

УДК 631.37

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТНОГО РУХУ БЛОКОВО-МОДУЛЬНОГО МТА

Надикто В.Т., д.т.н.,

Аюбов А.М., к.т.н.,

Парахін О.О. асп.<sup>1</sup>*Таврійський державний агротехнологічний університет*

Тел. (0619) 42-06-94

**Анотація** – розроблено математичну модель транспортного руху блоково-модульного машинно-тракторного агрегату у горизонтальній площині

**Ключові слова** – математична модель, блоково-модульний МТА, модульний енергетичний засіб, енергетичний модуль, технологічний модуль

*Постановка проблеми.* В роботі [1] було встановлено, що для підвищення стійкості і керованості транспортного руху блоково-модульного МТА слід розробити таке технічне рішення, яке б дозволило усунути недоліки існуючої системи з'єднання технологічного (ТМ) і енергетичного (ЕМ) модулів МЕЗ у горизонтальній площині.

Керованість руху розглядуваного блоково - модульного машинно-тракторного агрегату доцільно розглядати у вигляді реакції на керуючий, а стійкість – у вигляді реакції на збурювальний впливи. У якості першого із них приймаємо коливання кута повороту керованих коліс енергетичного модуля, а у якості другого – момент сил, який діє в горизонтальній площині на технологічний модуль МЕЗ.

Основним вихідним параметром функціонування даної динамічної системи є курсовий кут ЕМ. Природа коливань цього параметра власне і визначає як стійкість, так і керованість руху боково-модульного МТА.

Характер зміни цих процесів зручно досліджувати з допомогою відповідних амплітудних (АЧХ) і фазових (ФЧХ) амплітудних характеристик. При проведенні теоретичних досліджень для їх отримання потрібна математична модель досліджуваної динамічної системи.

*Методика.* Навіть в лінійній інтерпретації математична модель представляє собою систему складних диференціальних рівнянь.

---

<sup>1</sup> - Науковий керівник д.т.н., проф. Надикто В.Т.

© д.т.н. Надикто В.Т., к.т.н. Аюбов А.М., асп. Парахін О.О.

Задля її спрощення приймаємо наступні припущення.

1. Крен та диферент агрегату на основі МЕЗ відсутні.
2. Енергетичний та технологічний модулі МЕЗ є твердими тілами, центри мас яких розташовані в одній поздовжньо-вертикальній площині симетрії.
3. Швидкість поступального руху блоково-модульного агрегату приймається постійною.
4. Бокова взаємодія шин енергетичного та технологічного модулів МЕЗ з поверхнею руху блоково-модульного МТА розглядається в рамках гіпотези «бокового уводу».
5. Гіроскопічні та стабілізуючі моменти шин коліс обох модулів МЕЗ, а також моменти їх скручуванню відносно вертикальної осі є малими.
6. Досить малі, а значить рівні між собою кути повороту керованих коліс енергетичного модуля МЕЗ.
7. Кути уводу шин коліс модулів МЕЗ, розташованих на одній геометричній вісі, а також бокові сили, що діють на них, вважаємо малими.

На території півдня України поля та транспортні маршрути між ними мають схил не більше  $3^\circ$ . Цей факт обумовлює правомірність першого припущення.

Друге припущення ґрунтується на тому, що енергетичний та технологічний модулі МЕЗ мають рамну конструкцію зі значною твердістю. Крім того, координати їх центрів мас відхиляються від поздовжньої осі симетрії на величину, не більшу за 3 см.

Багаторічною практикою доведено, що робочий рух того чи іншого МТА характеризується практично усталеною швидкістю.

Реальні коливання цього параметру настільки малі, що з достатньою для практики точністю ними можна зневажити і вважати третє припущення обґрунтованим.

Дослідження блоково-модульних агрегатів показує, що гіпотеза «бокового уводу» під час руху по траєкторіях невеликої кривизни навіть на твердих фонах дає цілком задовільні результати [2]. Це є достатньою підставою для прийняття четвертого припущення.

Правомірність п'ятого припущення обумовлюється відносно малою кутовою швидкістю повороту в горизонтальній площині усіх ланок машинно - тракторного агрегату на основі МЕЗ, а також відносно великою твердістю шин коліс його модулів при їхньому скручуванні відносно вертикальної осі.

