} \cdot \sum_{k=1}^n q_1 + 3q_2 + \dots + (2k-1)q_k. \quad (4)$$

Для приближенных вычислений силы  $F$  и считая, что  $q_1 = q_2 = \dots = q_k = q$ , получим:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \psi \cdot q \cdot \frac{l}{L-a} \cdot \sum_{k=1}^n 1 + 3 + \dots + (2k-1) = \frac{1}{2} \cdot \psi \cdot q \cdot n^2 \cdot \frac{l}{L-a}. \quad (5)$$

Так как  $L = l \cdot n$  и  $Q = q \cdot n$ , то

$$F = \frac{1}{2} \cdot \psi \cdot Q \cdot \frac{L}{L-a}, \quad (6)$$

где  $L$  – длина острьяка,  $Q$  – общий вес перемещаемых частей стрелки.

Коэффициент, учитывающий влияние сил трения в шарнирах, обычно принимается равным 1,1 [7]. Вычисляем расчетное усилие перевода стрелки с шкворневым или вкладочно-накладочным креплением по формуле:

$$F = 1,1 \cdot \frac{1}{2} \cdot \psi \cdot Q \cdot \frac{L}{L-a} = 0,55 \cdot \psi \cdot Q \cdot \frac{L}{L-a}. \quad (7)$$

Из (7) следует, что усилие перевода стрелки зависит от веса перемещаемых частей стрелки, типа рельсов, места закрепления переводных тяг и коэффициента трения острьяков о подушки. Все указанные

величины, за исключением последней, являются определяемыми.

Величина коэффициента трения может лежать в пределах от 0,05 до 0,3 и зависит от состояния стрелки, качества смазки стрелочных подушек, чистоты обработки их поверхностей, а также подошв острьяков и других факторов.

Поддержание зазоров в кинематической линии (рис. 5) перевода в установленных инструкциями пределах играет одну из ключевых ролей в обеспечении безопасности перевода острьяков.

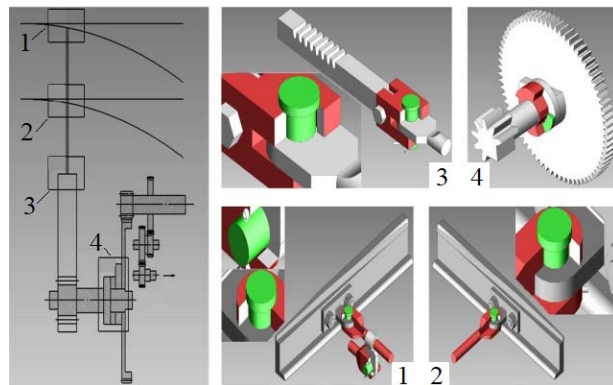


Рис. 5. Зазоры в кинематической линии стрелочного перевода: 1, 2, 3 – в местах крепления тяг, 4 – технологический зазор

Такое расстояние для безопасного движения колес подвижного состава должно быть не более 4 мм [8, 9], в противном случае могут возникать аварийные ситуации, такие как «взрезание стрелки», которые приводят к сходу подвижного состава и разрушению как полотна дороги, так и сопутствующей инфраструктуры. Вследствие удара при выработке технологического зазора, работы на фрикцию и нерегулируемой скорости перевода – соединения тяг постепенно разбиваются и зазоры увеличиваются. Исследования, проводившиеся на железных дорогах Латвии [8] показали, что скорость нарастания величины зазора составляет в среднем 0,05 мм в месяц (табл. 1).

Таблица 1

Ежемесячный прирост люфтов в местах соединения стрелочных тяг

Место соединения	Максимальный прирост люфтов (мм)	Средний прирост люфтов (мм)
Связная межостряковая тяга – серьги	0,07	0,04
Связная межостряковая тяга – рабочая тяга	0,06	0,04
Рабочая тяга – шибер электропривода	0,09	0,05

Конструктивной особенностью переводов марки СП-6м является наличие технологического зазора величиной  $46^\circ$  между третьей и четвертой ступенью редуктора (рис. 4, 5), который необходим для облегчения разгона двигателя и запаса им некоторой кинетической энергии с целью срыва острьяков в начале процесса перевода [7]. Моделирование механической части электропривода производится с учетом реальных величин зазоров и наличия силы внутреннего вязкого трения.

