

УДК 621.313.323

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Член-корреспондент АН Армянской ССР Г. Л. Арешян

Устойчивость линейного синхронного двигателя со сверхпроводящими обмотками возбуждения при малых боковых смещениях

(Представлено 10/IV 1987)

Рассмотрена задача определения областей устойчивости при боковой стабилизации линейного синхронного двигателя без ферромагнитного магнитопровода, с двумя трехфазными статорными обмотками на путевом (левая S1, правая S2), включенными по нуль-схеме, и со сверхпроводящими обмотками возбуждения, расположенными на левом R1 и правом R2 бортах мотор-вагона высокоскоростного наземного транспорта (1). Задача решается для квазистационарных электромагнитных процессов: без учета краевых эффектов (обусловленных конечной длиной систем возбуждения R1 и R2 на мотор-вагоне); без учета высших пространственных и временных гармоник магнитодвижущих сил.

Исходной является нижеследующая система уравнений в комплексной плоскости Горева—Парка для электрических контуров длиной 2τ, которые на участках этой же длины включены по нуль-схеме

$$\begin{aligned} \dot{u} &= (r_c + jX_c) \dot{I}_k + j\omega \psi_{ik}; \quad X_c = \omega L_c; \\ \psi_{RK} &= M_k i_{RK}; \quad i_{RK} = I_f - \frac{3}{2} \frac{M_k}{L_R} I_{dk}; \\ \dot{I}_k &= I_{dk} + j I_{qk}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $k=1, 2$ соответственно для левой (S1—R1) и правой (S2—R2) электромагнитно взаимодействующих систем обмоток. Ток запитки I_f принят одинаковым для всех обмоток возбуждения.

Амплитуды коэффициентов взаимоиндуктивностей заданы выражениями:

$$M_1 = M_0 \exp[-\alpha(a_p - \delta)]; \quad M_2 = M_0 \exp[-\alpha(a_p + \delta)], \quad (2)$$

где δ —боковое смещение продольной оси мотор-вагона относительно центральной продольной оси путевода; $a_p = a - b$ —расчетная полуширина ($2a$ —ширина путевода, $2b$ —ширина мотор-вагона, определяемые расстояниями между плоскостями, в которых расположены обмотки S1 S2 и R1 R2).

Линейная скорость мотор-вагона v определяет круговую частоту в (1)

$$\omega = \pi \frac{v}{2\tau}, \quad (3)$$

где τ — полюсное деление.

При определении механических и электромагнитных сил, действующих на мотор-вагон, принята следующая координатная система, жестко связанная с путеводом: положительная ось OX совпадает с центральной продольной осью путевода и направлена в сторону аксиального движения мотор-вагона; положительная ось OY перпендикулярна центральной продольной оси путевода и направлена в сторону левой системы статорных обмоток $S1$ (таким образом, плоскость OXY совпадает с плоскостью путевода); положительная ось OZ направлена перпендикулярно этой плоскости. В соответствии с постановкой задачи движение центра масс мотор-вагона вдоль оси OZ не рассматривается и считается, что Z -овая координата центра масс мотор-вагона остается неизменной.

Дифференцируя энергию взаимодействия для систем $S1-R1$ и $S2-R2$ длиной 2τ соответственно по координатам X и Y , получаем следующие выражения для электромагнитных сил: тяговые силы (по оси X)

$$T_1 = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} M_1 i_{R1} I_{q1}; \quad T_2 = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} M_2 i_{R2} I_{q2}; \quad (4)$$

боковые силы (по оси Y)

$$F_1 = \frac{3}{2} \alpha M_1 i_{R1} I_{d1}; \quad F_2 = -\frac{3}{2} \alpha M_2 i_{R2} I_{d2}. \quad (5)$$

Результирующие силы, действующие на мотор-вагон:

$$T_R = T_1 + T_2; \quad F_R = F_1 + F_2. \quad (6)$$

В случае движения мотор-вагона без бокового смещения ($\delta=0$), ввиду геометрической и электромагнитной симметрии систем $S1-R1$ и $S2-R2$, соответствующие переменные в (1) и (2) становятся равными друг другу:

$$I = I_1 = I_2; \quad I_d = I_{d1} = I_{d2}; \quad I_q = I_{q1} = I_{q2}; \quad (7)$$

$$\psi_R = \psi_{R1} = \psi_{R2}; \quad i_R = i_{R1} = i_{R2}; \quad M = M_1(0) = M_2(0).$$