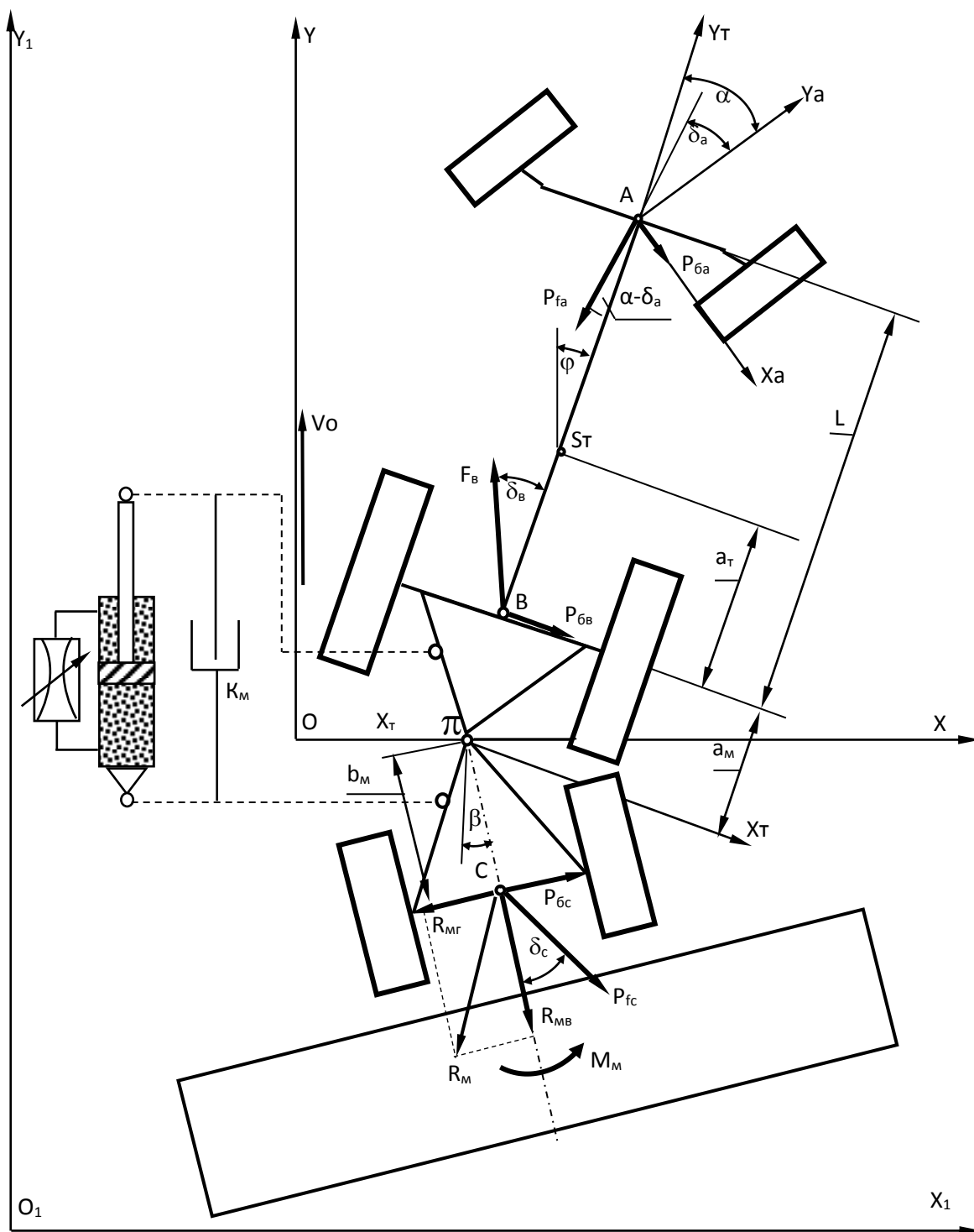


Рис. 1. Схема сил, які діють на блоково-модульний МТА у горизонтальній площині

Шосте і сьоме припущення впливають з постановки задач досліджень, які передбачають аналіз руху блоково-модульного агрегату по траєкторії невеликої кривизни за наявності малих кутових коливань енергетичного і технологічного модулів разом із навішеним знаряддям у горизонтальній площині. Кути лівого і правого передніх ке-

рованих коліс енергетичного модуля МЕЗ при цьому дуже мало відрізняються між собою. Так як і бокові сили, та ті кути «уводу», які вони викликають під час дії на блоково-модульний МТА.