Суммарная упруго-вязкая сила определяется как:

$$F_{12} = \begin{cases} 0, & \text{если } \text{sign}\Delta l \neq \text{sign}\Delta v \text{ и } |F_{vt}| > |F'_{12}|; \\ F_{vt} + F_{12}, & \text{если } \text{sign}\Delta l = \text{sign}\Delta v \text{ и } |F_{vt}| \leq |F'_{12}|, \end{cases} \quad (8)$$

где  $F_{12} = c_{12} \cdot F_1(l)$  – упругая сила;  $F_{vt} = \beta_{12} \cdot \Delta v \cdot F_2(l)$  – сила вязкого трения;  $F_1(l)$  и  $F_2(l)$  – нелинейные функции:

$$F_1(l) = \begin{cases} 0 & \text{при } |\Delta l| \leq \frac{\Delta l_3}{2}; \\ \Delta l - \frac{\Delta l_3}{2} & \text{при } \Delta l > \frac{\Delta l_3}{2}; \\ \Delta l + \frac{\Delta l_3}{2} & \text{при } \Delta l < -\frac{\Delta l_3}{2}, \end{cases} \quad (9)$$

$$F_2(l) = \begin{cases} 0 & \text{при } |\Delta l| \leq \frac{\Delta l_3}{2}; \\ 1 & \text{при } |\Delta l| > \frac{\Delta l_3}{2}. \end{cases} \quad (10)$$

В трехмассовой модели (рис. 2,б) упруго-вязкая сила  $F_{23}$  определяется аналогично.

Реализация математической модели произведена в среде создания инженерных приложений Simulink пакета MATLAB. Модель создавалась поблочно, в полном соответствии с расчетными схемами (рис. 2): блок двигателя, блок редуктора, блок первого остряка, блок второго остряка. Отдельными блоками выделены зазоры – технологический и два зазора в соединениях, приведенных к креплению первого и второго рельса.

Численные значения моментов инерции ступеней редуктора рассчитываются исходя из их массы и размеров. Для моделирования также необходимы механические параметры рабочей и связной тяг – жесткости и коэффициенты вязкого трения  $c_{12}$ ,  $\beta_{12}$ ,  $c_{23}$ ,  $\beta_{23}$  соответственно. Тяга представляет собой металлический стержень, деформация которого происходит по продольной оси:

$$c_{12} = c_{23} = E \cdot \frac{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2}{l}, \quad (11)$$

где  $E$  – модуль упругости для стали;  $d$  – диаметр тяги;  $l$  – длина тяги.

Жесткость рабочей тяги в модели принимается равной жесткости прямой связной тяги в связи с тем, что эти тяги имеют одинаковую длину и диаметр.