Тяговые и боковые силы в (4) и (5) при $\delta=0$ равны

$$T = T_1(0) = T_2(0) = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} M i I_q; \quad (8)$$

$$F = F_1(0) = -F_2(0) = \frac{3}{2} \alpha M i_R I_d.$$

И в соответствии с (6) для такого движения имеем

$$T_R(0) = 2T; \quad F_R(0) = 0. \quad (9)$$

Движение линейного двигателя при отсутствии бокового смещения

будем называть невозмущенным движением. При невозмущенном движении система (1) примет вид (см. уравнения (7))

$$\dot{u} = (r_c + jX_c)(I_d + jI_q) + j\omega\psi_R; \quad \psi_R = M \cdot i_R; \quad (10)$$

$$i_R = I_f - \frac{3}{2} \frac{M}{L_R} I_d$$

Как следует из уравнений (10), если заданы I_d и I_q , то однозначно определяются \dot{u} , i_R и ψ_R и с учетом (8) вычисляются тяговое T и боковое F усилия. Системы (8) и (10) допускают и другую возможность, а именно, задавать величины и знаки T и F и определять все остальные переменные: \dot{u} , I_d , I_q , i_R и ψ_R . При этом остается еще один свободный параметр линейного двигателя — величина первоначального тока запитки сверхпроводящих обмоток возбуждения I_f . Такой выбор того или иного режима работы линейного двигателя при невозмущенном движении будем называть „настройкой“ режима работы. Из всего множества различных режимов настройки необходимо выбрать такие, которые при возмущении (малое боковое смещение $\delta \neq 0$) обеспечивают устойчивость движения мотор-вагона.

Условие боковой устойчивости имеет вид:

$$\begin{aligned} dF_R < 0 \quad \text{при} \quad \delta > 0; \\ dF_R > 0 \quad \text{при} \quad \delta < 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Физически условие (11) гарантирует, что при смещении мотор-вагона в сторону системы S1 (левая сторона путевода), т. е. при $\delta > 0$, возникающее результирующее боковое усилие будет стремиться оттолкнуть мотор-вагон от левого борта путевода (так как усилие направлено вдоль отрицательной оси OY), а при $\delta < 0$, т. е. при смещении мотор-вагона в сторону правого борта путевода, возникающее результирующее усилие будет направлено вдоль положительной оси OY, т. е. отталкивать мотор-вагон от правого борта путевода. Эффективность боковой стабилизации будет зависеть от величины коэффициента стабилизации, равного

$$K_c = - \frac{dF_R}{\delta}, \quad (12)$$

где в области устойчивости $K_c > 0$ и представляет силу отталкивания при смещении мотор-вагона на единицу длины.

Таким образом, при $K_c > 0$ обеспечивается боковая стабилизация, и эта стабилизация тем «жестче», чем больше величина K_c . При $K_c \leq 0$ боковая стабилизация отсутствует и система относительно малых боковых смещений является неустойчивой.

Анализ устойчивости и определения области устойчивости в зависимости от параметров проведены на основе системы уравнений, в которых переменные представлены в приращениях (с точностью до малых второго порядка) в окрестности точки $\delta = 0$ (невозмущенное движение).

Уравнения в приращениях получены из уравнений (1) ÷ (6) с учетом уравнений невозмущенного движения и имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} a_{11}x_1 - a_{12}x_2 &= A_1; & a_{11}y_1 - a_{12}y_2 &= 0; \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 &= A_2; & a_{21}y_1 + a_{22}y_2 &= -B\bar{\delta}; \\ x_3 &= -k_f x_1; & y_3 &= -k_f y_1 - k_f \bar{\delta}; \\ x_4 &= x_3; & y_4 &= y_3 + \bar{\delta}; \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Приращения результирующих сил имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} dT_k &= 2T(x_2 + x_3) = 3 \frac{\pi}{\tau} M i_f I_q (x_2 + x_3); \\ dF_k &= 2F(y_1 + y_3 + \bar{\delta}) = 3\alpha M i_R I_d (y_1 + y_3 + \bar{\delta}) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \operatorname{Re}\left(\frac{d\dot{u}}{u_0}\right); & A_2 &= \operatorname{Im}\left(\frac{d\dot{u}}{u_0}\right); & B &= (1 - k_f) \frac{\omega \psi_R}{u_0}; \\ a_{11} &= \frac{r_c I_d}{u_0}; & a_{12} &= \frac{x_c I_q}{\dot{u}_0}; & a_{21} &= \frac{x_c I_d}{u_0} - k_f \frac{\omega \psi_R}{u_0}; \\ a_{22} &= \frac{r_c I_q}{u_0}; & k_f &= \frac{I_f - i_R}{i_R}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

u_0 — амплитуда базового напряжения; $\bar{\delta} = x\delta$ — боковое смещение в относительных единицах.