*Основна частина.* З урахуванням прийнятих припущень приймаємо, що блоково-модульний агрегат рухається у площині  $Y_1O_1X_1$  з постійною швидкістю  $V_0$  (рис.1).

Центр мас МЕЗ приведено до точки  $\pi$ , що лежить на осі вертикального шарніру, який з'єднує його енергетичний та технологічний модулі. Рами ЕМ та ТМ додатково зв'язані гідроциліндром, над- і підпоршньова порожнини якого з'єднані гідравлічним шлангом з дроселем, коефіцієнт опору якого  $K_M$  (див. рис.1).

Для забезпечення переміщення блоково-модульного агрегату у транспортному режимі достатньо тягового зусилля, яке розвиває лише задній міст ЕМ [3]. Передній його міст, а також міст технологічного модуля знаходяться при цьому у веденому режимі.

Під час руху на розглядуваний МТА діють:  $P_{fa}$  – сила опору коченню передніх коліс ЕМ;  $P_{\delta a}$  – бокова сила, яка викликає кут «уводу»  $\delta_a$  шин передніх коліс енергетичного модуля МЕЗ;  $F_b$  – рушійна сила задніх коліс ЕМ;  $P_{\delta b}$  – бокова сила, яка викликає кут «уводу»  $\delta_b$  шин задніх коліс енергетичного модуля МЕЗ;  $P_{fc}$  – сила опору коченню коліс ТМ;  $P_{\delta c}$  – бокова сила, яка викликає кут «уводу»  $\delta_c$  шин коліс технологічного модуля МЕЗ;  $R_{mb}$ ,  $R_{mg}$  – поздовжня та поперечна складові головного вектора сил  $R_m$ , який діє на ТМ збоку технологічної частина МТА і прикладений у точці С (див. рис.1);  $M_m$  – головний момент зовнішніх сил. Під впливом зовнішніх сил і моментів блоково-модульний агрегат відносний рух у площині  $XOY$ . Мірою цього руху є: поперечне зміщення «приведеного» центру мас модульного енергетичного засобу (т.п) на величину  $X_T$ ; курсовий кут енергетичного модуля МЕЗ -  $\varphi$ ; кут повороту ТМ у площині  $X_1O_1Y_1$  -  $\beta$ .

Керуючим впливом при цьому є кут повороту керованих коліс ЕМ МЕЗ -  $\alpha$ .

Як бачимо, динамічна система у вигляді розглядуваного блоково-модульного МТА має три степені вільності, яким відповідають три незалежні узагальнені координати, а саме: абсциса  $X_T$  і кути  $\varphi$  та  $\beta$ .

Диференційні рівняння коливань блоково-модульного агрегату будемо складати у формі Лагранжа другого роду:

$$\frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial T_M}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T_M}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi_M}{\partial \dot{q}_i} = Q_i, \quad (1)$$

де  $T_M$  – кінетична енергія МТА;  $\Phi_M$  – дисипативна функція розсіювання динамічної системи;  $q_i$ ,  $Q_i$  – узагальнені відповідні координати та сили;  $i = 1, 3$ .

Кінетична енергія агрегату може бути знайдена із виразу:

$$T_M = (M_M \cdot V_T^2 + J_T \cdot \omega_T^2 + J_M \cdot \omega_M^2)/2,$$

де  $M_M$  – маса модульного енергетичного засобу;  $V_T$  – лінійна швидкість центру мас МЕЗ в площині  $XOY$ ;  $J_T, J_M$  – моменти інерції енергетичного і технологічного модулів МЕЗ відносно вертикальної осі, яка проходить через точку  $\pi$ ;  $\omega_T, \omega_M$  – кутова швидкість повороту енергетичного і технологічного модулів.

