

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Э. М. ДИЛАНЯН, Э. М. АГАБАВЯН, Г. К. АСТАБАТЦЯН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИИ
 ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО
 ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ ПРИ ПОВОРОТЕ

При повороте колесных машин высокой проходимости с индивидуальным электроприводом каждого колеса появляется возможность улучшения статистических и динамических параметров поворотливости и управляемости [1], по сравнению с соответствующими параметрами дифференциального привода автомобилей, путем оптимального распределения тяговых усилий и скоростей между электродвигателями колес, в зависимости от скорости движения и угла поворота.

Для синтеза системы автоматического управления индивидуальными электроприводами электромобиля с четырьмя ведущими колесами, необходимо знать законы распределения скоростей и требуемых тяговых моментов на каждом колесе, удовлетворяющие условию обеспечения поворота машины с возможно меньшим радиусом поворота, при наименьшей затрате мощности двигателя и создании наиболее благоприятных контактных условий с грунтом [1]. В литературе приводится лишь анализ криволинейного движения с наперед заданными связями (например, дифференциальная связь колес).

В данной статье, на основании анализа кругового движения, определены законы распределения тяговых усилий и угловые скорости вращения колес. Из полученных закономерностей определены требуемые механические характеристики тягового электропривода и синтезирована схема автоматического управления индивидуальными тяговыми электроприводами.

Для определения сил и реакций, действующих на колеса электромобиля при круговом движении, рассмотрим линеаризованные уравнения, характеризующие движения одномассовой пространственной модели [2].

При круговом движении линейная скорость электромобиля (V) постоянная величина, и уравнения статики принимают следующий вид:

$$\sum X = 0; \quad X_1' + X_1'' + X_2' + X_2'' - P_w - Y_1\theta_1 + P_{cX} = 0; \quad (1)$$

$$\sum Y = 0; \quad Y_1 + X_1\theta_1 + Y_2 - P_{cY} = 0; \quad (2)$$

$$\sum Z = 0; \quad Z_1' + Z_1'' + Z_2' + Z_2'' - G = 0; \quad (3)$$

$$\sum M_{OZ} = 0; \quad Y_1L + X_1\theta_1L + \frac{B}{2}(X_2'' - X_2') + \frac{B}{2}(X_1'' - X_1') = 0; \quad (4)$$

$$\sum M_{OY} = 0; \quad -Z_2L + P_{cX}h_{н.т} + Gb - \sum M_{kf} - P_w h_{к.т} = 0; \quad (5)$$

$$\sum M_{Ox} = 0; \quad -(Z'_1 + Z'_2) \frac{B}{2} + (Z''_1 + Z''_2) \frac{B}{2} - P_{cy} h_{a,\tau} = 0, \quad (6)$$

- где X'_1, X''_1, X'_2, X''_2 — касательные реакции, действующие на колеса;
 Z'_1, Z''_1, Z'_2, Z''_2 — нормальные реакции, действующие на колеса;
 $X_1 = X'_1 + X''_1$ — сумма касательных реакций, действующих на передние колеса;
 $X_2 = X'_2 + X''_2$ — сумма касательных реакций, действующих на задние колеса;
 Y_1 и Y_2 — сумма боковых реакций, действующих на передние и задние колеса;
 Z_1 и Z_2 — сумма нормальных реакций, действующих на передние и задние колеса;
 θ_1 — средний угол поворота управляемых колес;
 $\sum M_{kf}$ — сумма моментов сопротивления качению всех колес;
 B и L — колея и база автомобиля (средние величины);
 b — расстояние от задней оси до центра тяжести машины;
 G — полный вес автомобиля;
 $h_{a,\tau}$ — расстояние от опорной поверхности до центра тяжести машины;
 P_w — сила сопротивления воздуха;
 P_{cx}, P_{cy} — проекции центробежной силы на оси X и Y ;

индексы 1 и 2 относятся, соответственно, к передней и задней осям, а индексы ' и '' — к внутренним и внешним (по отношению к центру поворота) колесам.

Как видно из уравнений (1) ÷ (6), задача определения реакций является статически неопределимой. Для получения недостающих уравнений использованы следующие зависимости:

— условия равенства касательных реакций:

$$X'_1 = X''_1; \quad X'_2 = X''_2; \quad X_1 = X_2; \quad (7)$$

— выражения, связывающие боковые реакции, действующие на колеса каждой оси, и параметры, характеризующие углы увода этих осей:

$$Y_1 = K_{Y1} \left(\theta_1 - \frac{L-x}{R} \right); \quad (8)$$

$$Y_2 = K_{Y2} \left(\frac{x}{R} \right), \quad (9)$$

где K_{Y1} и K_{Y2} — суммарные коэффициенты сопротивления уводу передних и задних колес, соответственно; x — расстояние от задней оси до полюса поворота; R — радиус поворота.