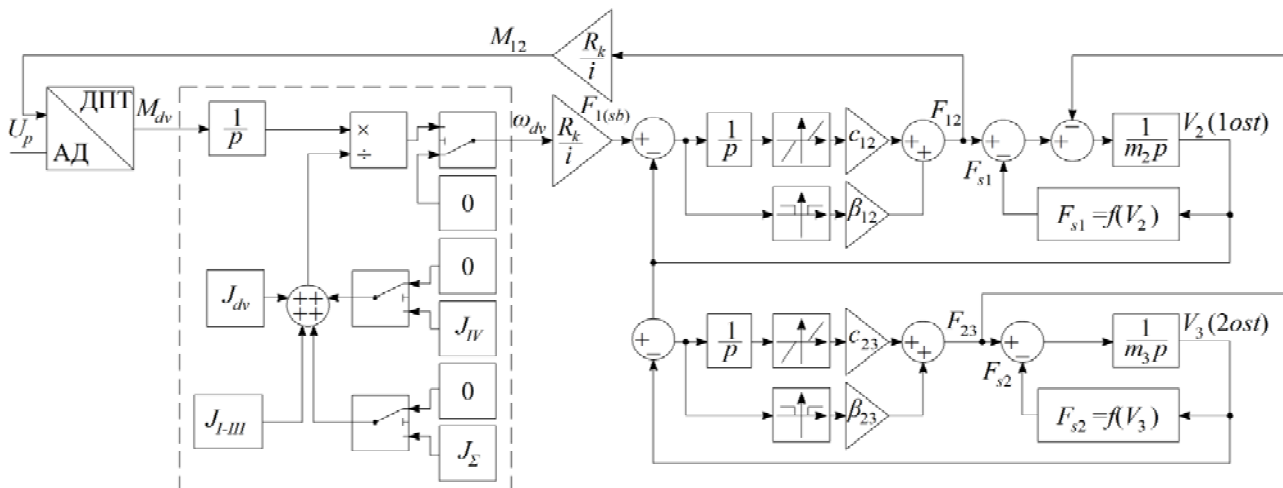


Рис. 6. Структурная схема трехмассовой модели стрелочного перевода с последовательным соединением масс

Представленная в данной статье модель демонстрирует способы замены электропривода стрелочного перевода с ДПТ на АД с частотным управлением. В качестве решения предлагается математическая модель стрелочного перевода на основе структурной схемы (рис. 6), где вместо блока ДПТ/АД используется блок ПЧ-АД. Асинхронный двигатель представляет собой нелинейный многомерный объект с достаточно сложной структурой, поэтому математическое описание и моделирование электропривода с АД отличается от приведенной системы уравнений (12) для ДПТ. Схема замещения АД в электроприводе приведена на рис. 7.

На основе результатов исследований [10] значение коэффициента внутреннего вязкого трения принято в пределах  $1 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^4$ .

В настоящее время широко эксплуатируются схемы как с двигателем постоянного тока (ДПТ), так и с асинхронным двигателем (АД). В силу возможности питания преобразователя частоты (ПЧ) как постоянным током непосредственно автономного инвертора напряжения, так и переменным током выпрямителя, разрабатываемая система может быть интегрирована в схему управления стрелочным переводом на базе как ДПТ, например, широко эксплуатирующихся в Украине двигателей последовательного возбуждения типов МСП-0,1, МСП-0,15 и МСП-0,25, так и АД.

На рис. 6 представлена структурная схема трехмассовой модели стрелочного перевода с различными конфигурациями приводного двигателя – ДПТ и АД.

Уравнения, которыми описываются электромагнитные и электромеханические процессы в ДПТ последовательного возбуждения, имеют вид:

$$\begin{cases} u = (L_a + L_v) \frac{di}{dt} + (r_a + r_v)i + e_a; \\ J \frac{d\omega}{dt} = M_d - M_s; \\ e_a = k \cdot \omega \cdot \Phi_v; \\ M_d = k \cdot i \cdot \Phi_v, \end{cases} \quad (12)$$

где  $k = \frac{pN}{2\pi a}$  – конструктивный коэффициент.

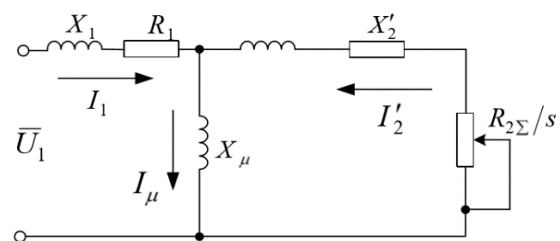


Рис. 7. Схема замещения фазы асинхронного двигателя

При математическом описании АД большое значение имеет принятая система координат, в которой

выполнено математическое описание объекта, и конфигурация модели, которая зависит от содержания входных и выходных сигналов модели, структуры системы управления и от особенностей источника питания двигателя.