Стосовно модулів вказаних лінійної та кутових швидкостей маємо:

$$V_T = \dot{X}_T; \quad \omega_T = \dot{\phi}; \quad \omega_M = \dot{\beta}.$$

З урахуванням цього отримуємо:

$$T_M = (M_M \cdot \dot{X}_T^2 + J_T \cdot \dot{\phi}^2 + J_M \cdot \dot{\beta}^2)/2$$

Функція  $\Phi_M$  представляю собою роботу сили опору повороту технологічного модуля МЕЗ відносно енергетичного. Оскільки така сила пропорційна швидкості зміни узагальненої координати, то вираз для її визначення має такий вид:

$$\Phi_M = K_M \cdot (\dot{\beta})^2/2$$

Кінетична енергія динамічної системи, як відомо, залежить лише від швидкості і не залежить від узагальненої координати. В результаті маємо:

$$\frac{\partial T_M}{\partial q_i} = 0$$

Частинні похідні по швидкостях узагальнених координат дорівнюють:

$$\frac{\partial T_M}{\partial \dot{X}_T} = M_T \cdot \dot{X}_T;$$

$$\frac{\partial T_M}{\partial \dot{\phi}} = J_T \cdot \dot{\phi};$$

$$\frac{\partial T_M}{\partial \dot{\beta}} = J_M \cdot \dot{\beta}$$

Частинні похідні за часом є такими:

$$\frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial T_M}{\partial \dot{X}_T} = M_T \cdot \ddot{X}_T;$$

$$\frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial T_M}{\partial \dot{\phi}} = J_T \cdot \ddot{\phi};$$

$$\frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial T_M}{\partial \dot{\beta}} = J_M \cdot \ddot{\beta}$$

І, нарешті, знайдемо частинну похідну для дисипативної функції:

$$\frac{\partial \Phi_M}{\partial \beta} = K_M \cdot \dot{\beta}$$

З урахуванням вищевикладеного вихідна система диференціальних рівнянь (1) матиме наступний вид:

$$\left. \begin{aligned} M_M \cdot X_T &= Q_x; \\ J_T \cdot \varphi &= Q_\varphi; \\ J_M \cdot \beta + K_M \cdot \dot{\beta} &= Q_\beta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Узагальнена сила  $Q_x$  формує рух розглядуваної динамічної системи в напрямку узагальненої координати  $X_T$ . Знайти її можна із наступної залежності:

$$Q_x = P_{\bar{b}_a} \cdot \cos(\varphi + \alpha) - P_{f_a} \cdot \sin(\varphi + \alpha - \delta_a) + P_{\bar{b}_B} \cdot \cos \varphi - F_B \cdot \sin(\delta_B - \varphi) + P_{f_c} \cdot \sin(\delta_c + \beta) + R_{M_B} \cdot \sin \beta + (P_{\bar{b}_c} - R_{M_G}) \cdot \cos \beta$$

При спрощенні отриманого виразу врахуємо дві обставини. Перша – це припущення про те, що для малих кутів косинус аргументу дорівнює одиниці, а синус – приблизно самому аргументу. Друга обставина впливає з умови рівноваги даної динамічної системи, згідно з якою:

$$P_{f_a} - F_B + P_{f_c} + R_{M_B} = 0$$

В результаті маємо:

$$Q_x = P_{\bar{b}_a} - P_{f_a} \cdot (\alpha - \delta_a) + P_{\bar{b}_B} - F_B \cdot \delta_B + P_{f_c} \cdot \delta_c + P_{\bar{b}_c} - R_{M_G} \quad (3)$$

Узагальнена сила  $Q_\varphi$  представляє собою момент, який обумовлює поворот енергетичного модуля МЕЗ на кут  $\varphi$ :

$$Q_\varphi = P_{\bar{b}_a} \cdot \cos \alpha \cdot (L + a_M) - P_{f_a} \cdot \sin(\alpha - \delta_a) \cdot (L + a_M) + P_{\bar{b}_B} \cdot a_M - F_B \cdot \sin \delta_B \cdot a_M,$$

де  $L$  – база енергетичного модуля МЕЗ (див. рис.1);  $a_M$  – відстань від осі задніх коліс ЕМ до «приведеного» центру мас модульного енергетичного засобу (т.п).

З урахуванням малих кутів  $\alpha$ ,  $\delta_a$  і  $\delta_B$ , отримаємо:

$$Q_\varphi = [P_{\bar{b}_a} - P_{f_a} \cdot (\alpha - \delta_a)] \cdot (L + a_M) + (P_{\bar{b}_B} - F_B \cdot \delta_B) \cdot a_M \quad (4)$$

І, нарешті, узагальнена сила  $Q_\beta$ . Це теж момент, який спричинює поворот технологічного модуля разом з приєднаною до нього машиною/знаряддям на кут  $\beta$ . Вираз для його знаходження цієї сили є наступним:

$$Q_\beta = (R_{M_G} - P_{\bar{b}_c} - P_{f_c} \cdot \delta_c) \cdot b_M - M_M, \quad (5)$$

де  $b_M$  – відстань від осі коліс ТМ до «приведеного» центру мас модульного енергетичного засобу (т.п, див. рис.1).