Учитывая известное из курса теории автомобиля выражение для касательных реакций ($X = P_{\tau} - fZ$) и условие равенства касательных реакций (7), получим выражения для определения распределения тяговых усилий между осями и колесами электромобиля:

$$P_{\tau 1} = \frac{P_{\tau, \text{полн}} + f(Z_1 - Z_2)}{2}; \quad P_{\tau 2} = P_{\tau, \text{полн}} - P_{\tau 1}; \quad (10)$$

$$P'_{\tau 1} = \frac{P_{\tau 1} + f(Z'_1 - Z'_1)}{2}; \quad P^*_{\tau 1} = P_{\tau 1} - P'_{\tau 1}; \quad (11)$$

$$P'_{\tau 2} = \frac{P_{\tau 2} + f(Z'_2 - Z'_2)}{2}; \quad P^*_{\tau 2} = P_{\tau 2} - P'_{\tau 2}; \quad (12)$$

где $P_{\tau, \text{полн}}$ — полное тяговое усилие, потребное при повороте электромобиля [определяется из решения уравнений статики совместно с условиями (7)];

$P'_{\tau 1}, P'_{\tau 2}, P^*_{\tau 1}, P^*_{\tau 2}$ — потребные тяговые усилия соответствующих колес;
 f — коэффициент сопротивления качению колеса (средняя величина).

Угловые скорости вращения соответствующих колес (ω_k) определяются из условия равенства линейных скоростей в контакте колеса с опорной поверхностью:

$$\begin{aligned} \omega'_{k1} &= \frac{\omega R'_1}{r'_{k1}}; & \omega'_{k2} &= \frac{\omega R'_2}{r'_{k2}}; \\ \omega^*_{k1} &= \frac{\omega R^*_1}{r^*_{k1}}; & \omega^*_{k2} &= \frac{\omega R^*_2}{r^*_{k2}}. \end{aligned} \quad (13)$$

где $r'_{k1}, r'_{k2}, r^*_{k1}, r^*_{k2}$ — радиусы качения соответствующих колес;

ω — угловая скорость поворота электромобиля;

R'_1, R'_2, R^*_1, R^*_2 — расстояния от мгновенного центра поворота до точки соприкосновения соответствующего колеса с опорной поверхностью.

Радиусы качения колес можно определить по выражению [2, 3]

$$r_k = r_{k0} \left(1 - \varepsilon_x \frac{X}{Z} \right), \quad (14)$$

где r_{k0} — радиус качения колеса в свободном режиме ($X = 0$);

ε_x — удельный коэффициент тангенциальной эластичности шины.

Задаваясь значениями угла поворота Θ_1 при постоянной величине скорости движения V , по вышеприведенным уравнениям определяются потребные тяговые усилия и угловые скорости соответствующих колес.

Зная закон распределения тяговых моментов, а также угловые скорости колес, можно определить законы регулирования напряжениями индивидуальных электроприводов многодвигательного электроавтомобиля при круговом движении в зависимости от угла Θ_1 и скорости V .

Ниже приводится пример определения законов управления напряжениями асинхронных электродвигателей электроавтомобиля с четырьмя ведущими колесами и передней управляемой осью.

Для асинхронного двигателя, работающего в режиме постоянства абсолютного скольжения, основным управляющим параметром является напряжение на двигателе. Воспользуемся уравнением для фазового напряжения асинхронного двигателя, работающего в режиме постоянства абсолютного скольжения, в относительных единицах [4]:

$$U_1 = \sqrt{M} \frac{\omega_d + (K_{\beta 1} + \beta)}{K_{\beta 2}}, \quad (15)$$

где U_1 , M , ω_d — соответственно фазовое напряжение, электромагнитный момент и угловая скорость вращения ротора асинхронного двигателя (АД);

$$\frac{f_2}{f_{1н}} = \beta \text{ — абсолютное скольжение АД;}$$

f_2 — частота тока ротора;

$f_{1н}$ — частота тока статора (номинальная величина).

Коэффициенты $K_{\beta 1}$ и $K_{\beta 2}$ определяются по выражениям:

$$K_{\beta 1} = \frac{r_1 r_2'^2}{\beta \left[\left(\frac{r_2'}{\beta} \right)^2 + (X_1 + X_1'/\sigma_1)^2 \right]}; \quad K_{\beta 2} = \sqrt{\frac{K_{\beta 1}}{\sigma_1^2 r_1}};$$

где r_1 , r_2' , X_1 , X_1' , σ_1 — параметры АД, определяемые при номинальной частоте тока статора.

Зная передаточное отношение от электродвигателя к колесу (i), можно определить скорость вращения ротора двигателя соответствующего колеса в относительных единицах:

$$\omega_d = i \frac{\omega_k}{\omega_{он}},$$

где $\omega_{он}$ — номинальная синхронная угловая скорость вращения поля статора.