Основой для моделирования конфигурации электропривода в данном исследовании послужила система координат, ориентированная по потоку сцепления ротора. При проведении моделирования приняты следующие допущения: статор и ротор трехфазного асинхронного двигателя имеют симметричные обмотки, воздушный зазор по всей окружности ротора одинаков, магнитное поле в воздушном зазоре распределено синусоидально, оси обмоток статора и ротора не совпадают, образуя произвольный угол. Для перехода от математического описания гармонических сигналов в многофазовых координатах к математическому описанию в ортогональных двухфазных координатах, используется понятие обобщенного вектора:

$$\mathbf{i} = \frac{2}{3}(i_A + \mathbf{a} \cdot i_B + \mathbf{a}^2 \cdot i_C), \quad (13)$$

где  $\mathbf{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ ,  $\mathbf{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$  – векторы, учитывающие пространственное смещение обмоток;

$$i_A = I_m \cos \omega t, i_B = I_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}), i_C = I_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3})$$

– трехфазная симметричная система токов статора.

Подставив в уравнение (13) значение мгновенных токов, находим математическое описание пространственного вектора тока статора:

$$\mathbf{i}_S = \frac{2}{3} I_m (\cos \omega t + e^{j\frac{2\pi}{3}} \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + e^{j\frac{4\pi}{3}} \times \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3})) = I_m e^{j\omega t}. \quad (14)$$

Таким образом, для системы координат, вращающейся с произвольной скоростью можно записать систему уравнений:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_S = R_S \mathbf{i}_S + \frac{d\boldsymbol{\Psi}_S}{dt} + j\omega_k \boldsymbol{\Psi}_S; \\ \mathbf{u}_R = R_R \mathbf{i}_R + \frac{d\boldsymbol{\Psi}_R}{dt} + j(\omega_k - \omega_r) \boldsymbol{\Psi}_R; \\ \boldsymbol{\Psi}_S = L_S \mathbf{i}_S + L_m \mathbf{i}_R; \\ \boldsymbol{\Psi}_R = L_m \mathbf{i}_S + L_R \mathbf{i}_R; \\ M = \frac{3}{2} p k_R \cdot \text{Mod}(\boldsymbol{\Psi}_R \times \mathbf{i}_S); \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_n, \end{cases} \quad (15)$$

где  $\omega = p\omega_n$ ;  $p$  – число пар полюсов в машине;  $J$  – момент инерции ротора.

Для короткозамкнутого двигателя векторы  $\boldsymbol{\Psi}_S$ ,  $\boldsymbol{\Psi}_R$  отличаются друг от друга из-за наличия рассеяния обмоток статора и ротора. В этой связи для них справедливо следующее:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Psi}_S &= (L_m + L_{sl}) \cdot \mathbf{i}_S + L_m \mathbf{i}_R; \\ \boldsymbol{\Psi}_R &= (L_m + L_{rl}) \cdot \mathbf{i}_R + L_m \mathbf{i}_S, \end{aligned} \quad (16)$$

где  $L_m$  – главная индуктивность рассеяния;  $L_{sl}$ ,  $L_{rl}$  – индуктивности рассеяния обмоток.

При этом для индуктивностей обмоток статора  $L_S$  и ротора  $L_R$  имеем:

$$\begin{aligned} L_S &= (L_m + L_{sl}); \\ L_R &= (L_m + L_{rl}). \end{aligned} \quad (17)$$

При построении реальных систем электропривода переменного тока практически всегда в систему управления включаются преобразователи координат, которые необходимы для пересчета реальных трехфазных переменных в двухфазные переменные модели и наоборот. Для системы координат  $\alpha, \beta$  прямое преобразование имеет следующий вид:

$$i_A = i_\alpha, i_B = -\frac{1}{2}i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta, i_C = -\frac{1}{2}i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta, \quad (18)$$

а обратное:

$$i_\alpha = i_A, i_\beta = \frac{i_B - i_C}{\sqrt{3}}. \quad (19)$$

Для моделирования в качестве исходных данных были взяты параметры стрелочного перевода СП-6м как основной модификации исполнительного элемента системы автоматизации внутренних железных дорог Украины.