Згідно із загальновідомою гіпотезою «бокового уводу» [3], бокові сили, що входять до рівнянь (3...5), можна знайти наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} P_{\delta a} &= k_a \cdot \delta_a; \\ P_{\delta b} &= k_b \cdot \delta_b; \\ P_{\delta c} &= k_c \cdot \delta_c, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

де  $k_a, k_b, k_c$  – коефіцієнти опору уводу шин коліс модулів МЕЗ.

В свою чергу, щоб визначити кути уводу  $\delta_a, \delta_b$  і  $\delta_c$ , визначимо складові векторів швидкостей точок А, В і С (див. рис.1):

$$\left. \begin{aligned} \bar{V}_A &= \bar{V}_O + \bar{V}_{X_T} + \bar{V}_{A\pi}; \\ \bar{V}_B &= \bar{V}_O + \bar{V}_{X_T} + \bar{V}_{B\pi}; \\ \bar{V}_C &= \bar{V}_O + \bar{V}_{X_T} + \bar{V}_{C\pi} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

За модулем складові системи (7) є такими:

$$\left. \begin{aligned} \bar{V}_O &= V_O; \\ \bar{V}_{X_T} &= \dot{X}_T; \\ \bar{V}_{A\pi} &= (L + a_M) \cdot \dot{\phi}; \\ \bar{V}_{B\pi} &= a_M \cdot \dot{\phi}; \\ \bar{V}_{C\pi} &= b_M \cdot \dot{\beta}; \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Геометрична інтерпретація рівнянь системи (7) представлена на рис. 2...4 відповідно.

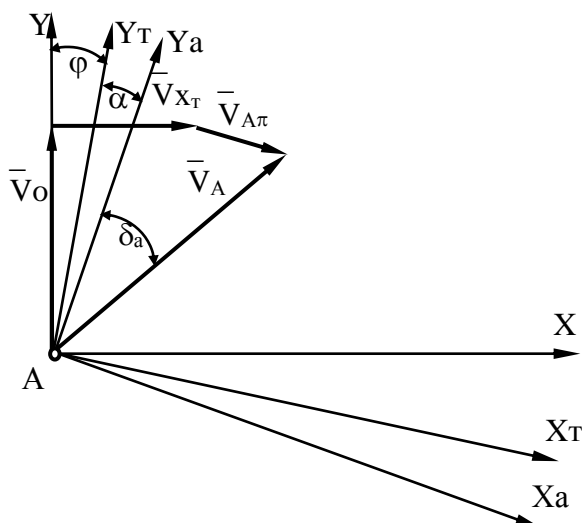


Рис.2. Векторна сума лінійної швидкості середини переднього мосту енергетичного модуля МЕЗ (т. А, рис.1).

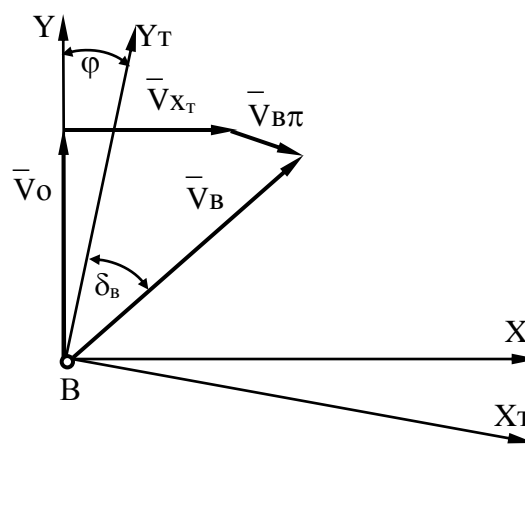


Рис.3. Векторна сума лінійної швидкості середини заднього мосту ЕМ МЕЗ (т. В, рис.1).

Підкреслимо, що задля кращого сприймання графічної інформації, на рис.1 осі  $SX_M$  і  $SY_M$  не позначено.