Величины I_d, I_q, i_R, ψ_R в (14) и (15) соответствуют режиму настройки в невозмущенном движении.

Реальная $\operatorname{Re}(d\dot{u})$ и мнимая $\operatorname{Im}(d\dot{u})$ части приращения комплекса напряжения $d\dot{u}$ принимаются за независимые величины, которые формируются системой управления при возникновении бокового смещения.

Через x_i и y_i в (13) и (14) обозначены:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{dI_{d1} + dI_{d2}}{2I_d}; & x_2 &= \frac{dI_{q1} + dI_{q2}}{2I_q}; & x_3 &= \frac{di_{R1} + di_{R2}}{i_R}; \\ x_4 &= \frac{d\psi_{R1} + d\psi_{R2}}{2\psi_R}; & y_1 &= \frac{dI_{d1} - dI_{d2}}{2I_d}; & y_2 &= \frac{dI_{q1} - dI_{q2}}{2I_q}; \\ y_3 &= \frac{di_{R1} - di_{R2}}{2i_R}; & y_4 &= \frac{d\psi_{R1} - d\psi_{R2}}{2\psi_R}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

При выводе уравнений (13) принято, что при малом боковом смещении аксиальная линейная скорость не успевает измениться к моменту времени, когда переходные процессы в электрических контурах затухнут, ввиду чего $\omega = \text{const}$.

Рассмотрим упрощенный случай, когда

$$A_1 = A_2 = 0; \quad r_c/x_c = 0 \quad (a_{11} = a_{22} = 0). \quad (17)$$

Выражения (14) при решении системы (13) с учетом условий (17) принимают вид:

$$dT_R = 0; \quad (18)$$

$$dF_R = 3\alpha M i_R I_d (1 - k_f) \frac{(1 - k_f) \frac{\omega \psi_R}{u_0}}{\frac{x_c I_d}{u_0} - k_f \frac{\omega \psi_R}{u_0}} \cdot \bar{\delta}. \quad (19)$$

Уравнение (18) показывает, что при малом боковом смещении результирующее тяговое усилие не изменяется (при условиях (17)) и, следовательно, аксиальная скорость движения не будет изменяться, ввиду чего предположение $\omega = \text{const}$ будет иметь место не только для малых интервалов времени непосредственно после смещения, но и в последующие моменты времени и остается справедливым для любых режимов настройки.

Для анализа на боковую устойчивость выражение (19) необходимо преобразовать, выразив с помощью уравнений $\psi_R = M i_R$ и $i_R = I_f - \frac{3}{2} M I_d$ (см. уравнения (10)) величины ψ_R и i_R через I_d .

После преобразования получено

$$dF_R = 3 \frac{\alpha u_0^2}{\omega x_c} \cdot \frac{\Phi(\eta)}{1 - \sigma} \cdot \bar{\delta}, \quad (20)$$

где

$$\Phi(\eta) = c_0(c_1 - \eta)(\eta - c_2); \quad (21)$$

$$\left. \begin{aligned} c_0 = 2\sigma(1 + \sigma); \quad c_1 = \frac{e_0}{2\sigma}; \quad c_2 = \frac{e_0}{1 + \sigma}; \\ e_0 = \frac{\omega \psi_R^0}{u_0} = \frac{\omega M I_f}{u_0}; \quad \sigma = \frac{3}{2} \cdot \frac{M^2}{L_R L_c}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Переменная η в уравнении (20)

$$\eta = \frac{x_c I_d}{u_0} \quad (23)$$

пропорциональна продольному току в режиме настройки, выражена в относительных единицах и является параметром режима настройки, по которому проводится анализ боковой устойчивости линейного двигателя.

Величины i_R и ψ_R выражаются через η следующими уравнениями:

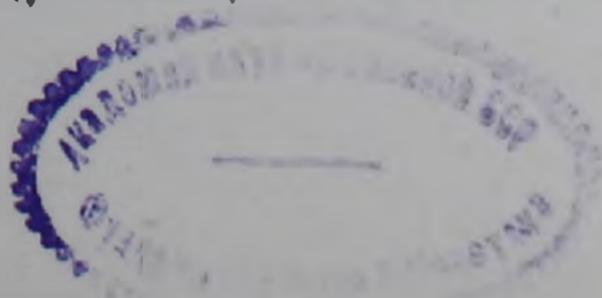
$$i_R = I_f - \sigma \frac{u_0}{\omega M} \cdot \eta; \quad (24)$$

$$\psi_R = M I_f - \sigma \frac{u_0}{\omega} \eta.$$

Коэффициент стабилизации равен (см. уравнения (12) и (20))

$$K_c = -3 \frac{\alpha^2 u_0^2}{\omega x_c} \cdot \frac{\Phi(\eta)}{1 - \sigma}. \quad (25)$$