Для дальнейшей работы с имитационной моделью осуществлена оценка адекватности ее реальному объекту. Для этого в лаборатории Украинского государственного университета железнодорожного транспорта к приводу СП-6 был подключен ПЧ фирмы Siemens и осуществлен пуск с номинальной нагрузкой до номинальной скорости по заданной тахограмме. Результаты эксперимента на стенде (а) и на модели (б) приведены на рис. 8. Анализ графиков позволяет сделать вывод об идентичности работы модели и реального объекта, поскольку по координатам тока и скорости расхождение составляет менее 5 %.

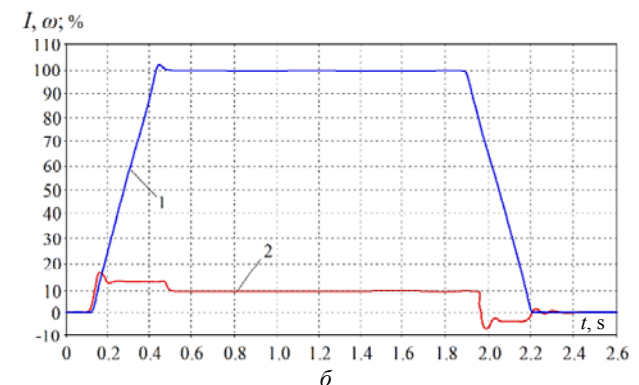
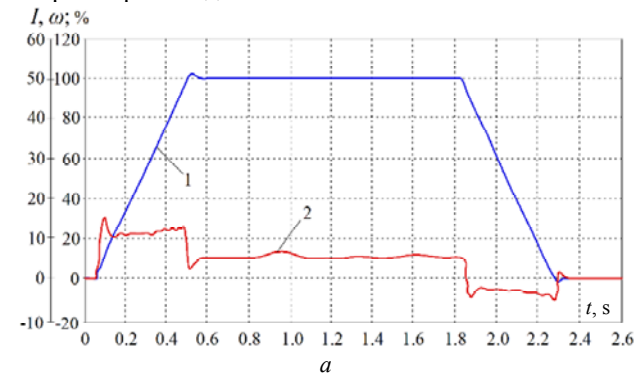


Рис. 8. Осциллограмма движения привода стрелочного перевода: а – полученная на оборудовании Siemens; б – математическая модель

Полученные результаты моделирования работы электропривода стрелочного перевода с двигателем переменного тока приведены на рис. 9.

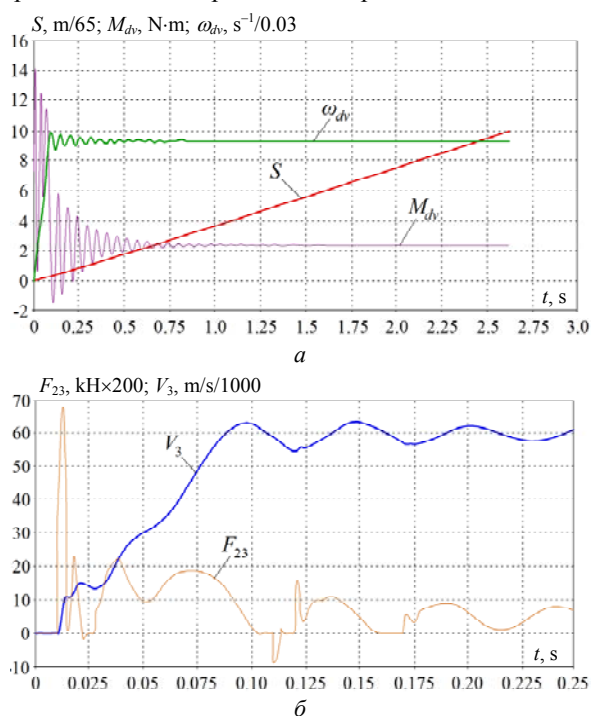


Рис. 9. Осциллограммы переходных процессов для трехмассовой структуры с последовательным соединением масс:  
а – угловая скорость, перемещение и момент АД;  
б – сила и скорость

Возникновение колебаний в кинематической линии СП подтверждается исследованиями состояния переводных поверхностей, где видны волнообразные следы, которые формируются вследствие упругих колебаний остряков в процессе их перевода (рис. 10).