Як випливає із аналізу рис.2, кут уводу передніх керованих коліс енергетичного модуля МЕЗ може бути знайдений із виразу:

$$\operatorname{tg}\delta_a \approx \delta_a = \bar{V}_{AX}/\bar{V}_{AY},$$

де  $\bar{V}_{AX}, \bar{V}_{AY}$  – проекції вектора абсолютної швидкості т.А ( $V_A$ ) на осі АХа і АУа.

Вказані проекції швидкостей є такими:

$$\bar{V}_{AX} = -\bar{V}_O \cdot \sin(\varphi + \alpha) + \bar{V}_{X_T} \cdot \cos(\varphi + \alpha) + \bar{V}_{A\pi} \cdot \cos\alpha;$$

$$\bar{V}_{AY} = \bar{V}_O \cdot \cos(\varphi + \alpha) + \bar{V}_{X_T} \cdot \sin(\alpha + \varphi) + \bar{V}_{A\pi} \cdot \sin\alpha$$

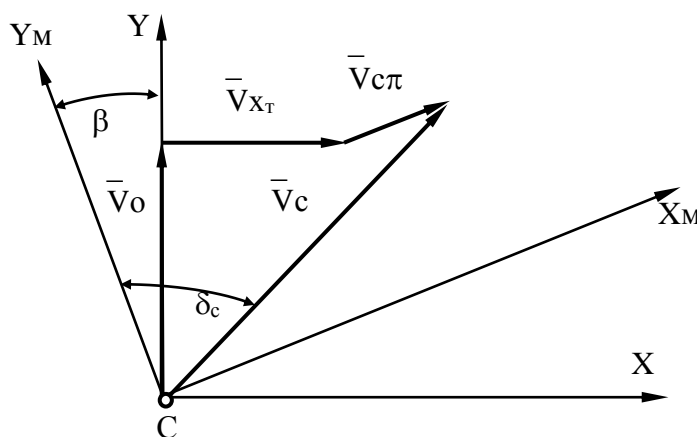


Рис. 4. Векторна сума лінійної швидкості середини моста технологічного модуля МЕЗ (т.С, рис.1)

З урахуванням рівнянь системи (8) та малих кутів  $\varphi$  і  $\alpha$ , отримуємо:

$$\begin{aligned} \bar{V}_{AX} &= -V_O \cdot (\varphi + \alpha) + \dot{X}_T + (L + a_M) \cdot \dot{\varphi}; \\ \bar{V}_{AY} &= V_O + \dot{X}_T \cdot (\alpha + \varphi) + (L + a_M) \cdot \dot{\varphi} \cdot \alpha \end{aligned} \quad (9)$$

В рівнянні (2.9) два останні доданки представляють собою добутки двох малих величин. Оскільки результат множення в обох випадках при цьому стає ще меншим, то є справедливим наступне:

$$\begin{aligned} X_T \cdot (\alpha + \varphi) &\approx 0; \\ (L + a_M) \cdot \dot{\varphi} \cdot \alpha &\approx 0. \end{aligned}$$

В результаті маємо:

$$\bar{V}_{AY} = V_O$$

Це дає можливість записати, що:

$$\operatorname{tg}\delta_a \approx \delta_a = \bar{V}_{AX}/\bar{V}_{AY} = -\varphi - \alpha + \dot{X}_T/V_O + (L + a_M) \cdot \dot{\varphi}/V_O$$

Проте, кут уводу передніх шин енергетичного модуля МЕЗ  $\delta_a$  має протилежний напрям відкладання, ніж курсовий кут  $\varphi$  та кут повороту керованих коліс  $\alpha$ . З урахуванням цього остаточно отримуємо:

$$\delta_a = - [\dot{X}_T + (L + a_M) \cdot \dot{\varphi}] / V_O + \varphi + \alpha$$



Аналогічним чином знаходимо вираз для визначення кута уводу шин задніх коліс енергетичного модуля МЕЗ  $\delta_B$ :

$$\delta_B = - [\dot{X}_T + a_M \cdot \dot{\varphi}] / V_0 + \varphi$$

Насамкінець знайдемо кут уводу шин коліс технологічного модуля МЕЗ  $\delta_C$ . По аналогії з попередніми варіантами:

$$\operatorname{tg} \delta_C \approx \delta_C = \bar{V}_{CX} / \bar{V}_{CY},$$

де  $\bar{V}_{CX}, \bar{V}_{CY}$  – проекції вектора абсолютної швидкості т.С ( $\bar{V}_C$ ) на осі  $CX_M$  і  $CY_M$ .