Изменение напряжений ΔU на двигателях передней оси относительно напряжения, требуемого при прямолинейном движении электроавтомобиля с той же скоростью, определяем по выражениям:

$$\frac{\Delta U_1'}{U_{пр}} = \frac{U_{пр} - U_1'}{U_{пр}} = 1 - \frac{\omega_{d1}' + (K_{\beta 1} + \beta)}{\omega_{d,пр} + (K_{\beta 1} + \beta)} \sqrt{\frac{M_1'}{M_{пр,к}}}; \quad (16)$$

$$\frac{\Delta U_1'}{U_{пр}} = \frac{U_{пр} - U_1'}{U_{пр}} = 1 - \frac{\omega_{з.1}^2 + (K_{з1} + \beta)}{\omega_{з.пр}^2 + (K_{з1} + \beta)} \sqrt{\frac{M_1'}{M_{пр.к}}} \quad (17)$$

где $M_{пр.к}$ — тяговый момент на одном колесе, необходимый при прямолинейном движении;

M_1', M_2' — тяговые моменты соответствующих колес при круговом движении;

$$\frac{M_1'}{M_{пр.к}} = \frac{P_{т1}/r_{з.к}}{P_{т.пр}/4r_{з.к}} = \frac{4P_{т1}'}{P_{т.пр}}; \quad \frac{M_2'}{M_{пр.к}} = \frac{4P_{т2}'}{P_{т.пр}};$$

$P_{т.пр}$ — тяговое усилие, требующееся при прямолинейном движении.

Таким же образом можно найти изменение напряжений и для колес задней оси.

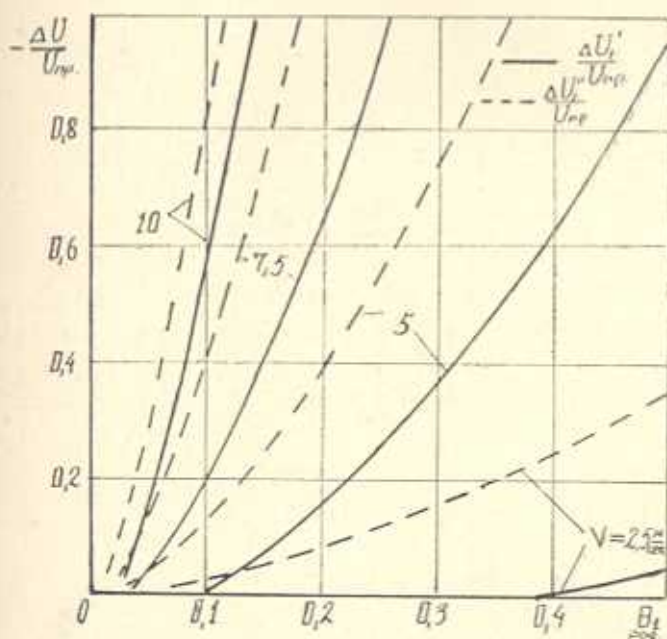
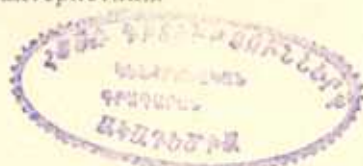


Рис. 1. Кривые изменения напряжений на двигателях колес относительно напряжения двигателя, потребного при прямолинейном движении, в зависимости от угла поворота (θ_1) и скорости движения (V).

Количественный анализ выражений (16) и (17) в зависимости от угла поворота и скорости движения проводился для электромотоцикла с параметрами:

$$G = 3300 \text{ кг}; \quad L = 2,7 \text{ м}; \quad a = b = 0,5L; \quad B = 1,5 \text{ м}; \quad L_{ш.т} = 0,8 \text{ м}; \\ \epsilon_x = 0,09; \quad kF = 0,618 \text{ кг-сек/м}; \quad i = 4; \quad K_{Y1} = K_{Y2} = 6000 \text{ кг/рад}.$$

На рис. 1 приведены расчетные характеристики.



Анализ этих характеристик для машин данного габарита показал, что в первом приближении возможно приводы каждого борта осуществить от одного преобразователя частоты.

После аппроксимации характеристик, приведенных на рис. 1, получаем выражение для ΔU , которое позволяет реализовать регулятор по Θ_1 и V :

$$\frac{\Delta U_1^*}{U_{пр}} = 3\Theta_1^2 - 5\Theta_1 + 0,064V^2 - 0,73V + 1,5\Theta_1V + 1,8. \quad (18)$$

На рис. 2 приведена структурная схема управления тяговыми электродвигателями передней оси электромобиля, работающими в режиме постоянства абсолютного скольжения.