Рис. 10. Состояние переводных поверхностей СП

Характерные затиры, имеющиеся на обеих подушках, указывают на возникающие упругие колеба-

ния в обеих тягах и приводящие к колебанию обоих остряков, что подтверждает необходимость рассмотрения ЭП СП как трехмассовой ЭМС. Глубина и ширина волнообразных образований, по наблюдениям обслуживающего персонала, зависит от наличия и величины «люфтов» в кинематической линии стрелочного перевода.

**Выводы.** Впервые разработана математическая и имитационная модели электропривода стрелочного перевода в виде двух- и трехмассовой электромеханической системы на основе двигателей постоянного и переменного тока как основного исполнительного элемента системы автоматизации железных дорог Украины. В качестве объекта моделирования были взяты исходные данные наиболее распространенного стрелочного перевода СП-6м. Показана необходимость учета при моделировании электромеханической системы стрелочного перевода величины зазоров и динамики их изменения для учета процессов, происходящих в механической подсистеме. Разброс величин отклонения основных координат электропривода стрелочного перевода при переходных процессах, полученных методом имитационного моделирования и экспериментальным путем, не превышает 5 %.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Kolomiets V.V., Bovdui I.V. Improving of electromechanical servo systems accuracy. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no. 6, pp. 33-37. doi: 10.20998/2074-272X.2018.6.04.
2. Buriakovskiy S., Smirnov V., Asmolova L., Obruch I., Rafalskiy O., Maslii A. Analysis of optimization criteria for the process of switch displacement in a DC railroad turnout. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, vol. 6, no. 2 (102), pp. 58-69. doi: 10.15587/1729-4061.2019.187580.
3. Sokol Y.I., Buryakovskiy S.G., Maslii Ar.S. Energy-efficient electric drive of multifunctional turnout. *Problemy Kolejnictwa*, 2014, no. 165, pp. 99-107.
4. Lagos R.F., San Emeterio A., Vinolas J., Alonso A., Aizpun M. The influence of track elasticity when travelling on a railway turnout. *Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, 2014, p. 11. doi: 10.4203/ccp.104.208.
5. Papacek F. Turnout of new construction. *International Railway Journal*, 2000, no. 3, pp. 30-32.
6. Krishnan R. *Switched reluctance motor drives. Modeling, simulation, analysis, design and applications*. CRC Press, 2001. 432 p. doi: 10.1201/9781420041644.
7. Резников Ю.М. Стрелочные электроприводы электрической и горочной централизации. М: Транспорт, 1975. – 152 с.
8. Вестник Латвийских железных дорог [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ita.times.lv/Automatika/Otzimi1.html>.
9. Глюзберг Б.Э. Классификация дефектов и повреждений элементов стрелочных переводов. М: Транспорт, 1996. – 87 с.
10. Акимов Л.В., Колотило В.И., Марков В.С. Динамика двухмассовых систем с нетрадиционными регуляторами скорости и наблюдателями состояния. Х.: ХГПУ, 2000. – 93 с.

#### REFERENCES

1. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Kolomiets V.V., Bovdui I.V. Improving of electromechanical servo systems accuracy. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no. 6, pp. 33-37. doi: 10.20998/2074-272X.2018.6.04.
2. Buriakovskiy S., Smirnov V., Asmolova L., Obruch I., Rafalskiy O., Maslii A. Analysis of optimization criteria for the