Ці проекції дорівнюють:

$$\begin{aligned} \bar{V}_{CX} &= \bar{V}_0 \cdot \sin \beta + \bar{V}_{X_T} \cdot \cos \beta + \bar{V}_{C\pi}; \\ \bar{V}_{CY} &= \bar{V}_0 \cdot \cos \beta - \bar{V}_{X_T} \cdot \sin \beta \end{aligned}$$

або

$$\begin{aligned} \bar{V}_{CX} &= V_0 \cdot \beta + \dot{X}_T + b_M \cdot \dot{\beta}; \\ \bar{V}_{CY} &= V_0, \end{aligned}$$

звідки

$$\delta_C = (\dot{X}_T + b_M \cdot \dot{\beta}) / V_0 + \beta$$

Враховуючи той факт, що кути  $\delta_C$  і  $\beta$  мають протилежний напрям відкладання, ніж прийнятий у якості позитивного (кути  $\alpha$  і  $\varphi$ ), остаточно отримуємо:

$$\delta_C = - [\dot{X}_T + b_M \cdot \dot{\beta}] / V_0 + \beta$$

Знаючи кути уводу та приймаючи до уваги систему рівнянь (6), можемо написати вирази для знаходження відповідних бокових сил:

$$\left. \begin{aligned} P_{\alpha} &= k_a \cdot \{ - [\dot{X}_T + (L + a_M) \cdot \dot{\varphi}] / V_0 + \varphi + \alpha \}; \\ P_{\beta} &= k_b \cdot \{ - [\dot{X}_T + a_M \cdot \dot{\varphi}] / V_0 + \varphi \}; \\ P_{\beta} &= k_c \cdot \{ - [\dot{X}_T + b_M \cdot \dot{\beta}] / V_0 + \beta \}; \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Рівняння (3), (4) і (5), дозволяють, у свою чергу, знайти узагальнені сили  $Q_x$ ,  $Q_\varphi$  і  $Q_\beta$ .

Знайшовши бокові (10) та узагальнені (3...5) сили і підставивши їх у систему рівнянь (2), отримуємо наступну математичну модель блоково-модульного МТА в диференційній формі запису:

$$\begin{aligned} A_{11} \cdot \ddot{X}_T + A_{12} \cdot \dot{X}_T + A_{13} \cdot \dot{\varphi} + A_{14} \cdot \varphi + A_{15} \cdot \dot{\beta} + A_{16} \cdot \beta &= B_{11} \cdot \alpha - B_{12} \cdot R_{MG}; \\ A_{21} \cdot \ddot{\varphi} + A_{22} \cdot \dot{X}_T + A_{23} \cdot \dot{\varphi} + A_{24} \cdot \varphi + A_{25} \cdot \dot{\beta} + A_{26} \cdot \beta &= B_{21} \cdot \alpha; \\ A_{31} \cdot \dot{\beta} + A_{32} \cdot \dot{X}_T + A_{33} \cdot \dot{\varphi} + A_{34} \cdot \varphi + A_{35} \cdot \dot{\beta} + A_{36} \cdot \beta &= B_{31} \cdot \alpha + B_{32} \cdot M_0, \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} A_{11} &= M_M; \\ A_{12} &= (k_a + k_b + k_c + P_{fa} + P_{fc} - F_B) / V_0; \\ A_{13} &= [(L + a_M) \cdot (k_a + P_{fa}) + a_M \cdot (k_b - F_B)] / V_0; \\ A_{14} &= - (k_a + k_b + P_{fa} - F_B); \\ A_{15} &= a_M \cdot (k_c + P_{fc}); \\ A_{16} &= - (k_c + P_{fc}); \\ A_{21} &= J_T; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_{22} &= A_{13}; \\
A_{23} &= [(L + a_m)^2 \cdot (k_a + P_{fa}) + a_m^2 \cdot (k_b - F_b)] / V_0; \\
A_{24} &= -A_{22} \cdot V_0; \\
A_{25} &= A_{26} = A_{33} = A_{34} = B_{31} = 0; \\
A_{31} &= J_m; \\
A_{32} &= -A_{15} / V_0; \\
A_{35} &= (K_m + A_{32} \cdot a_m); \\
A_{36} &= A_{15}; \\
B_{11} &= k_a; \\
B_{12} &= B_{31} = 1; \\
B_{21} &= k_a \cdot (L + a_m); \\
M_0 &= R_{mg} \cdot a_m - M_m.
\end{aligned}$$

Для суттєвого спрощення розв'язання цієї системи рівнянь представимо її в операторній формі запису шляхом застосування перетворень Лапласа. Вони полягають у переході від оригінала функції до її відображення шляхом введення оператора - комплексної перемінної  $p = d/dt$ . В результаті це дозволяє перейти від системи диференціальних до системи алгебраїчних рівнянь.