Исходя из требования $K_c > 0$ (условие устойчивой стабилизации)



для двух случаев значений σ получены следующие области устойчивой стабилизации относительно параметра η :

При $\sigma < 1$

$$\left. \begin{array}{l} -\infty < \eta < c_2; \\ c_1 < \eta < +\infty, \end{array} \right\} \quad (26)$$

причем $c_1 > c_2$.

При $\sigma > 1$

$$c_1 < \eta < c_2, \quad (27)$$

причем $c_2 > c_1$.

Уравнения (20) ÷ (25) позволяют проанализировать устойчивость боковой стабилизации для линейного синхронного двигателя с обычными (теплыми) обмотками возбуждения. Для такого двигателя в уравнениях (20) ÷ (25) необходимо принять $\varepsilon = 0$ (это ясно видно из уравнения (24), так как при обычных теплых обмотках возбуждения необходимо обеспечить выполнение условия $i = I_f$ для любых I_d). Получаем соответственно

$$dF^* = 3 \frac{\alpha u_0^2}{\omega \chi_c} \cdot (\eta^* - e_0) e_0 \delta; \quad (28)$$

$$K_c^* = -3 \frac{\alpha^2 u_0^2}{\omega \chi_c} (\eta^* - e_0) e_0. \quad (29)$$

Область устойчивости боковой стабилизации линейного синхронного двигателя с теплыми обмотками находится в области (когда $K_c^* > 0$)

$$\eta^* < e_0, \quad (30)$$

что дает

$$I_d^* < \frac{M}{L_c} I_f, \quad (31)$$

где I_f — ток возбуждения теплых обмоток, который не регулируется при переходе от невозмущенного движения к режиму $\delta \neq 0$.

Таким образом, можно утверждать, что: 1. Для получения устойчивости системы в случае $\sigma > 1$ настройку невозмущенного режима желательно производить для значений $\eta = \eta_{\max} = 0,5 (C_1 + C_2)$. Такая настройка обеспечивает максимум функции $\Phi(\eta)_{\max} = 0,5 (c_1 - c_2)^2$ и равноудаленность η_{\max} от точек c_1 и c_2 , в которых система начинает терять устойчивость боковой стабилизации.

2. Для получения устойчивости системы в случае $\sigma < 1$ настройку системы целесообразно производить для значений $\eta \leq 0$, при $\eta = 0$ продольная составляющая тока $I_d = 0$ и система работает в режиме $\cos \varphi$, близком к единице. При $\eta = 0$ и $\delta = 0$ величина $\Phi(\eta = 0) = -e_0^2$ и коэффициент стабилизации

$$K_c = 3 \frac{(\alpha u_0 e_0)^2}{\omega \chi_c} = 3 \frac{(\alpha M I_f)^2}{L_c}. \quad (32)$$

3. При требовании обеспечить более „жесткую“ стабилизацию

при $\sigma < 1$ величину η при настройке необходимо выбирать $\eta < 0$, исходя из получения заданной величины K_c .

Ереванский политехнический институт
им. К. Маркса

Հայկական ՍՍՀ ԳԱ թղթակից անդամ Գ. Լ. ԱՐՆՇՅԱՆ

Գերհաղորդիչ գրգռման փաթույթներով գծային սինխրոն շարժիչի կայունացումը փոփոխ կողային շեղումների դեպքում

Գերհաղորդիչ գրգռման փաթույթով գծային սինխրոն շարժիչի էլեկտրական շղթաների հանրահաշիվական հավասարումների հիման վրա, ստացված են գծայնացված հավասարումներ ըստ ուժերի, շարժիչ-վալցոն կողային փոքր շեղումների դեպքում:

Որոշված են կողային շեղումների կայունացման դոնաները, դրոյական սխեմայով ստատորային փաթույթների միացված լինելու դեպքում:

Հալքի ուժի մի ընտրման, կողային շեղումների և ազատ շարժման կայունությունն ապահովելու համար կատարված են առաջարկություններ:

ЛИТЕРАТУРА — ԿՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

¹ В. И. Бочаров, В. Д. Нагорский. Высокоскоростной наземный транспорт с линейным приводом и магнитным подвесом, Транспорт, М., 1985.