- process of switch displacement in a DC railroad turnout. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, vol. 6, no. 2 (102), pp. 58-69. doi: 10.15587/1729-4061.2019.187580.
3. Sokol Y.I., Buryakovskiy S.G., Masliy Ar.S. Energy-efficient electric drive of multifunctional turnout. *Problemy Kolejnictwa*, 2014, no. 165, pp. 99-107.
  4. Lagos R.F., San Emeterio A., Vinolas J., Alonso A., Aizpun M. The influence of track elasticity when travelling on a railway turnout. *Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, 2014, p. 11. doi: 10.4203/ccp.104.208.
  5. Papacek F. Turnout of new construction. *International Railway Journal*, 2000, no. 3, pp. 30-32.
  6. Krishnan R. *Switched reluctance motor drives. Modeling, simulation, analysis, design and applications*. CRC Press, 2001. 432 p. doi: 10.1201/9781420041644.
  7. Resnikov J.M. Strelachnye elektroprivody elektricheskoy i gorochnoj centralizacii [Switch electric drives of electric and mining centralization]. Moscow. Transport Publ., 1975. – p.152.
  8. *Latvian Railways Newsletter*. Available at: <http://ita.times.lv/Automatika/Otzimi1.html> (assessed 19 February 2020).
  9. Gluzberg B.E. *Klassifikacija defektov i povrezhdenij elementov strelachnyh perevodov* [Classification of defects and damage to the elements of the switchgears]. Moscow. Transport Publ., 1996. 87 p. (Rus).
  10. Akimov L.V., Kolotilo V.I., Markov V.S. *Dinamika dvuhmassovyh sistem s netradicionnymi reguljatorami skorosti i nabljudateljami sostojanija* [Dynamics of two-mass systems with non-traditional speed controllers and state observers]. Kharkiv, KhSPU Publ., 2000. 93 p. (Rus).

Поступила (received) 22.05.2020

Буряковский Сергей Геннадиевич<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
 Маслий Артем Сергеевич<sup>2</sup>, к.т.н., доц.,  
 Пасько Ольга Владимировна<sup>2</sup>, к.т.н., доц.,  
 Смирнов Василий Васильевич<sup>3</sup>, к.т.н.,

<sup>1</sup> НИПКИ «Молния»

Национальный технический университет  
 «Харьковский политехнический институт»,  
 61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,  
 e-mail: sergbyr@i.ua

<sup>2</sup> Украинский государственный университет  
 железнодорожного транспорта,  
 61050, Харьков, пл. Фейербаха, 7,  
 e-mail: a.masliy@ukr.net, zamdek@kart.edu.ua

<sup>3</sup> ЧАО «ЭЛАКС»,  
 61085, Харьков, ул. Акад. Проскуры, 5а, корп. 12,  
 e-mail: v.smirnov@elaks.kharkov.ua

S.G. Buriakovskiy<sup>1</sup>, A.S. Masliy<sup>2</sup>, O.V. Pasko<sup>2</sup>, V.V. Smirnov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya»,  
 National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
 2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

<sup>2</sup> Ukrainian State University of Railway Transport,  
 7, Feierbakh Square, Kharkiv, 61050, Ukraine.

<sup>3</sup> Company «ELAKS»,

5а, build. 12, Ac. Proskura Str., Kharkiv, 61085, Ukraine.

### Mathematical modelling of transients in the electric drive of the switch – the main executive element of railway automation.

**Goal.** To develop a mathematical and imitation model of the electric drive of the railroad switch as a two- and three-mass electromechanical system based on DC and AC motors as the main executive element of railway automation. The modelling is based on the parameters of the SP-6m switches as the main modification of the executive element of the Ukrainian domestic railways automation system. **Methodology.** The authors have presented the mechanical part of the railroad switch as a three-mass construction scheme with serial connection of elastic masses. Special attention is paid to the character of the movement of the switch point tongues, when describing them in the form of two- and three- mass kinematic schemes, as well as to the mechanical state of the traction and connections as nodes, which are most sensitive to the negative effects of some modes of the railroad switch. **Results.** A simulation mathematical model of SP-6m switch for AC and DC motors, which allows to study the influence of various factors, has been developed and tested at the stand of the Automation Laboratory of the Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv. The deviation in the basic parameters of the switch translation process is less than 5 %. **Originality.** For the first time a mathematical model of an electric drive of the railroad switch is developed, which takes into account elastic relations and load characteristics as an object of controlling the speed of movement of switch point tongues. **Practical significance.** We have created a mathematical model of the electric drive of the railroad switch which allows to examine the influence of various factors, including the influence of the environment on the operation of the switch. References 10, table 1, figures 10.

**Key words:** electric drive of the railroad switch; electromechanical switch system.