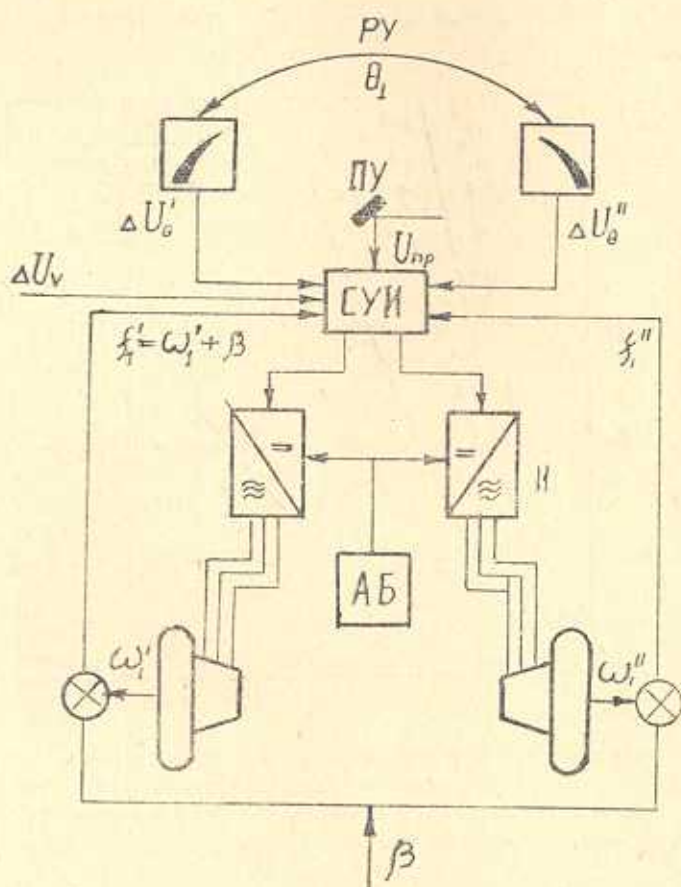


Рис. 2. Структурная схема управления электродвигателями передней оси при повороте: ПУ — педаль ускорения; РУ — рулевое управление; И — инвертор; СУИ — система управления инвертором; АБ — аккумуляторная батарея. (ΔU_v , ΔU_θ — изменение напряжений двигателей от скорости движения и угла поворота; β — абсолютное скольжение асинхронных двигателей; f_1 — частота тока статора; f_2 — частота тока ротора).

Как показали исследования, для обеспечения заданных параметров движения при повороте электромобиля с индивидуальным электроприводом переменного тока при $\beta = \text{const}$ необходимо ввести регулятор, распределяющий напряжения между двигателями колес в зависимости от величины угла поворота и скорости движения.

ЕрПИ им. К. Маркса

Поступило 5.I.1977.

Է. Մ. ԳՈՎԱՆՅԱՆ, Է. Մ. ԱՂԱԲԱՔՅԱՆ, Գ. Կ. ԱՍՏԱՐԱՏՅԱՆ

**ՊՏՈՒՅՑՆԻ ԺԱՄԱՆԱԿ ԲԱԶՄԱՇԱՐԺԻԶԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐՈՄՈԲԻԼԻ
ԷԼԵԿՏՐԱՇԱՐԺԻԶՆԵՐԻ ԼԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԿԱՐԳԱՎՈՐՄԱՆ
ՕՐԵՆՔՆԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ**

Ա մ փ ո փ ու մ

Հոդվածում դիտված են էլեկտրոմոբիլի բազմաշարժիչային էլեկտրաբանեցման ղեկավարման օրենքները որոշող հարցեր, որոնք հիմնված են շրջանային շարժման ժամանակ էլեկտրոմոբիլի վրա ազդող ուժերը և անվազողների հակազդումները դանելու հիման վրա: Բացարձակ սահքի ուժերում աշխատող քարշային ապասխինխրոն շարժիչի լարման փոփոխությունների որոշման համար ստացված են արտահայտություններ, կախված ղեկի պտտման անկյունից և էլեկտրոմոբիլի արագությունից: Մոտարկումից հետո լարման փոփոխության արտահայտություններից ստացված է հավասարում, որի հիման վրա իրականացվում է լարման կարգավորիչը:

Բերված է էլեկտրոմոբիլի բազմաշարժիչային էլեկտրաբանեցման կառուցվածքային սխեման:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Фаробин Я. Е. Теория поворота транспортных машин, М, 1970.
2. Литвинов А. С. Управляемость и устойчивость автомобиля, М, 1971.
3. Чудаков Е. А. Избранные труды, т. I, М., 1961.
4. Диланян Э. М., Агабабян Э. М., Асрабагцян Г. К. Управление электроприводом электромобиля. Сб. научн. трудов ЕрПИ, вып. 13, 1974.