В результаті це дозволяє перейти від системи диференціальних до системи алгебраїчних рівнянь.

*Висновки.* В розглядуваному нами випадку математична модель блоково-модульного агрегату в операторній формі запису матиме такий вид:

$$\left. \begin{aligned}
K_{11} \cdot X_T(p) + K_{12} \cdot \varphi(p) + K_{13} \cdot \beta(p) &= F_{11} \cdot \alpha(p) + F_{12} \cdot R_{mg}(p); \\
K_{21} \cdot X_T(p) + K_{22} \cdot \varphi(p) + K_{23} \cdot \beta(p) &= F_{21} \cdot \alpha(p); \\
K_{31} \cdot X_T(p) + K_{32} \cdot \varphi(p) + K_{33} \cdot \beta(p) &= F_{31} \cdot \alpha(p) + F_{32} \cdot M_0(p),
\end{aligned} \right\} (11)$$

де

$$\begin{aligned}
K_{11} &= A_{11} \cdot p^2 + A_{12} \cdot p; \\
K_{12} &= A_{13} \cdot p + A_{14}; \\
K_{13} &= A_{15} \cdot p + A_{16}; \\
K_{21} &= A_{22} \cdot p; \\
K_{22} &= A_{21} \cdot p^2 + A_{23} \cdot p + A_{24}; \\
K_{23} &= K_{32} = 0; \\
K_{31} &= A_{32} \cdot p; \\
K_{33} &= A_{31} \cdot p^2 + A_{35} \cdot p + A_{36}; \\
F_{11} &= B_{11}; \\
F_{12} &= B_{12}; \\
F_{21} &= B_{21}; \\
F_{31} &= 0; \\
F_{32} &= B_{31}.
\end{aligned}$$

Вхідними змінними в системі рівнянь (11) є:

1) керуючий вплив - кут повороту передніх керованих коліс енергетичного модуля МЕЗ ( $\alpha$ );

2) збурювальний вплив у вигляді поперечної складової  $R_{мг}$  головного вектора сил  $R_m$  (див. рис.1) та сумарного розворотного моменту  $M_0 = R_{мг} \cdot a_m - M_m$ .

Вихідними параметрами функціонування розглядуваної динамічної системи є поперечне зміщення «приведеного» центру мас модульного енергетичного засобу –  $X_T$ , курсовий кут енергетичного модуля  $MEЗ - \varphi$  і кут повороту технологічного модуля відносно площини  $ХОУ - \beta$ .

Література.

1. *Парахін О.О.* Аналіз шляхів ефективного використання МТА на основі модульних енергетичних засобів/ *О.О.Парахін.*- Праці ТДАТУ.- 2009.- Т.4. – Вып.9.

2. *Юдкин В.В.* Оптимизация скорости движения и ширины захвата почвообрабатывающих агрегатов/ *В.В.Юдкин.*- Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1988.- №4.

3. *Надыкто В.Т.* Основы агрегатирования модульных энергетических средств/ *В.Т.Надыкто.* –Мелитополь:КП «ММД», 2003. – 240 с.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТНОГО ДВИЖЕНИЯ БЛОКОВО-МОДУЛЬНОГО МТА

В.Т. Надыкто, А.М. Аюбов, А.А. Парахин

**Аннотация** - разработана математическая модель транспортного движения блокково-модульного машинно-тракторного агрегата в горизонтальной плоскости. Агрегат состоит из модульного энергетического средства (МЭС), на технологический модуль которого навешено орудие. Модель предназначена для оценки устойчивости и управляемости движения МТА.

## MATHEMATICAL MODEL OF TRANSPORT MOTIONS OF BLOCK-MODULE MTA

V.Nadykto, A. Ayubov, A.Parackhin

### *Summary*

**The mathematical model transport motion of block-module aggregate is developed in a horizontal plane.**